

# TERCER CONGRESO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

## CIGeo



### **Congresos UPV**

*Tercer Congreso en Ingeniería Geomática - CIGeo*

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2021>

© Editor científico  
Martín Furones, A.

© de los textos: los autores

© 2021, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València.  
[www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) Ref.: 6645\_01\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-961-1

DOI: <https://doi.org/10.4995/CIGeo2021.2021.13957>



***Tercer Congreso en Ingeniería Geomática - CIGeo***

Se distribuye bajo una [licencia de Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).  
Basada en una obra en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2021>



## Comités del congreso

### Comité Organizador

- Jorge Padín Devesa. *Director del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- José Juan Arranz Justel. *Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM*
- José Luis Lerma García. *Coordinador del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPV*
- Belén Benito Oterino. *Coordinadora de la comisión académica UPM del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPM*
- Ángel Martín Furones. *Subdirector de Investigación del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- Jorge Gaspar Escribano. *Subdirector de Investigación, Doctorado y Postgrado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM*
- Ana Belén Anquela Julián. *Directora de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, UPV*
- Antonio Vázquez Hoehne. *Director del Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, UPM*

### Comité Científico

- Álvarez Taboada, M.F. (*U. León*)
- Ariza López, F.J. (*U. León*)
- Baselga Moreno, S. (*UPV*)
- Benito Oterino, B. (*UPM*)
- Fernández Torres, J. (*CSIC*)
- García Meléndez, E. (*U. León*)
- González Aguilera, D. (*U. Salamanca*)
- Hermosilla Gómez, T. (*Canadian Forest Serv.*)
- Iniesto Alba, M.J. (*U. Santiago*)
- Lerma García, J.L. (*UPV*)
- Manso Callejo, M.A. (*UPM*)
- Martín Furones, A. (*UPV*)
- Martínez Llario, J.C. (*UPV*)
- Núñez Andrés, A. (*UPC*)
- Pardo Pascual, J.E. (*UPV*)
- Patio, J.E. (*EAFIT University*)
- Rodríguez Gonzalez, P. (*U. León*)
- Sapena Moll, M. (*DRL*)
- Vázquez Hoehne, A. (*UPM*)
- Vigo Aguiar, I. (*U. Alicante*)

**Editor Científico:** Martín Furones, A.

### Entidades colaboradoras en el programa de doctorado

- Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
- Centro Superior de Investigaciones Científicas
- CSIC
- ESA/ESAC
- GeoNumerics
- Institut Cartogràfic Valencià
- Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico
- Instituto Geográfico Nacional
- LEICA Geosystems
- TOPCON
- TRIMBLE

# Tercer Congreso en Ingeniería Geomática - **CIGeo**

## ÍNDICE

### **Geocomputing, Modelling and Cultural Heritage**

#### *Geocomputación, Modelado y Patrimonio*

NOISE REDUCTION IN CONTOUR LINES AND SLOPE MAPS FROM MEDIUM/HIGH-DENSITY LIDAR DATA	1
<i>Jacinto Santamaría-Peña, Elena Palacios-Ruiz, Teresa Santamaría-Palacios</i>	
QUALITY ASSESSMENT OF SPHERICAL PANORAMIC IMAGES	7
<i>Peyman Javadi, José Luis Lerma, Luis García-Asenjo, Pascual Garrigues</i>	
APPLICATION OF IMPROVED ACCURACY SFM-MVS FOR PHOTOGRAMMETRIC RESTITUTION AND COMPARISON OF PRE- AND POST-ERUPTION ARCHIVAL AERIAL IMAGERY ON DECEPTION ISLAND (SOUTH SHETLAND, ANTARCTICA)	15
<i>Carlos Paredes, Rogelio de la Vega-Panizo, Miguel Ángel Roperó</i>	
DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE ILUMINACIÓN DE VÍAS PÚBLICAS CON POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO	26
<i>José Ángel Garrido, Ángel Marqués, Ángel Martín, José Llorens</i>	
POTENTIAL OF CORONA SATELLITE IMAGERY FOR 3D RECONSTRUCTION OF ARCHAEOLOGICAL LANDSCAPES	35
<i>Jorge Angás, Paula Uribe, Manuel Bea, Mercedes Farjas, Enrique Ariño, Verónica Martínez-Ferrerías, Josep María Gurt</i>	

### **Geodesy and Geophysics**

#### *Geodesia y Geofísica*

A DATA-INTENSIVE APPROACH TO EXPLOIT NEW GNSS SCIENCE OPPORTUNITIES	43
<i>Vicente Navarro, Javier Ventura-Traveset</i>	
PROPOSED METHODOLOGY FOR ESTABLISHING AN EARLY GNSS WARNING SYSTEM FOR REAL-TIME DEFORMATION MONITORING	54
<i>Mutaz Qafisheh, Angel Martín, Raquel M. Capilla</i>	
TOWARDS A PRECISE MODELLING OF THE EL SALVADOR FAULT ZONE USING GEODETIC TECHNIQUES	61
<i>Juan J. Portela-Fernández, Alejandra Staller, Marta Béjar-Pizarro</i>	

### **Earth observation, Cartography, and Environmental applications**

#### *Observación de la Tierra, Cartografía y Aplicaciones Medioambientales*

DETECTANDO LOS DESEQUILIBRIOS DOTACIONALES COMO GENERADORES DE PROBLEMAS EN LA MOVILIDAD DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO	69
<i>Susana Astudillo-Ortega, Antonio Vázquez</i>	
MODELO DE PLANEACIÓN DE RUTAS PARA LOS USUARIOS DE BOGOTÁ	77
<i>Wilson Vargas, Carmen Femenia</i>	
APLICACIÓN DE LA GEOMÁTICA AL ANÁLISIS DE RECURSOS MARINOS PESQUEROS EN LA COSTA DE LA COMUNIDAD VALENCIANA	84
<i>Pablo Pascual-Yarritu, Gaspar Mora-Navarro, Carmen Femenia-Ribera</i>	



ADAPTACIÓN DE ESTÁNDARES INTERNACIONALES A LAS DELIMITACIONES TERRITORIALES: LÍNEAS LÍMITE JURISDICCIONALES <i>Ramon Iborra-Fabra, Carmen Femenia-Ribera, Gaspar Mora-Navarro</i>	92
ARQUITECTURA NEURONAL PARA PREDICCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN BASE A VARIABLES METEOROLÓGICAS <i>Llinet Benavides, Miguel Ángel Manso</i>	97
ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA PIEZOMETRÍA Y LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL ACUÍFERO ALMONTE- MARISMAS (ANDALUCÍA, ESPAÑA) <i>Miguel González-Jiménez, Carolina Guardiola-Albert, Héctor Aguilera-Alonso, Marta Béjar- Pizarro, Gerardo Herrera, Pablo Ezquerro, Juan López-Vinielles, Natalia Fernández, Fernando Ruiz-Bermudo</i>	102
MEJORANDO LA CALIDAD DE LOS MAPAS DE DEFORMACIONES GENERADOS POR LA CADENA PSIG DEL CTTC: LA SUITE DE HERRAMIENTAS VETOOLS <i>José A. Navarro, Anna Barra, Oriol Monserrat, Michele Crosetto</i>	109
EL PROYECTO MOMPÁ: PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN BASADOS EN EL MONITOREO MEDIANTE INTERFEROMETRÍA SATELITAL RADAR (INSAR) <i>Anna Barra, Xavier Colell, Anna Echeverría, Laura Trapero, Jordi Marturia, Ivan Fabregat, Qi Gao, María Cuevas, Muriel Gasc, Pere Buxó, Nathalie Dufour, Guido Luzi, Michele Crosetto</i>	118
LAND SUBSIDENCE ANALYSIS CAUSED BY AQUIFER OVEREXPLOITATION USING GEP TOOLS: A-DINSAR ON THE CLOUD <i>Guadalupe Bru, Pablo Ezquerro, Carolina Guardiola-Albert, Marta Béjar-Pizarro, Gerardo Herrera, Roberto Tomás, María Inés Navarro-Hernández, Juan M. López-Sanchez, Ali Hakan Ören, Barış Çaylak, Alper Elçi, Khaldoun Shatanawi, Alsharifa Hind Mohammad, Husam A. Abu Hajar, Roberta Boni, Claudia Meisina</i>	127
MONITORING CRITICAL INFRASTRUCTURE EXPOSED TO ANTHROPOGENIC AND NATURAL HAZARDS USING SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY <i>Antonio Miguel Ruiz-Armenteros, José Manuel Delgado-Blasco, Matus Bakon, Milan Lazecky, Miguel Marchamalo-Sacristán, Francisco Lamas-Fernández, Ana Ruiz-Constán, Jesús Galindo-Zaldívar, Carlos Sanz de Galdeano, Sergio Martos-Rosillo, Juraj Papco, Daniele Perissin, Joaquim J. Sousa</i>	137
MEJORANDO LA INTERPRETACIÓN DE SERIES TEMPORALES USANDO APRENDIZAJE NO SUPERVISADO <i>Jaime Sánchez</i>	147
DETECCIÓN DEL INICIO DE REACTIVACIÓN VOLCÁNICA EN LA ISLA DE LA PALMA, ISLAS CANARIAS, Y ESTUDIO DE SU EVOLUCIÓN TEMPORAL <i>Joaquín Escayo, José Fernández, Zhongbo Hu, Antonio G. Camacho, Sergey V. Samsonov, Juan F. Prieto, Kristy F. Tiampo, Mimmo Palano, Jordi J. Mallorquí</i>	155
UNDERSTANDING VERTICAL GROUND DISPLACEMENT FROM P-SBAS USING GETIS-ORD GI* STATISTIC <i>Ignacio Barbero, Raúl Páez, Cristina Torrecillas</i>	163
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE TESIS DOCTORAL: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DINSAR A LA PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS GEOLOGICOS NATURALES E INDUCIDOS EN CIUDADES E INFRAESTRUCTURAS PRIORITARIAS DE CENTROAMÉRICA <i>Carlos García-Lanchares, Miguel Marchamalo, Candela Sancho</i>	170

DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO MEDIANTE TÉCNICAS D-INSAR EN LA ISLA DE CEPCIÓN (ANTÁRTIDA) <i>Rogelio de la Vega-Panizo, Andrea Sofía Garmendía, Carlos Paredes, Miguel Ángel Ropero</i>	177
IMPROVED STOCK UNEARTHING METHOD (ISUM) ALLOW TO ASSESS SOIL EROSION PROCESSES IN GRAFTED PLANTS USING IN SITU TOPOGRAPHICAL MEASUREMENTS <i>Jesús Rodrigo-Comino, Enric Terol, Artemi Cerdà</i>	186
OPERATIONAL SAFETY AND OPERATOR MANAGEMENT TO ENABLE THE USE OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (UAS) AS GEOMATICS TOOLS <i>Norberto Vera, Israel Quintanilla, Jordi Vidal, Beatriz Fernández</i>	194
AUMENTO DE RESOLUCIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS PROCEDENTES DE UAVS MEDIANTE ALGORITMOS DE PANSHARPENING <i>Javier Raimundo, Juan F. Prieto, Serafín López-Cuervo</i>	201
ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOFTWARE PARA OBTENER MDT CON FOTOGRAMETRÍA RPAS <i>Alba N. Arévalo-Verjel, José Luis Lerma, José Fernández</i>	209
A REVIEW OF THE USE OF REMOTE SENSING FOR MONITORING AND QUANTIFYING CARBON SEQUESTRATION IN MARGINAL LANDS <i>Juan Pedro Carbonell-Rivera, Javier Estornell, Luis A. Ruiz, Alfonso Abad, Bettina Felten, Jesús Torralba</i>	216
UTILIZACIÓN DE SERIES TEMPORALES DE ÍNDICES ESPECTRALES BASADOS EN TELEDETECCIÓN PARA EL MONITOREO DE CULTIVOS DE TOMATE SOLANUM LYCOPERSICUM <i>Edier Fernando Ávila, Bibiana Royero</i>	224
ESPECTROMETRÍA DE IMAGEN PARA EL ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS <i>Francisco Cabrera-Torres, Mercedes Farjas-Abadía, Juan Gregorio Rejas-Ayuga</i>	231
MODELOS EMPÍRICOS DE PREDICCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE VIVO MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES DE SENTINEL-2 Y DATOS METEOROLÓGICOS <i>María Alicia Arcos, Ángel Balaguer-Beser, Luis Ángel Ruiz</i>	239
METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE IDENTIFICATION OF MARGINAL LANDS WITH REMOTE SENSING-DERIVED PRODUCTS AND ANCILLARY DATA <i>Jesús Torralba, Luis A. Ruiz, Charalampos Georgiadis, Petros Patias, Rodrigo Gómez-Conejo, Natalia Verdec Maria Tassopoulou, Fernando Bezares, Ewa Grommy, Sebastian Aleksandrowicz, Elke Krätzschar, Michał Krupiński, Juan Pedro Carbonell-Rivera</i>	248
MODELACIÓN DE °BRIX Y PH EN UVA VINÍFERA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES. VALLE DE COLCHAGUA, CHILE <i>Sandra Fredes, Luis Ángel Ruiz, Jorge Abel Recio</i>	258
SUSTAINABLE AGRICULTURE MANagements TO CONTROL SOIL EROSION <i>Artemi Cerdà, Enric Terol</i>	268
DEFINICIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE DAÑO CAUSADO POR GRANIZO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO DATOS DE SENSORES REMOTOS <i>Leandro Sosa-Avaro, Ana Justel, Iñigo Molina</i>	278



COMPARACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD ENTRE ZONAS URBANAS DE ECUADOR Y ESPAÑA EMPLEANDO IMÁGENES SENTINEL 2 MSI <i>Lorena Caiza, Gabriella Zegarra, Estefanía Navarro, Flor Álvarez</i>	285
MEDITERRANEAN SURFACE GEOSTROPHIC CIRCULATION FROM SATELLITE DATA <i>Ferdous Zid, Isabel Vigo, David García</i>	294
CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES COSTEROS CON IMÁGENES LANDSAT 8 Y SENTINEL 2 (2015-2019) EN CHILE CENTRAL; PLAYA REÑACA, BAHÍA DE CONCÓN Y BAHÍA DE ALGARROBO <i>Idania Briceño de Urbaneja, Elena Sánchez-García, Josep E. Pardo-Pascual, Jesús Palomar- Vázquez, Raúl Ugalde-Peralta, Catalina Aguirre-Galaz, Waldo Pérez-Martínez, Paulina Vidal-Páez</i>	302

***CIGeo***

**Geocomputing, Modelling  
and Cultural Heritage**  
*Geocomputación, Modelado  
y Patrimonio*



## NOISE REDUCTION IN CONTOUR LINES AND SLOPE MAPS FROM MEDIUM/HIGH-DENSITY LIDAR DATA

### REDUCCIÓN DEL RUIDO EN LA GENERACIÓN DE CURVAS DE NIVEL Y MAPAS DE PENDIENTE A PARTIR DE DATOS LIDAR DE MEDIA/ALTA DENSIDAD

Jacinto Santamaría-Peña<sup>a,\*</sup>, Elena Palacios-Ruiz<sup>b</sup>, Teresa Santamaría-Palacios<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, University of La Rioja, C/ Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, Spain. [jacinto.santamaria@unirioja.es](mailto:jacinto.santamaria@unirioja.es)

<sup>b</sup> Department of Sustainability and Ecological Transition, Government of La Rioja, C/ Prado Viejo 62 Bis, 26007 Logroño, Spain. [epalacios@larioja.org](mailto:epalacios@larioja.org)

<sup>c</sup> Graduated in Mechanical Engineering, C/ M<sup>a</sup> de la O Lejarraga 5, 26005 Logroño, Spain. [tesantp@unirioja.es](mailto:tesantp@unirioja.es)

#### Abstract:

The use of medium/high-density LIDAR (Light Detection And Ranging) data for land modelling and DTM (Digital Terrain Model) is becoming more widespread. This level of detail is difficult to achieve with other means or materials. However, the horizontal and vertical geometric accuracy of the LIDAR points obtained, although high, is not homogeneous. Horizontally you can reach precisions around 30-50 cm, while the vertical precision is rarely greater than 10-15 cm. The result of LIDAR flights, are clouds of points very close to each other (30-60 cm) with significant elevation variations, even if the terrain is flat. And this makes the triangulated models TIN (Triangulated Irregular Network) obtained from such LIDAR data especially chaotic. Since contour lines are generated directly from such triangulated models, their appearance shows excessive noise, with excessively broken and rapidly closed on themselves. Getting smoothed contour lines, without decreasing accuracy, is a challenge for terrain model software. In addition, triangulated models obtained from LIDAR data are the basis for future slope maps of the land. And for the same reason explained in the previous paragraph, these slope maps generated from high or medium density LIDAR point clouds are especially heterogeneous. Achieving uniformity and greater adjustment to reality by reducing the natural noise of LIDAR data is another added challenge. In this paper, the problem of excessive noise from LIDAR data of high (around 8 points/m<sup>2</sup>) and medium density (around 2 points/m<sup>2</sup>) in the generation of contour lines and terrain slope maps is raised and solutions are proposed to reduce this noise. All this, in the area of specific software for the management of TIN models and GIS (Geographic Information System) and adapting the alternatives proposed by these programmes.

**Key words:** counter lines, slope maps, LIDAR, 3D modelling, GIS

#### Resumen:

El uso de datos LIDAR de alta densidad para la modelización del terreno y obtención de MDT (Modelo Digital del Terreno) está cada día más generalizado. El nivel de detalle conseguido es difícil de alcanzar con otros medios o materiales. No obstante, la precisión geométrica horizontal y vertical de los puntos LIDAR obtenidos, aunque es alta, no es homogénea. Horizontalmente se puede llegar a precisiones del orden de los 30-50 cm, mientras la precisión vertical raras veces es mayor de 10-15 cm. El resultado de los vuelos LIDAR, son nubes de puntos muy próximos entre sí (30-60 cm) con variaciones de cota importantes, aunque el terreno sea llano. Y esto hace que los modelos triangulados TIN (Triangulated Irregular Network) obtenidos a partir de dichos datos LIDAR sean especialmente caóticos. Dado que las curvas de nivel se generan directamente a partir de dichos modelos triangulados, su apariencia muestra excesivo ruido, con curvas excesivamente quebradas y rápidamente cerradas sobre sí mismas. Conseguir curvas suavizadas, sin disminuir la precisión, es un reto para los programas de modelización de terrenos. Además, los modelos triangulados obtenidos a partir de datos LIDAR, son la base de los futuros mapas de pendiente de los terrenos. Y por la misma razón explicada en el párrafo anterior, estos mapas de pendiente generados a partir de nubes de puntos LIDAR de alta o media densidad, son especialmente heterogéneos. Conseguir uniformidad y mayor ajuste a la realidad reduciendo el ruido natural de los datos LIDAR es otro reto añadido. En esta comunicación, se plantea la problemática del excesivo ruido de los datos LIDAR de alta (en torno a 8 puntos/m<sup>2</sup>) y media densidad (en torno a 2 puntos/m<sup>2</sup>) en la generación de curvas de nivel y mapas de pendiente del terreno y se proponen soluciones para reducir dicho ruido. Todo ello, en el ámbito de programas específicos de gestión de modelos TIN y de los SIG (Sistemas de Información Geográfica) y adaptando las alternativas que dichos programas plantean.

**Palabras clave:** curvas de nivel, mapa de pendientes, Lidar, modelización 3D, SIG

---

\* Corresponding Author: Jacinto Santamaría-Peña, [jacinto.santamaria@unirioja.es](mailto:jacinto.santamaria@unirioja.es)

## 1. Introduction

In this paper, the currently existing problem regarding the use of medium/high density LIDAR data for the generation of DTM will be described (Sharma *et al.* 2021) and more specifically, the obtaining of contour lines and slope maps drawn from them.

Someone may have the mistaken feeling that a higher resolution of the lidar data is, better digital models will be obtained and the more accurate the contour lines extracted from them will be. To focus on the question raised, the following Figure 1 is presented, which shows contour lines of a terrain of 2 km x 2 km in extension obtained by triangulating the LIDAR point cloud and a detail of a specific area within terrain. The LIDAR flight had an average density of 2 points/m<sup>2</sup>, which requires handling a total of approximately eight million points.

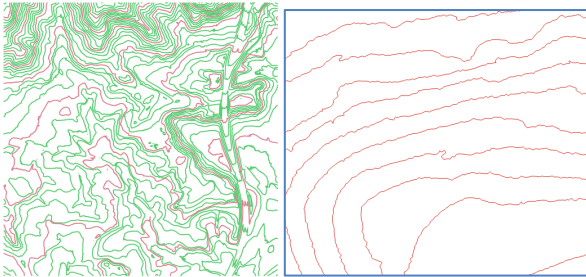


Figure 1: Contour lines (5 m equidistance) and detail.

In the detail of the previous figure it is observed how the generated contour lines are excessively sinuous and very broken. The explanation for this phenomenon should be sought precisely in the excessive variability of the vertical precision of the LIDAR points (López-Fernández *et al.* 2017), which will rarely be greater than 10 cm or 15 cm and in the existence of very close triangulated points. (between 40 and 60 cm) in point clouds between 2-6 points/m<sup>2</sup>.

Throughout this paper, certain guidelines will be given to try to eliminate as much as possible this excessive sinuosity in the design of the contour lines and the excessive noise derived in the generated slope maps.

## 2. Material and Methods

As stated in the previous section, we will work with a LIDAR flight sheet (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, PNOA) for 2016, which covers an area of 4 km<sup>2</sup> and has an initial point density of 2 points/m<sup>2</sup>. The point cloud was classified and the terrain points were initially defined by around two million points.

The management of all this information until the terrain modeling is achieved can be done either through CAD3D programs (Hu *et al.* 2010) or through the tools of the Geographic Information Systems. As CAD3D software, AutoCAD CIVIL3D® will be used and as GIS software, QGIS® will be used.

Regarding the strategies to be followed to achieve the proposed objectives of homogenizing the contour lines and reducing noise in slope maps, it should be noted that there are basically two possible paths:

- or a simplification process is undertaken on the original data (LIDAR flight points);

- or the contour lines obtained are subjected to some simplification and / or smoothing process.

### 2.1. Processing with CIVIL3D®

For the dynamic management of the model in CIVIL3D®, three simplification processes of the point cloud have been previously carried out, reducing the number of points to 1.470.941 points and generating a triangulation of approximately two million triangles (Fig. 2).

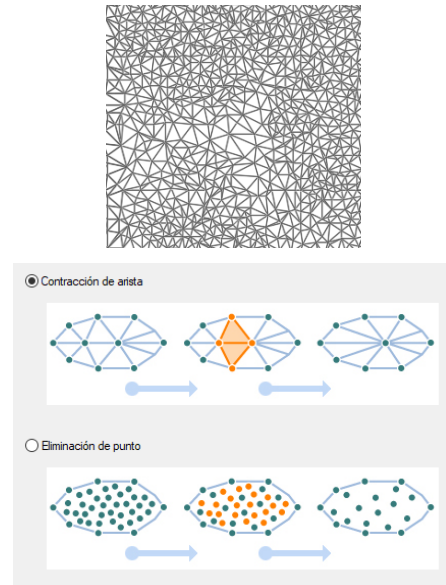


Figure 2: Triangulation and simplification process with CIVIL3D®.

In CIVIL3D there are basically two possibilities to simplify the digital model:

- Edge contraction: removes edges and replaces them with single points, making the model smooth.
- Elimination of points: points are eliminated from the densest areas and in the percentage set by the user.

On many occasions, despite carrying out this type of simplification process, the models remain excessively complex (Schmid *et al.* 2011) and the contour lines generated maintain their sinuous condition and are loaded with abundant noise (Fig. 3).

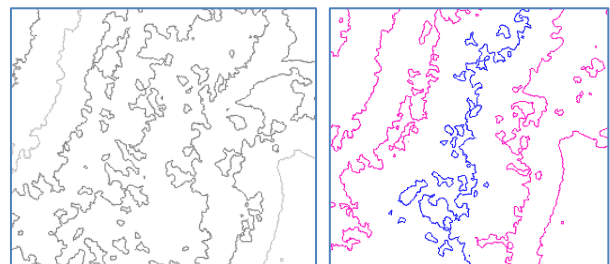


Figure 3: General. Sinuous contour lines and excessive noise with CIVIL3D®.

Figure 4 shows contour lines over the triangulation of the model, with different equidistance values. By observing these images, it is possible to understand the reason why the contour lines are so heterogeneous: small triangles between very close points (around one meter) whose height can contain a considerable margin of error, causing



the path traveled by a contour line to have to adapt to highly changing triangle sides.

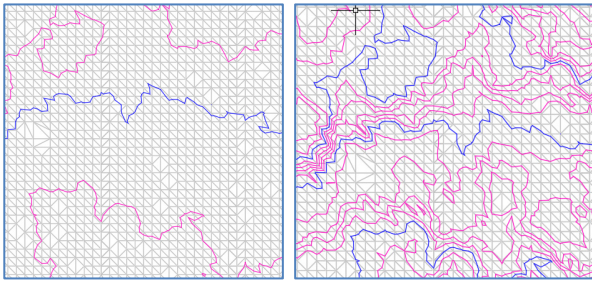


Figure 4: Contour lines on very dense triangulation.

A longitudinal profile on this model clearly detects the abrupt and abundant changes in slope typical of models from high-density LIDAR data (Mitasova *et al.* 2005). In Figure 5 we try to show this characteristic.

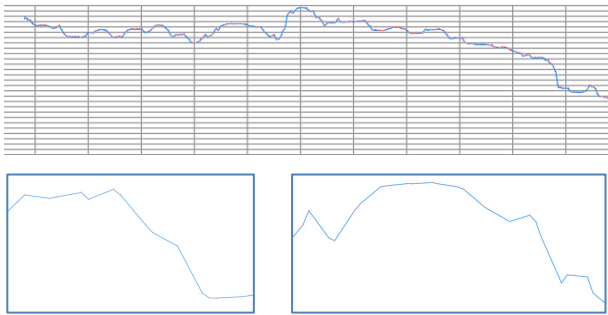


Figure 5: Longitudinal profiles on triangulated model and details showing abrupt changes in slopes.

In relation to the slope map generated from a model based on médium/high resolution LIDAR, something similar happens to that described for the contour lines (Fig. 6). The slope maps are generated directly by analysis of each of the model's triangles, and the vertices of the triangles that show some irregularity in their precision, generate a lot of noise in the obtained slope model.

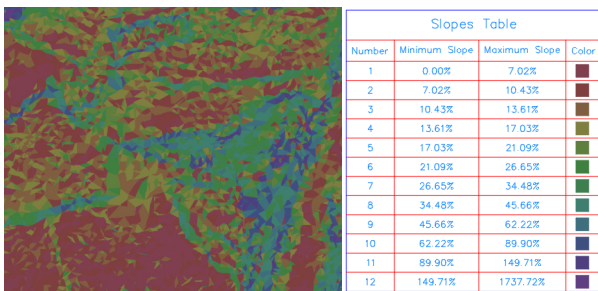


Figure 6: Slope map on triangulated model showing little homogeneity and a lot of noise.

Adjacent triangles in flat terrain or with little slope, but uniform, show very different slopes precisely because of the imprecision of the height of the vertices of the triangles compared to the small lengths of the sides of the triangles.

Figure 7 shows the triangles of the digital terrain model and its slope texture, which clearly shows its low uniformity as it comes from a triangulation on medium-resolution LIDAR data.

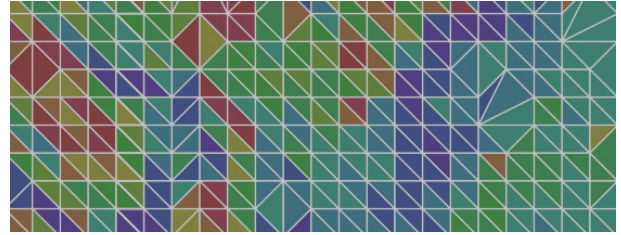


Figure 7: Triangulation and texture of model slopes.

Another process on the digital model that can be performed in CIVIL3D is smoothing (Fig. 8), which consists of adding points at elevations determined by the system using the Natural Neighbor Interpolation (NNI) method or the Kriging method, which produces smoother contour lines. That is, points are eliminated and the model is more uniform, without such prominent ridges. But it has a major drawback: more points are generated in the model and so are more triangles, which will slow down the modeling process.

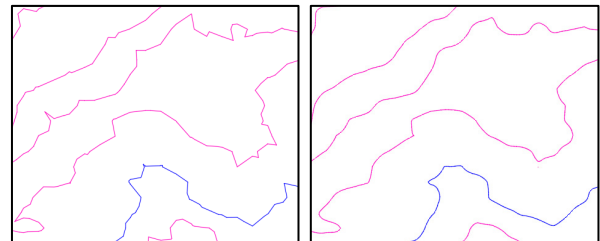


Figure 8: Smoothing process of the model, generating more rounded contour lines.

Regarding the slope model, the effect of the smoothing of the surfaces causes a greater homogeneity in the slope map. Assigned color transitions look smoother, with less contrast. Thus, simplification generates a similar effect (see Figure 9).

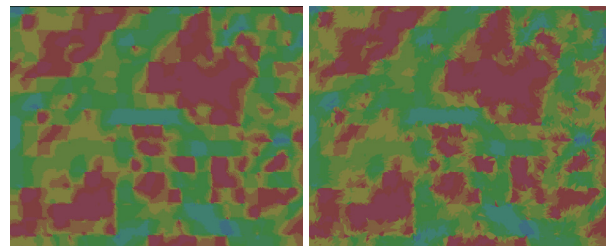


Figure 9: Effect of surface simplification on the slope map of a model obtained from LIDAR data.

## 2.2. Processing with QGIS® and external libraries

In GIS environment, there are also surface smoothing and simplification processes, the effect of which will also translate into more rounded contour lines and more homogeneous slope maps.

However, GIS presents a clear advantage over CAD3D programs in the management of digital terrain models (DTM) and is the possibility of combining raster and vector tools.

Thus, in this study, the raster DEM (Digital Elevation Model) with a resolution of 1 m was obtained from the original LIDAR point-terrain cloud, from which the contour

lines with 5 m equidistance were obtained. The raster processing of the information greatly speeds up the calculation processes (Guo *et al.* 2010). However, see Figure 10, the results in terms of contour lines are similar: very rough contour lines and a lot of perimeter noise. The slope maps reflect well the slope changes in the different areas of the digital model (Stal *et al.* 2013) (see Figure 11).

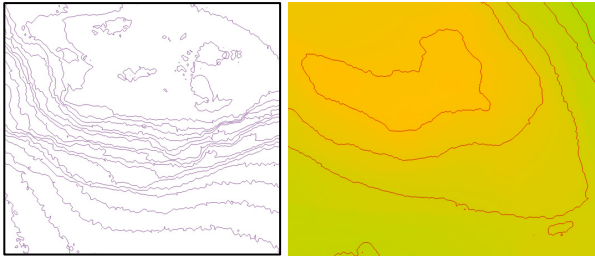


Figure 10: Sinuous contour lines from DEM with QGIS.

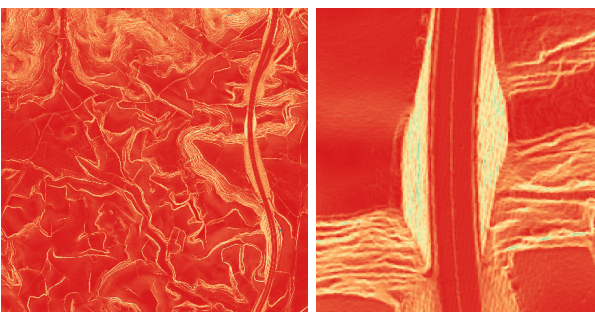


Figure 11: Slope map from DEM with QGIS. Detail of side slopes of Highway A-68.

Simplification and smoothing processes in QGIS are carried out with the tools of this software or with external graphic libraries, such as GRASS and SAGA. Thus, raster analysis processes such as "filtering" or "sieving" are available, which eliminate raster polygons with a number of pixels below a threshold. The "roughness" or "irregularity" tool can also be very useful, which detects areas that differ from the surrounding areas due to their elevation or slope (see Figure 12). The light areas are flat areas, with few changes in the elevation of the terrain or in the slope and the dark areas are the areas of unevenness or abrupt changes in slope.

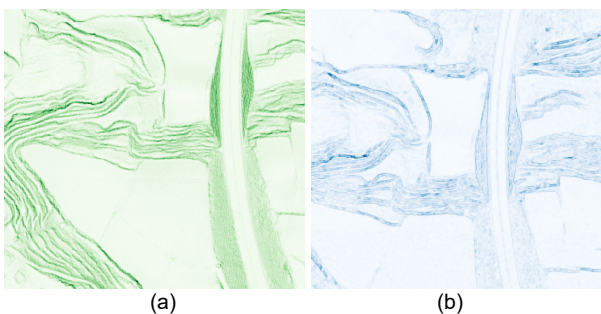


Figure 12: Roughness map: a) From elevations; b) From slopes.

SAGA library has a module called Smoothing ViGrA ("Vision with Generic Algorithms"), which smoothes the model by eliminating ridges and steep slopes (Lindsay *et al.* 2019). Another typical process in SAGA is the "simple filter" in its smooth mode, with the same purpose (Fig. 13).

GRASS also has specific modules for this same purpose, such as the "Mesh denoise" process, which reduces local elevation variations and reduces noise in the digital model (Fig. 14).



Figure 13: SAGA "simple filter" process on original DTM model in area with a lot of noise and generated smoothing.

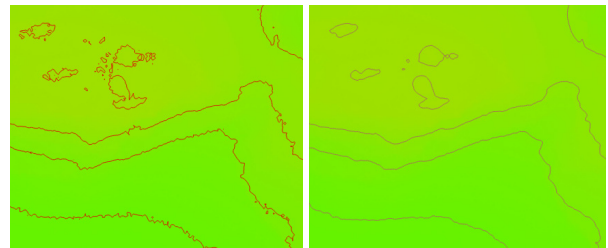


Figure 14: GRASS "Mesh denoise" process on original DTM model in area with a lot of noise and generated smoothing.

In QGIS there are another processes that modify the geometry of the contour lines, without affecting the model. They are processes that require fewer computational resources and that generate more attractive contour lines with less noise. Two of them are described below based on the contour lines of the original 1m DTM model. In general, they are based on a combination of simplification and/or smoothing of contour lines previously generated with other processes (Figs. 15 and 16).

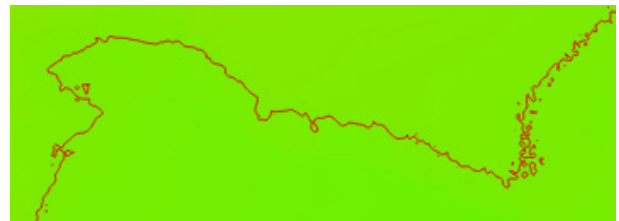


Figure 15: Original contour lines (5m equidistance) with excessive sinuosity and with high noise areas.

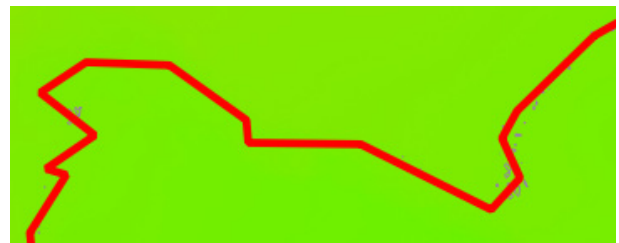


Figure 16: Simplification process of vector geometry on contour lines of the original model.

The second process generates new contour lines with more number of vertices and adapted to a greater or lesser degree to the original geometries. Thus, by smoothing the geometry obtained in the previous step, it is achieved Figures 17 y 18.

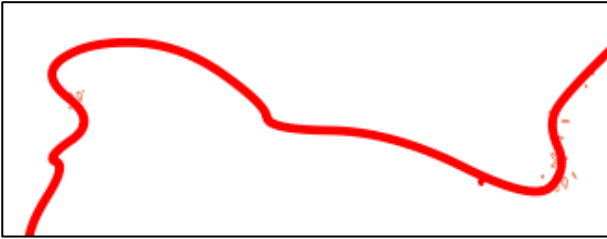


Figure 17: Result of the process of simplifying and smoothing the contour lines in the original model (detail).

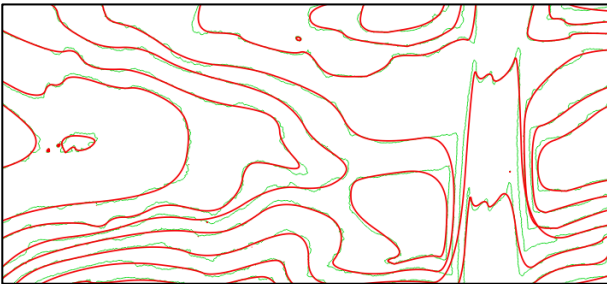


Figure 18: Result of the simplification and smoothing process in the original model (detail).

### 3. Results and discussion

In the previous section, different processes have been described for the simplification and smoothing of the digital models obtained from medium and high density LIDAR data. Solutions based on CAD3D software and solutions based on GIS have been proposed, as has already been commented (Table 1).

Table 1: Solutions proposed.

Software	CAD3D Systems [AutoCAD CIVIL3D]	Geographic Information System [QGIS]
Vector solutions	Simplification	Simplify
	Smoothed	Smooth
Raster solutions	A complementary element is necessary: AutoCAD Raster Design	Filtration Rugosity SAGA simple-smooth filter Mesh denoise of GRASS

The CAD3D software chosen has been AutoCAD CIVIL3D, which is highly oriented to providing solutions to site surveying and earthmoving projects in particular. In addition, it includes specific modules for linking to external databases to manage a wide variety of formats, such as DEM, LIDAR, etc.

As GIS software, QGIS has been chosen, due to its proven power in both raster and vector solutions.

CAD3D solutions attempt to directly address the high heterogeneity of the models, eliminating peaks and discontinuities, producing smoother contour lines with less noise and more realistic slope maps (Duan *et al.* 2021). It should be noted that the vector processes for smoothing and simplifying surfaces tend to require too

many hardware resources and are usually slow processes.

In general, GIS solutions perform better than CAD3D solutions, since they require less processing time, less hardware resources (Liu 2008) and face the problem from two well differentiated points of view, but both in a powerful way: the processes vector and raster processes. They offer more versatility, since they allow directing the smoothing raster processes over the original DTMs and later combining other vector processes, simplifying and smoothing the contour lines obtained, thus achieving more realistic solutions.

At this point, it is necessary to remember that the main problem with digital models from medium/high density LIDAR data is the heterogeneity of the precision of the elevation of the points compared to the small distance between them. Any applied process must bear in mind this indisputable fact and attack it in a reasonable way, without excessively altering the original model.

It should also be noted that these processes do not try to solve a problem only of appearance of the final model, but rather they try to correct a question of extreme irregularity in the origin of the LIDAR data. Definitely, the objective of applying any process should be to arrive at more realistic solutions based on somewhat chaotic models.

As it has already been observed, a clear separation clear separation has not been made between contour lines smoothing processes and those aimed at homogenizing slope maps. This is because both concepts are closely related to the origin and structure of LIDAR data. Solving the heterogeneity of the elevations at the origin, both aspects are corrected with identical processes.

### 4. Conclusions

In this paper, several vector solutions and raster solutions that attempt to respond to the problem of models from high and medium resolution LIDAR data has been revealed. It has been shown that by means of vector processes from a CAD3D software or by raster processes from a GIS software, the original heterogeneous models can be simplified or smoothed and other models more in line with reality can be achieved, which ultimately show more homogeneous contour lines and areas of slope without so much noise.

In addition, the vector processes of GIS can also provide solutions to finish giving that necessary realism in the typical three-dimensional representation of the terrain through contour lines.

The constant development of algorithms for simplification and / or smoothing of DEMs in the field of Geographic Information Systems is now necessary. LIDAR data and other data sets from satellite platforms, increasingly voluminous and complex, will require powerful processes for their management and editing.

### Acknowledgements

Our gratitude to the National Geographic Institute and the Government of La Rioja, for making available to us in a totally disinterested way sheets of the LIDAR PNOA 2016 flight produced within the framework of the National Cartographic System (SCNE).



## References

- DUAN, Y., YANG, C., CHEN, H., YAN, W., and LI, H., 2021. Low-complexity point cloud denoising for LiDAR by PCA-based dimension reduction. *Optics Communications*, **482**, 126567. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126567
- GUO, Q., LI, W., YU, H., and ALVAREZ, O. 2010. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **76**(6), pp. 701-712. DOI: 10.14358/PERS.76.6.701
- HU, H., FERNANDEZ-STEEGER, T. M., DONG, M., NGUYEN, H. T., and AZZAM, R., 2010. 3D Modeling using LiDAR data and its geological and geotechnical applications. In 2010 18th International Conference on Geoinformatics (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567796
- LINDSAY, J. B., FRANCONI, A., and COCKBURN, J. M. H., 2019. LiDAR DEM smoothing and the preservation of drainage features. *Remote Sensing*, **11**(16). DOI: 10.3390/rs11161926
- LIU, X., 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in physical geography*, **32**(1), pp. 31-49. DOI: 10.1177/0309133308089496
- LOPEZ-FERNANDEZ, L., RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P., HERNANDEZ-LOPEZ, D., ORTEGA-TEROL, D., and GONZALEZ-AGUILERA, D., 2017. Comparative Analysis of Triangulation Libraries for Modeling Large Point Clouds from Land and Their Infrastructures. *Infrastructures*, **2**(1), 1. DOI: 10.3390/infrastructures2010001
- MITASOVA, H., MITAS, L., & HARMON, R. S., 2005. Simultaneous spline approximation and topographic analysis for lidar elevation data in open-source GIS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **2**(4), pp. 375-379. DOI: 10.1109/LGRS.2005.848533
- SCHMID, K. A., HADLEY, B. C., and WIJEKOON, N., 2011. Vertical accuracy and use of topographic LIDAR data in coastal marshes. *Journal of Coastal Research*, **27**(6A), pp. 116-132. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00188.1
- SHARMA, M., GARG, R. D., BADENKO, V., FEDOTOV, A., MIN, L., and YAO, A., 2021. Potential of airborne LiDAR data for terrain parameters extraction. *Quaternary International*, 575, pp. 317-327. DOI: 10.1016/j.quaint.2020.07.039
- STAL, C., TACK, F., DE MAEYER, P., DE WULF, A., and GOOSSENS, R., 2013. Airborne photogrammetry and lidar for DSM extraction and 3D change detection over an urban area—a comparative study. *International Journal of Remote Sensing*, **34**(4), pp. 1087-1110. DOI: 10.1080/01431161.2012.717183

## QUALITY ASSESSMENT OF SPHERICAL PANORAMIC IMAGES

### VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE IMÁGENES PANORÁMICAS ESFÉRICAS

Peyman Javadi\*, José Luis Lerma, Luis García-Asenjo, Pascual Garrigues

Department of Cartographic Engineering, Geodesy, and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [pjavadi@doctor.upv.es](mailto:pjavadi@doctor.upv.es); [jllerma@cgf.upv.es](mailto:jllerma@cgf.upv.es); [lugarcia@cgf.upv.es](mailto:lugarcia@cgf.upv.es); [pasgarta@cgf.upv.es](mailto:pasgarta@cgf.upv.es)

#### Abstract:

In recent years, the production of panoramic images has been boosted by the increasing use of digital photographic cameras and mobile phones. However, for highly demanding applications such as long-range deformation monitoring, the accuracy and quality control of panoramic images and processes used to obtain accurate 3D models should be properly assessed. Therefore, prior to being applied in real projects, the quality of the spherical panoramic images generated by three widely used computer programs (Agisoft Metashape, GigaPan Stitch and PTGui) is evaluated using the same images of a photogrammetric laboratory full of control points and an outdoor environment by shooting from several stations. In addition to the assessment of the geometrical accuracy, the study also includes important aspects for practical efficiency such as workflow, speed of processing, user-friendliness, or exporting products and formats available. The results of the comparisons show that Agisoft Metashape meets the required geometric specifications with higher quality and has clear advantages in performance if compared to the other two tested programs.

**Key words:** spherical panorama, image-based monitoring, spherical photogrammetry, Panoramic Software, Panoramic Images, Deformation monitoring

#### Resumen:

En los últimos años, la producción de imágenes panorámicas se ha visto impulsada por el uso cada vez mayor de cámaras fotográficas digitales y teléfonos móviles. Sin embargo, deben evaluarse adecuadamente en aplicaciones altamente exigentes como la monitorización de deformaciones a grandes distancias, la precisión y el control de calidad de las imágenes panorámicas y los procesos utilizados para obtener modelos 3D precisos. Por consiguiente, antes de ser aplicadas en proyectos reales, se evalúa la calidad de las imágenes panorámicas esféricas generadas por tres programas informáticos ampliamente utilizados (Agisoft Metashape, GigaPan Stitch y PTGui) utilizando las mismas imágenes de un laboratorio fotogramétrico lleno de puntos de apoyo y del exterior desde varias estaciones. Además de la evaluación de la precisión geométrica, el estudio también incluye aspectos importantes para la eficiencia práctica como es el flujo de trabajo, la velocidad de procesamiento, la facilidad de uso o la exportación de productos y los formatos disponibles. Los resultados de las comparaciones muestran que Agisoft Metashape cumple con las especificaciones geométricas requeridas con mayor calidad y tiene claras ventajas de rendimiento si se compara con los otros dos programas testeados.

**Palabras clave:** panorama esférico, monitorización con imágenes, fotogrametría esférica, software de panorámicas, imágenes panorámicas, monitorización de la deformación

## 1. Introduction

In the last decades, the enhancement of technology and computing power have made panoramic images very popular in applications involving digital cameras or mobile phones. Furthermore, photogrammetry is increasingly used in fields that demands higher levels of accuracy and reliability such as historical documentation of cultural heritage, medical sciences or structural deformation monitoring (Barbero-García *et al.* 2020; Di Stefano *et al.* 2020). However, these demanding applications require the photogrammetric processes to be optimized in terms of efficiency, accuracy and overall cost. Thus, the proper testing and selection of software that is used to build the panoramic images that are subsequently used to obtain accurate 3D models become crucial for engineering or research applications. In this article, we examine the performance and output quality of the panoramic images produced by three widely used programs: Agisoft

Metashape, GigaPan Stitch and PTGui. In particular, the comparison puts a special focus on their ability to produce panoramic images with the necessary accuracy and quality for high-precision photogrammetric tasks.

The technique of image stitching offers the very interesting possibility of obtaining spherical imagery simply by merging a set of planar pictures, taken from the same point and partially overlapping. This system was invented in the 1990s by Apple Computer to improve the poor resolution of the digital cameras available at that time. The advantages of this technique are the low-cost equipment and distortion-free images which do not require the traditional interior orientation that is embedded in the stitching process, while the disadvantages are mainly due to potential alignment errors which could degrade the survey results (Fangi and Nardinocchi 2013).

The main reason for spherical misalignment is the inevitable image distortion created by the direct angular

\* Corresponding Author: Peyman Javadi, [pjavadi@doctor.upv.es](mailto:pjavadi@doctor.upv.es)

protrusion. When it comes to sewing images and forming spherical panoramic images, the speeded-up robust features (SURF) method performs better than other existing methods such as scale-invariant feature transformation (SIFT) which makes matching between planar and spherical panoramic images possible and also facilitate the 2D-to-3D correspondence with LIDAR data (Chuang and Perng 2018).

Alternatively, we can use the oriented fast and rotated BRIEF (ORB) features method for stitching images. In this method, the ORB feature points are extracted by FAST with directional information, described by BRIEF, matched by the Hamming distance, and the RANSAC algorithm is used to remove the mismatched points. The key advantage of the method is that it overcomes the limitations of speed usually found in traditional stitching methods so that it can achieve a high matching performance. Also, solved the scale-invariant on the image stitching (Szeliski 1996; Xiong and Turkowski 1998; Wang *et al.* 2017).

Flexibility and efficiency are two important features for close-range architectural photogrammetry. Spherical photogrammetry (SP) proved to be fast, reliable, and accurate enough. However, an optimal selection of the photo scale with regard to the object distance is crucial for the improvement of efficiency and accuracy. Moreover, the use of narrow-angle (NA) lenses, which are required for distant points, limits the field of view (FOV) of the panorama to a few degrees, thus weakening the geometry if compared to that provided by wide angle (WA) ones. Therefore, a bad estimation of both the focal lens and the location of the station point can spoil the accuracy of the plotting (Fangi 2010).

Spherical photogrammetry can be considered a low-cost technique for three reasons: first, the equipment is reduced to a minimum of three elements: a digital camera, a tripod and a meter; second, there is no need for monumentations; third, the whole process of taking images is fast (Fangi 2015).

Concerning the use of panoramic cameras (e.g. Omni-Camera Panono 360), which would alleviate the need of going through the stitching procedure, they lead to a couple of advantages. First of all, efficiency is clearly improved since stitching images is a time-consuming process. Second, their panoramas are ready to be used, being geometrically more correct than a panorama created with the dedicated software. Therefore, this type of cameras is a preferred solution for architectural heritage, especially for indoor environments. The methodology, however, presents some drawbacks. Usually, the accuracy values of the point cloud may not be acceptable. In fact, even if the residuals from the Ground Control Points (GCP) are admissible for architectural scales of representation, the reprojection error could be quite high, leading to a bit coarse point cloud (Fangi *et al.* 2018).

An additional approach is the use of spherical convolution with a generator that is designed to preserve the fidelity of the panoramic image under the generative adversarial networks (GANs) framework. Meanwhile, a high-resolution panoramic image is generated by only using the sparse sketch map as input. Their approach can be used in several applications. For example, in

communication systems, the transmitted data comprise the sketch map (Duan *et al.* 2020).

In conclusion, the process of building panoramic images is not trivial due to the range of different approaches that can be implemented in the software. Therefore, if the panoramic images are to be used for high-accuracy applications, it is crucial to validate the program used to generate them by using well-controlled sites with conditions as similar as possible to those that are expected in the fieldwork.

In the following section, the indoor lab and the outdoor test field that were used to assess and validate Agisoft Metashape, GigaPan Stitch and PTGui are described.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

A calibration laboratory was prepared by adapting a classroom. This indoor space was equipped with coded targets which were properly installed on the walls, ceiling and floor so as to obtain an optimal geometry for the photogrammetric calibration. Four stations were determined. One station in the centre and three stations approximately in the corners of the classroom. A full-frame Canon 1Ds Mark III camera with a 24mm lens mounted on a GigaPan Stitch rotating motor and a fixed tripod were utilized. A Leica TS-06 Total Station was used to determine the coordinates of all the coded targets and the four stations in the same frame. A sketch of the classroom and the tools used are illustrated in Figures 1 and 2.

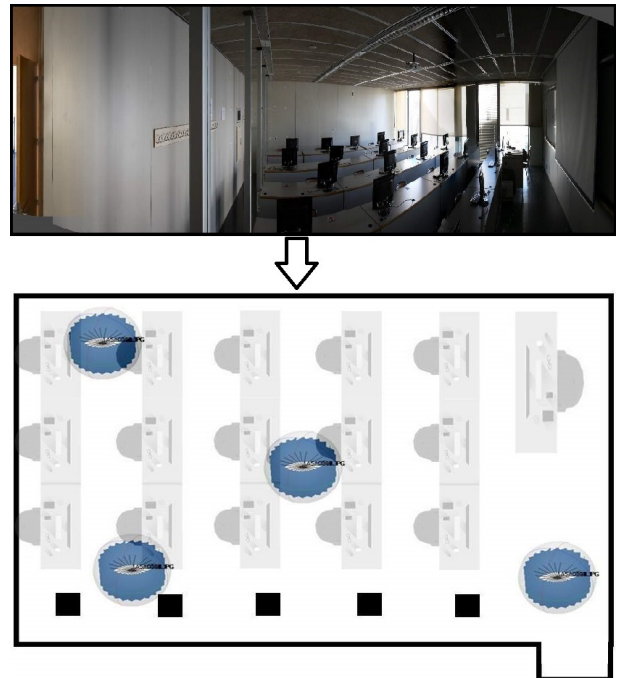


Figure 1: Classroom interior environment for photography.

In the outdoor test field, which is located in the campus of the Universitat Politècnica de València, the camera and Giganpan were set up on the existing pillars. Similarly, to the indoor experiment, four stations were selected to collect the required images for creating the panoramic photographs (Fig. 3).





Figure 2: Tools used for taking the panoramic photography.

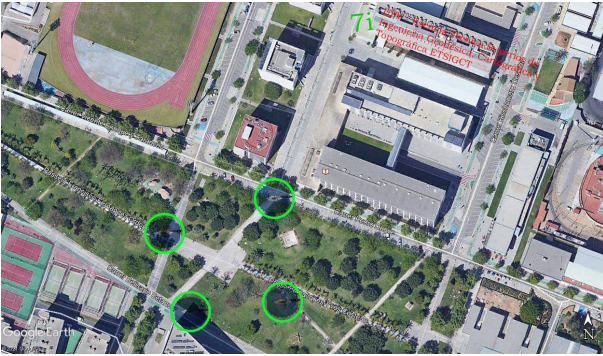


Figure 3: Outdoor environment for photography (UPV campus).

Image processing was performed using three software Agisoft Metashape, GigaPan Stitch and PTGui in the photogrammetry laboratory which will be discussed in the following section.

## 2.2. Method: Creation of Panoramic Images

Since the main objective behind this project is to create spherical panoramic images with high accuracy and good geometry, it is crucial to stitch the images together with high accuracy, which in turn requires correct matching of images and parallax prevention. In this research photography is frame by frame with the correct overlap on several stations with coded targets based on the same

coordinate system and production of spherical panoramic images. To increase the accuracy of the work, 34 points were surveyed from the coded targets with a total station to be used both as control points and to integrate the coordinate system of the stations in the alignment of spherical panoramic images in relation with each other. The aforementioned software was used to create panoramic images. Photography inside the classroom was done around the horizon on several top-down strips. Seven strips were taken in the vertical direction with 60% overlap and twelve photos in the horizontal direction with 60% overlap according to Figure 4.

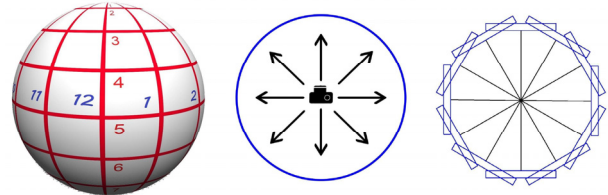


Figure 4: Method and number of photos taken at each station within the classroom.

In terms of software and output quality, if you are shooting with a GigaPan panorama robotic device, a software called GigaPan Stitch is available for stitching images and producing panoramas. This software belongs to the same company. In general, the capabilities and functionality of GigaPan Stitch software were expected to complement its device. The user interface of this software is very simple, but due to the possibility of photography multi-row (or multi-column) panoramas by GigaPan robotic devices, it is possible in GigaPan Stitch software to import and process multi-row panoramas. The remarkable thing about this software is that the quality of the produced panoramic images is reduced and, in some parts, the stitching of consecutive images is not done properly and the image parallax error is seen in parts of the panoramic image (Fig. 5).

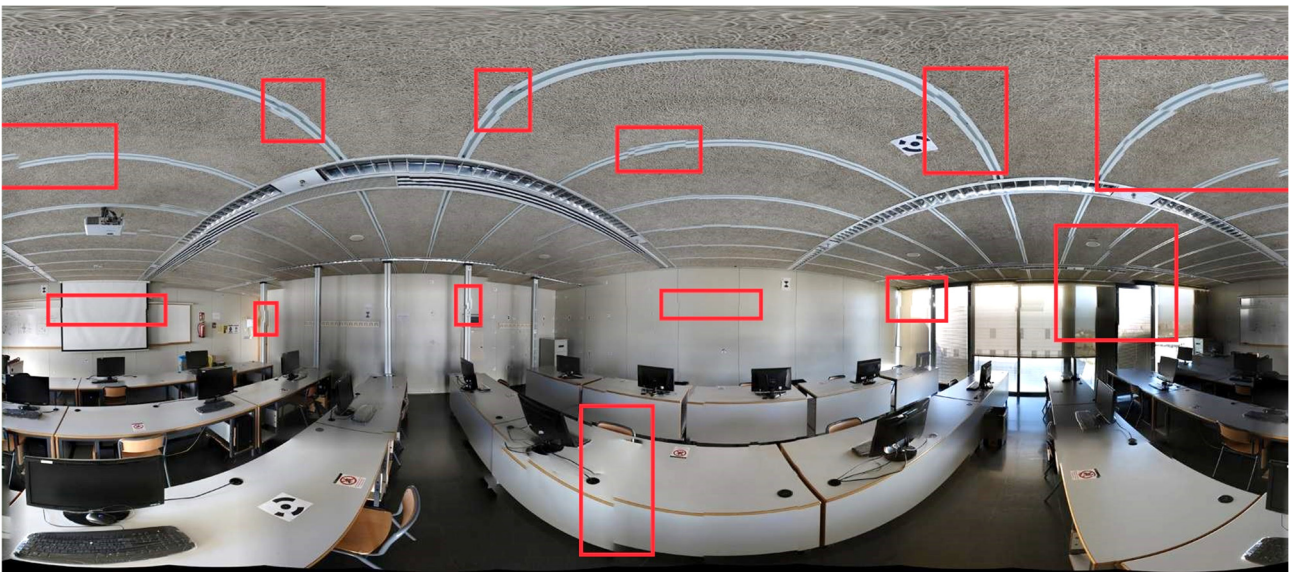


Figure 5: Spherical panoramic image made by GigaPan Stitch software.

In addition to GigaPan Stitch, we used PTGui software. At first glance, it looks like simple software, but it should be

noted that it currently has significant capabilities compared to other software. It offers many options in all



cases of masking out unwanted elements, manually editing control points, straightening horizons and working with multi-row panoramas. If you have taken pictures with multiple exposures, it can be also worked with high dynamic range (HDR) panoramic images, but it should be noted that the artistic and photographic aspects of this software are more than its technical and geometric parts. If you want to have maximum control over your panorama,

it takes a long time to get the best results due to its user interface. Perhaps the most important advantage of this software over GigaPan Stitch geometrically is the ability to insert control points. Also, by entering the control points and adjusting the required items, the discrepancy in some parts of the final panoramic image can be seen in Figure 6.

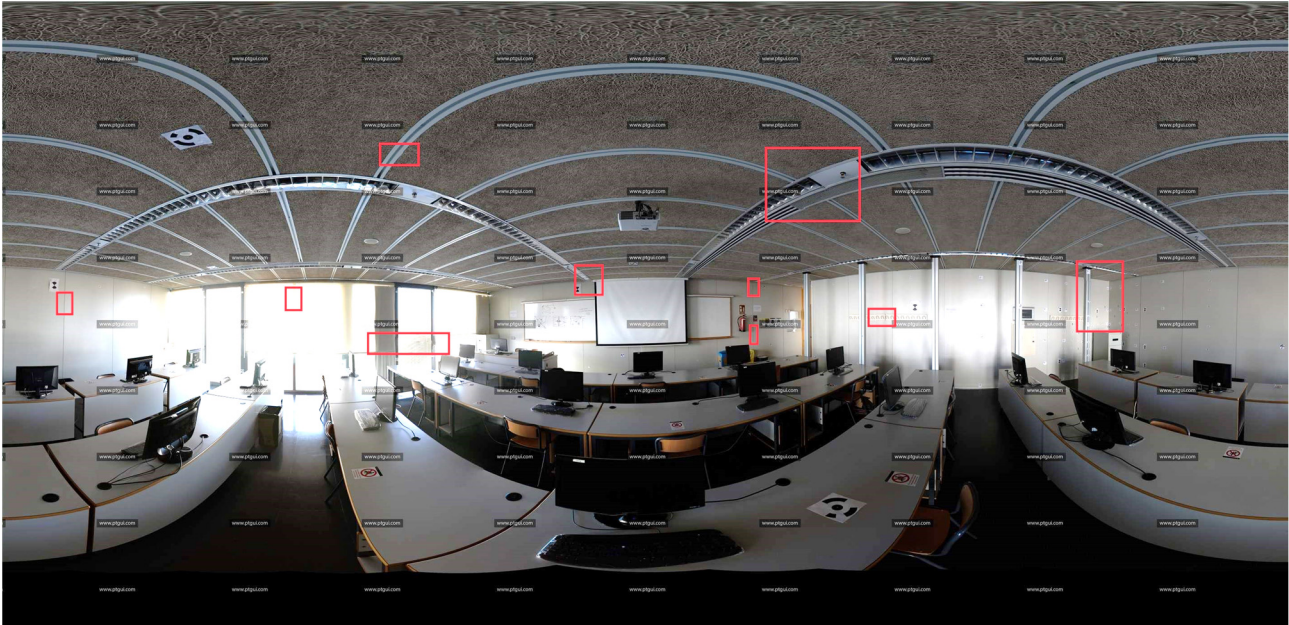


Figure 6: Spherical panoramic image made by PTGui software.

Panoramic images were also produced by using Agisoft Metashape software. This software provides many capabilities to the user, which will be discussed in detail. But again, our goal is to produce high-precision, high-quality panoramic images for use in real and measurable projects. Close-range/long-range triangulation, polygon model generation, coordinate system adjustment, use of more than one camera in project creation and image processing together, creation of cloud points, 3D model production, camera calibration, adding control points, automatic reading of coded targets as well as adding markers manually and some other options are some of its outstanding features. Therefore, after importing the photos into the software and also defining the control points and making the necessary settings, a spherical panorama output was prepared, which was a much more desirable and higher quality result than the obtained with the previous two softwares (Fig. 7).



Figure 7: Spherical panoramic image made by Agisoft

After creating spherical panoramic images in the Agisoft Metashape software, four panorama images obtained from the four stations were entered into the software to orient them to each other. Using markers as well as control points, the panorama images were oriented, as shown in Figure 8.

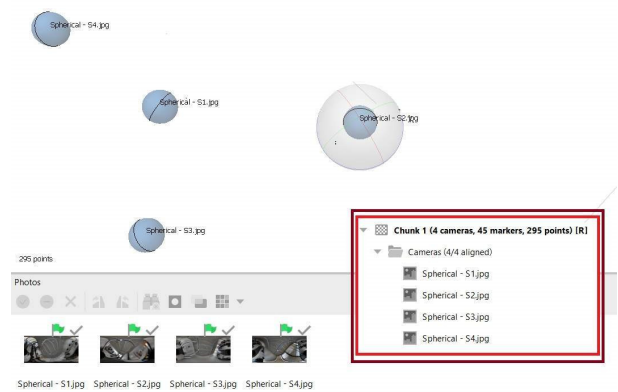
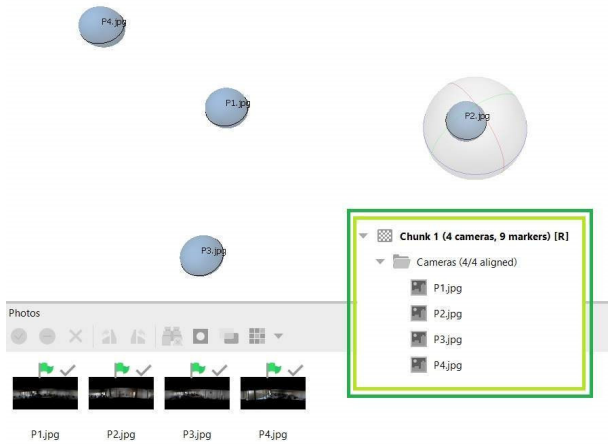


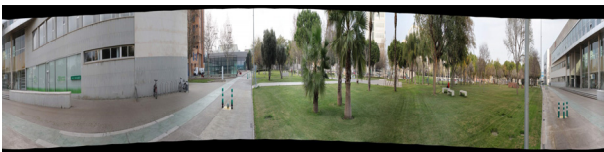
Figure 8: Orientation of four spherical panoramas made by Agisoft Metashape software.

Due to the high quality and accuracy of this software, in addition to the spherical panorama mode, a panorama with one horizontal strip was also made. As in the previous step, one strip panorama was entered into software for each station and oriented to each other using control points and markers, which can be seen in Figure 9.

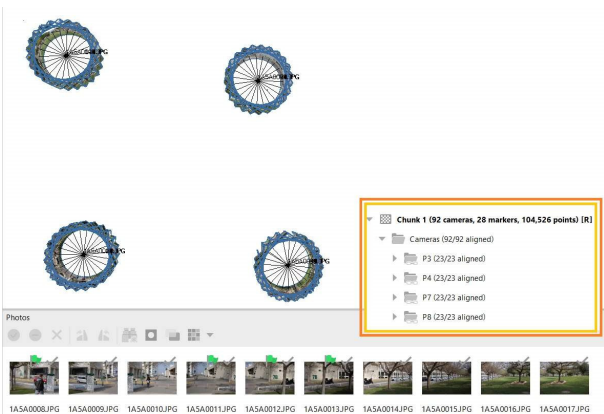


**Figure 9:** Orientation of four one strip panoramas made by Agisoft Metashape software relative to each other.

Due to the good quality obtained in the production of panorama images from Agisoft Metashape software, panoramic images of the UPV campus in the area previously shown in Figure 3 were produced only with this software (Fig. 10). Photography on the campus was done with only one strip around the horizon and on four fixed pillars. The photos were entered into the software as frames and the images of each station were aligned to each other (Fig. 11).



**Figure 10:** Panoramic image made by Agisoft Metashape software from UPV campus.

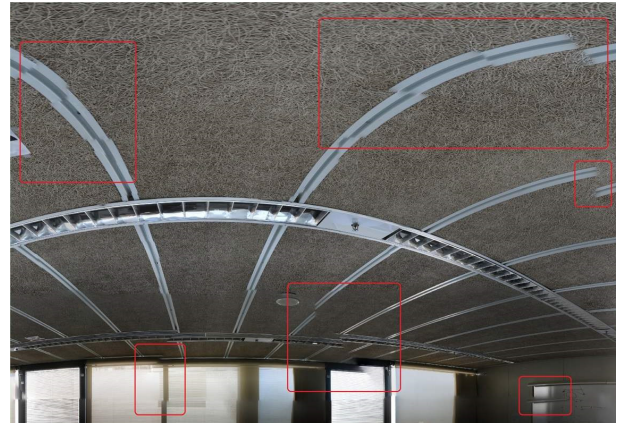


**Figure 11:** Orientation of four one strip panoramas made by Agisoft Metashape software relative to each other from UPV campus.

### 3. Results

The results of making panoramic images using three different programs are reported next. Given that their results are comparable and the difference obtained can be considered significant. GigaPan Stitch software had a lot of parallax error in the images, which caused several breaks in the image, and this caused problems in the later stages of using panoramic images due to lack of proper

quality. The lack of acceptable quality in the produced images can be seen in Figure 12. Unfortunately, in this software, it is not possible to check the geometric accuracy of the work numerically.



**Figure 12:** A cropped part of a spherical panoramic image made by GigaPan Stitch software and the images do not match correctly in the final output.

In the output obtained with PTGui software, the image quality was acceptable, but unfortunately, in some areas, minor fractures can be seen in the panoramic image. These fractures are unpredictable or uncontrollable. Therefore, this fracture may occur in areas where we intend to examine or measure, and the work may be difficult. Of course, in the comparison study, the common points that this software has chosen are correct and acceptable in some cases.



**Figure 13:** A cropped part of a spherical panoramic image made by PTGui software and the images do not match correctly in the final output.

Nevertheless, similar mismatches are not present in the Agisoft Metashape output. As it can be seen in Figure 14, both the quality and accuracy of the output panorama in Agisoft Metashape software can be considered good.

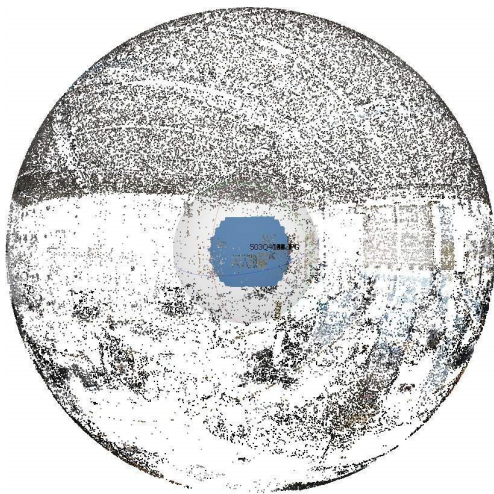
Then, considering the acceptable result obtained from the image quality of the spherical panorama, we decided to align the four spherical panoramas relative to each other. Due to the ability to automatically read coded targets by Agisoft Metashape software as well as automatic and manual matching, the next step is to reach the point cloud and the 3D model using these panoramic images. An



example of low-density point cloud for one station inside the classroom is shown in Figure 15.



**Figure 14:** A cropped part of a spherical panoramic image made by Agisoft Metashape software.



**Figure 15:** View of the formation of low-density points in the production of spherical panoramas after the alignment of images of a station.

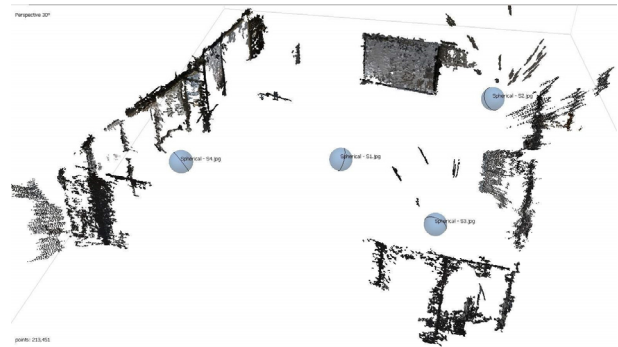
The geometric accuracy achieved with the spherical panoramic images and information about the dense point cloud data is reflected in Tables 1, 2 and Figure 16.

**Table 1:** Data about the orientation of the four spherical panoramic images in the classroom.

<i>Data</i>	<i>Number</i>
Camera	4
Marker	45
Reference Points	15
Control Points	14
Check Points	31
Tie Points	295
Dense Points	213.451

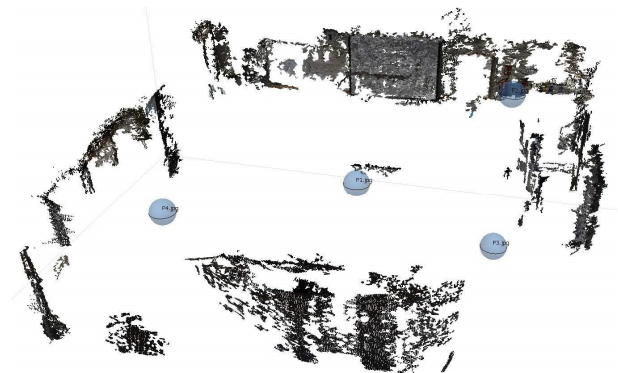
**Table 2:** Accuracy obtained in the orientation of the four spherical panoramic images in the classroom.

<i>Points</i>	<i>Error (m)</i>	<i>Error (pix)</i>
Control Points	0.026	11.64
Check Points	0.089	29.24



**Figure 16:** Dense point cloud produced after the orientation of the four spherical panoramas.

You can also see the geometric accuracy of the orientation of the panorama images in one horizontal strip and creating a dense cloud of points in Figure 17 and Tables 3 and 4.



**Figure 17:** Dense point cloud generated by the orientation of the four panorama images in one horizontal strip.

**Table 3:** Data about the orientation of the four panoramic images in one horizontal strip in the classroom.

<i>Data</i>	<i>Number</i>
Camera	4
Marker	9
Reference Points	6
Control Points	5
Check Points	4
Tie Points	443
Dense Points	129.707

**Table 4:** Accuracy obtained in the orientation of the four panoramic images in one horizontal strip in the classroom.

<i>Points</i>	<i>Error (m)</i>	<i>Error (pix)</i>
Control Points	0.009	2.72
Check Points	0.001	4.10

Considering the relatively long distance of the pillars from each other, the geometric accuracy obtained from the panorama images of the campus can be seen in Tables 5 and 6.

**Table 5:** Data about the orientation of four panoramic images in one horizontal strip in the campus

<i>Data</i>	<i>Number</i>
Camera	92
Marker	28
Reference Points	28
Control Points	7
Check Points	21
Tie Points	104526

**Table 6:** Template

<i>Points</i>	<i>Error (m)</i>	<i>Error (pix)</i>
Control Points	0.039	5.33
Check Points	0.067	0.86

#### 4. Discussion

Various factors are involved in the geometric accuracy and quality of the images produced. There are some effective factors ranging from the conditions of the camera to the conditions of the environment. In panoramic photography, on the one hand, the selection of the appropriate camera and lens, and on the other hand, the selection of reliable software for stitching images are crucial in the accuracy and quality of the output images. As it is clear in the results, the accuracy of spherical panoramic images is very acceptable and if we do panoramic photography in one strip, its accuracy can be in the millimetre range. A key point is not to produce super and coherent point clouds when the object textures are not remarkable, which was the case of the indoor lab where the texture of walls, windows (glass), and the ceiling was rather simple and homogeneous. Thus, it turned out more effective to orient the images relative to each other and produce a 3D model than creating the 360° panoramic image. Therefore, the framed images were eventually converted into spherical panoramas, then they were oriented relative to each other to yield the reported accuracy.

According to the results obtained from the software, it can be stated that Agisoft Metashape software can be considered a powerful and suitable software for producing panoramic images and model building. The main limitation seen in GigaPan Stitch is the impossibility of adding control points from a file or manually, as well as the possibility of manual matching. There also appeared problems working with PTGui software, such as the inability to check the geometric accuracy of the project. This software has higher facilities and accuracy than GigaPan Stitch software. The major items of the three softwares analysed are included in Table 7.

**Table 7:** Comparison of Agisoft Metashape, GigaPan Stitch and PTGui software.

<i>Setting</i>	<i>Agisoft</i>	<i>PYGui</i>	<i>GigaPan</i>
Import Formats	High	Low	Low
Export Formats	High	Low	Low
Export Raster Images	Yes	Yes	Yes
Export Technical Data (camera, marker,...)	Yes	No	No
Camera Calibration	Yes	No	Yes
Exposure correction	Yes	No	Yes
White balance correction	Yes	No	Yes
Panorama leveling	Yes	No	Yes
Lens distortion correcting	Yes	Yes	Yes
Partial or full (spherical) panoramas or images from panoramic cameras	Yes	Yes	Yes
Different focal lengths in a single panorama	Yes	No	Yes
Different lens types in single panorama	Yes	No	Yes
Generate Report	Yes	No	No
Accuracy and Errors Show	Yes	No	No
Set Station	Yes	No	No
Create 3D Model	Yes	No	No
Workflow	Good	Poor	Normal
User Friendly	Good	Poor	Poor
Processing Speed/Time	Normal	Good	Poor

#### 5. Conclusions

Taking into account that the aim of this research was the selection of reliable software for accurate and quality construction of spherical panoramic images and the subsequent use of these images for deformation monitoring, the correct evaluation of the tested software used is important for assessing different aspects such as image quality, workflow, processing speed, user-friendliness, or output of products/formats, all of them critical to the practical productivity of real projects. The results of the comparison show that Agisoft Metashape software meets the required geometric specifications with higher quality and has clear performance advantages compared to the other two tested programs. Also, considering the inappropriate texture of the environment inside the classroom, achieving 1 mm error using a single-strip panorama and less than 7 cm can be considered acceptable for a spherical panorama. It is suggested to use this technique in future works, covering more targets in the upper and lower parts of the shooting area in order to achieve a better orientation with higher geometric accuracy.

#### References

BARBERO-GARCÍA, I., LERMA, J. L. and MORA-NAVARRO, G., 2020. Fully automatic smartphone-based photogrammetric 3D modelling of infant's heads for cranial deformation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **166**, pp. 268–277. DOI: 10.1016/j.isprs.2020.06.013

- CHUANG, T. Y. and PERNG, N. H., 2018. Rectified feature matching for spherical panoramic images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **84**(1), pp. 25-32(8). DOI: 10.14358/PERS.84.1.25
- DI STEFANO, F., CABRELLES, M., GARCÍA-ASENJO, L., LERMA, J. L., MALINVERNI, E. S., BASELGA, S., GARRIGUES, P. and PIERDICCA, R., 2020. Evaluation of Long-Range Mobile Mapping System (MMS) and Close-Range Photogrammetry for Deformation Monitoring. A Case Study of Cortes de Pallás in Valencia (Spain). *Applied Sciences*, **10**(19), 6831. DOI: 10.3390/app10196831
- DUAN, Y., HAN, C., TAO, X., GENG, B., DU, Y., and LU, J., 2020. Panoramic Image Generation: From 2-D Sketch to Spherical Image. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **14**(1), pp. 194-208. DOI: 10.1109/jstsp.2020.2968772
- FANGI, G., 2010. Multiscale multiresolution spherical photogrammetry with long focal lenses for architectural surveys. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38**(Part 5), pp. 1-6.
- FANGI, G., 2015. Documentation of some cultural heritage emergencies in Syria in August 2010 by spherical photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **2**(5), 401. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W3-401-2015
- FANGI, G., PIERDICCA, R., STURARI, M., and MALINVERNI, E. S., 2018. Improving spherical photogrammetry using 360° omni-cameras: use cases and new applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **42**(2). DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-331-2018
- FANGI, G. and NARDINOCCHI, C., 2013. Photogrammetric processing of spherical panoramas. *Photogrammetric Record*, **28**(143), pp. 293–311. DOI: 10.1111/phor.12031
- SZELISKI, R., 1996. Video mosaics for virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **16**(2), pp. 22–30. DOI: 10.1109/38.486677
- WANG, M., NIU, S. and YANG, X., 2017. A novel panoramic image stitching algorithm based on ORB. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation: Applied System Innovation for Modern Technology, ICASI 2017*, pp. 818–821. DOI: 10.1109/ICASI.2017.7988559
- XIONG, Y. and TURKOWSKI, K., 1998. Registration, calibration and blending in creating high quality panoramas. In *Proceedings - 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, WACV 1998*, pp. 69–74. DOI: 10.1109/ACV.1998.732860



## APPLICATION OF IMPROVED ACCURACY SFM-MVS FOR PHOTOGRAMMETRIC RESTITUTION AND COMPARISON OF PRE- AND POST-ERUPTION ARCHIVAL AERIAL IMAGERY ON DECEPTION ISLAND (SOUTH SHETLAND, ANTARCTICA)

### APLICACIÓN DE SFM-MVS CON PRECISIÓN MEJORADA PARA LA RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA Y COMPARACION DE LAS IMÁGENES AÉREAS DE ARCHIVO PRE Y POST ERUPCIÓN EN ISLA DECEPCIÓN (SHETLAND DEL SUR, ANTÁRTIDA)

Carlos Paredes<sup>a,\*</sup>, Rogelio de la Vega-Panizo<sup>a</sup>, Miguel Ángel Roperó<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Department Geological & Mining Engineering, E.T.S.I. de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, Spain. [carlos.paredes@upm.es](mailto:carlos.paredes@upm.es); [rogelio.delavega@upm.es](mailto:rogelio.delavega@upm.es); [miguelangel.ropero@alumnos.upm.es](mailto:miguelangel.ropero@alumnos.upm.es)

<sup>b</sup> Escuela Politécnica Superior del Ejército, Ministerio de Defensa, C/ Joaquín Costa 6, 28002 Madrid, Spain. [mropaza@et.mde.es](mailto:mropaza@et.mde.es)

#### Abstract:

Despite today's extensive remote sensing imagery with all kinds of sensors, the use of old aerial imagery is still important in the study of slowly evolving land processes to reconstruct past landscape forms. Numerous organisations share photogrammetric data in public repositories, offering opportunities to exploit them to identify historical, natural and anthropogenic topographic changes, which is particularly interesting if they are difficult to access areas, possibly affected since historic times by climate change and other geodynamic processes. This work proposes and applies a workflow based on the SfM-MVS photogrammetric technique to 22 and 33 historical aerial photographs of the English FIDASE (1956/57) and Argentinean Navy (1968) flights, scanned at 1016dpi and 96dpi, black and white, of Deception Island (South Shetland, Antarctica). The photogrammetric processing controls the threshold values of the reconstruction uncertainties and projection accuracy. The 3D point clouds obtained are georeferenced with 37 ground control points (GCP) geographically positioned in a QuickBird2 satellite image over island areas not affected by volcanism. The quality of the DTM is controlled by comparison with the 1960 topographic map 1:25000 of the island, which allows the volumes of material emitted in the volcanic eruption of 1967 to be evaluated. The results obtained improve considerably and extend the set of results compared to those obtained by classical contour line digitizing. The applied method, the DTM and orthomosaic of 1956 and 1968 presented will allow us to evaluate, together with the analysis applied to later historical flights, English 1979 and Chilean 1986, the recent changes produced by the recent volcanism, the local external geodynamics, the possible climatic deterioration and the scope of current human activity from 1956 to the present day.

**Key words:** Deception Island, photogrammetry, structure from motion, archival imaging, volcano, digital elevation model

#### Resumen:

A pesar de la actualmente minuciosa toma de imágenes con sensores de todo tipo, la utilización de antiguas imágenes aéreas sigue siendo importante en el estudio de procesos del terreno de evolución lenta para reconstruir las formas pasadas del paisaje. Numerosas administraciones comparten los datos fotogramétricos en depósitos públicos, ofreciendo oportunidades para explotarlos y detectar cambios topográficos históricos naturales y antropogénicos, lo cual resulta ser de mayor interés si son zonas de difícil acceso, posiblemente afectadas desde tiempos pretéritos por el cambio climático y otros procesos geodinámicos. Este trabajo, propone y aplica un flujo de trabajo basado en la técnica fotogramétrica SfM-MVS a 22 y 33 fotos aéreas históricas de los vuelos inglés FIDASE (1956/57) y de la Armada Argentina (1968), escaneadas a 1016ppp y 96ppp, en blanco y negro, de la Isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida). El procesado fotogramétrico controla los valores umbral de las incertidumbres de la reconstrucción y precisiones de proyección. Las nubes de puntos 3D obtenidas son georreferenciadas con 37 puntos de control terrestre (GCP) geográficamente posicionados en una imagen QuickBird2 sobre zonas no afectadas por vulcanismo. La calidad de los MDE se controla comparándolo con el mapa topográfico 1:25000 de la Isla lo que permite evaluar los volúmenes de material emitido en la erupción volcánica de 1967. Los resultados obtenidos mejoran notablemente y extienden el conjunto de resultados frente los obtenidos por digitalización clásica de las curvas de nivel. El método aplicado, los MDE y ortomosaico de 1956 y 1968 presentados permitirán evaluar, junto con el análisis aplicado a vuelos históricos posteriores, inglés de 1979 y chileno de 1986, los cambios recientes producidos por el vulcanismo reciente, la geodinámica externa local, el posible deterioro climático y ámbito de afección de la actividad humana actual desde 1956 hasta la actualidad.

**Palabras clave:** Isla Decepción, fotogrametría, structure from motion, imágenes históricas, volcán, modelo digital elevaciones

\* Corresponding Author: Carlos Paredes, [carlos.paredes@upm.es](mailto:carlos.paredes@upm.es)

## 1. Introduction

The Spanish Army Antarctic Base "Gabriel de Castilla" (BGdC) is located on Deception Island (South Shetland Islands, Antarctic Peninsula, Antarctica). The uniqueness of its location responds to the special scientific interest it arouses from multiple fields of knowledge (Baker *et al.* 1975). The fact that man has established a temporary settlement on the island and its interaction with the natural environment, the scene of multiple geo-hydrodynamic processes that pose a certain hazard, opens up the possibility of other problems of particular relevance. Its studies, conclusions, and recommendations give rise to reflections on the most appropriate way in which human activity should be carried out in these latitudes in a sustained manner, mitigating the effects of the same (LIE-Ropero 2015). Deception Island is the most active volcano in the South Shetland Islands and has been the site of more than twenty identified eruptions in the last two centuries (Berrocoso *et al.* 2012). Recent eruptions (1967, 1969, and 1970) have demonstrated that the island can become a significant potential hazard to tourists (over 30 000 visits in the austral summer), scientists, and military personnel on and around the island (Fig. 1). In addition, each volcanic event has caused significant uplift or subsidence, ground displacement or infilling of deposits, and changes in the island's relief and coastline.



(a)



(b)

**Figure 1:** View of Yelcho Island (a) formed after the December 1967 eruption and joined to Deception Island (b) after the August 1970 eruption to form the current landscape.

Since the beginning of the 20th century, aerial photo techniques and photogrammetry have been used in earth sciences to remotely define characteristics and geometric properties of objects from photographs. Currently, modern techniques of image analysis and machine learning, developed in the field of 3D artificial vision (Ullman 1979; Hartley and Zisserman 2004), have been applied to UAV flight photogrammetry such as SfM-MVS (structure from motion - multiview stereo) methodology, multiplying the processing capacity, beyond the stereoscopic pair, to the massive use of images of different origin and quality, obtaining results comparable to LIDAR. Its versatility makes it possible that many of the archived historical flights, an important reference record, especially in sparsely populated or very difficult to access areas, such as the Arctic or Antarctica, subject to geological or anthropogenic climate changes, can be scanned, reviewed and re-analysed with SfM-MVS.

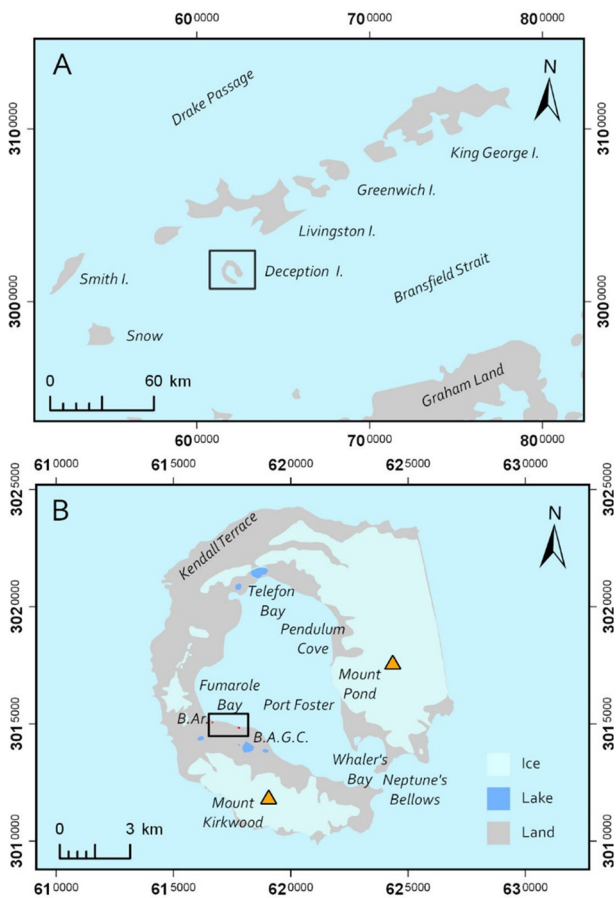
The historical record of changes on Deception Island has made it possible to quantify them using classical methods of digitizing and interpolation of existing cartography (Berrocoso *et al.* 2012; Torrecillas *et al.* 2012). However, these approximations are strongly conditioned by the resolution, quality, and historical processing methods of the available topographic data. This paper proposes a standard procedure for SfM-MVS restitution of historical flights, with uncertainty control and georeferencing to terrain, as an alternative to classical stereo photogrammetric techniques when camera data or images are incomplete or missing, which is common in old imagery of remote places, to obtain a DTM and an orthoimage. The derived products will make it possible to quantify in detail, and with less error than the data currently available, the variations of the terrain, providing qualitative historical information on the geomorphological evolution of the surface of Deception Island.

## 2. Study area: the Deception Island

Deception Island is the southernmost island of the South Shetland Archipelago in the South Atlantic. It lies between latitudes 62°53'30" S and 63°01'20" S, and longitudes 60°29'20" W and 60°45'10" W, in the Bransfield Strait, approximately 25 km south of Livingston Island, 100 km north of the Antarctic Peninsula, and about 1000 km from Tierra del Fuego, at the southern tip of the South American continent (Fig. 2a). It is a horseshoe-shaped island, with an outer perimeter of approximately 18 km in diameter. Today, the overall appearance of the island is strongly influenced by the collapse of the volcanic caldera at its centre (about 8.300 - 3.980 y) as well as by the latest volcanic eruptions that have occurred since the 18th century. The inner coast, accessed by crossing Neptune's Bellows Pass to the south, is called Port Foster. An almost complete ring of post-caldera volcanic edifices, hills, and mountains surrounds this inner bay (Fig. 2b).

The remnants of the collapsed volcanic complex are covered by glaciers and reach 539 m a.s.l. at Mount Pond and 452 m a.s.l. at Mount Kirkwood. To date, more than 20 explosive monogenetic eruptive events have been identified over the last two centuries. Throughout these events, several cinder cones and volcanic edifices have developed, such as Crimson Hill (between 1825 and 1829) and Kroner Lake (between 1829 and 1912) and the 1967, 1969 and 1970 eruptions, which are the most recent landscape modifications. Today, the island is home

to the Argentinean Antarctic Base Decepción and the BGdC, whose activity is restricted to the southern summer (Fig. 2b). Even today, geothermal and seismic activity persists, as well as other active geomorphological processes (Baker *et al.* 1975; LIE-Ropero 2015).



**Figure 2:** Geographical location of Deception Island (a) in the South Shetland Islands Archipelago and (b) the island toponyms used in the text. In the inset, the area in which the Argentine Deception and Spanish BGdC bases are located.

### 3. Satellite, archive aerial imaging and maps datasets

Three main sources of spatial data covering the study area were used to carry out this work. Aerial images set taken during the 1955/56 and 1956/57 campaigns of the FIDASE project. Aerial images set taken by the Argentinean Navy in 1968 (after the 1967 eruption). And a topographic map 1:25000 produced by the Directorate of Overseas Surveys in 1960, resulting from the photogrammetric restitution work of the FIDASE flights. In addition, the satellite QuickBird2 (QB2) multispectral image was acquired in 2003 (Table 1).

The Falkland Islands Dependencies Aerial Survey Expedition (FIDASE) acquired in 1956-1957 the first systematic vertical aerial photography and ground survey for photogrammetry for the north-western part of the Antarctic Peninsula (Mott 1986), covering an area of about 15,000 km<sup>2</sup>, between 62° and 68° S latitude, and using as a base and port, for the ships and two Canso hydroplanes of Hunting Aerosurveys Ltd., the harbour at Whalers Bay in Port Foster. The photography was taken at a customary altitude of approximately 13,500 feet and

was planned for photogrammetric mapping with 60% overlap and 30% sideslip with a Williamson Eagle IX f=152mm camera, with the Ross 6" lens on a 9" format negative. Stop F.11 was used throughout with a normal exposure time of 1/200 second, although in the latter part of the season this was increased to just 1/50 second. The entire mission was conducted on Ilford Hyperpan film using a blue negative filter (comparable to the Wratten G). The available FIDASE expedition photographs of Deception Island are spread over two passes of 31 and 22 images, taken at 3962 m, 1:26000 and 4390 m, 1:28800 respectively and were supported by 8 astronomically triangulated surface points and supported by the nearby islands of the Shetland Archipelago. The 1016 ppp images (10002x10002 px) from both flights are available and documented on the USGS earthexplorer website. Post-processing of the FIDASE expedition flights enabled the mapping of many previously unexplored or inaccessible areas around the Antarctic Peninsula to be produced stereo-photogrammetrically.

**Table 1:** Characteristics of image acquisition flights.

Flight survey data	FIDASE Hunting UK 1956	Argentinean Army 1968
Flying altitude	5 650 m	4 650 m
Scale	1: 28 800	1: 30 000
Camera model	Williamson Eagle IX	K-17 6"
Focal length	152 mm	152.4 mm
Coverage area	274 km <sup>2</sup>	244 km <sup>2</sup>
Scan resolution	9761x9868	5400x5400
Av.ground res.	0.773 m/px	1.21 m/px
No. photo scanned	22	33
No. of flight tracks	3	4

During the Antarctic campaign in the summer of 1947/48, the Argentine Navy, with the presence of five ships, inaugurated the Caleta Péndulo refuge in Puerto Foster (Nov. 1947) and the Destacamento Naval Decepción (Jan. 1948) in Fumarolas Bay, repaired and installed a series of beacons (Grumete and unnamed) and carried out an unavailable aerophotogrammetric survey of the island. After the eruption of December 1967, on 21 January 1968, the Argentine Navy conducted a reconnaissance flight to support the analysis of the changes produced on the island after the eruption. The flight was scheduled at an average altitude of 4500 m with a shooting scale of 1:30000 and a longitudinal overlap of 60% and a lateral overlap of less than 20%. The 33 images were taken with a K17 camera of 6" focal length (152.4 mm) distributed in four passes, three N-S, two with 9 overlapping, and one with 8 photos, and one NW-SE, with seven photos, which were scanned non-photogrammetrically at a size of 5400x5400 px at 96 dpi. No additional information is available on the photos or on the camera calibration parameters.

The topographic map of Deception Island, Falkland Islands Dependencies, South Shetland Islands, Directorate of Overseas Surveys (1960) sheet D.O.S. 310, is a product obtained from the FIDASE flight. It is a printed version map 2,250/8/60/6175/O.S., scale of 1:25000, altimetry in feet with a separation of 50 feet between contour lines, and in Lambert Conic



Orthomorphic projection, 70° South latitude from the origin, where the scale factor is 0.9931 and the Clarke 1880 spheroid. Although in 1957, Hunting Aerosurveys Ltd. established eight survey points on Deception Island for the production of the island map, none of them are in suitable locations to orient the stereoscopic models covering the area mapped in this work. The 18 astronomical survey points established (Hydrographic Department Admiralty 1949) are also unusable because they are either lost, unidentifiable or not in a suitable location.

Due to the lack of ground control points in both flights, a multispectral image from the QuickBird 2 DigitalGlobe satellite (Fig. 1c) of 21 January 2003, with no cloud cover over the island, at an average resolution of 0.68 m/px and with an orientation of 14.6° off-nadir angle and a solar height of 37.9° in the east, has been taken as a real ground reference. In this image, 37 ground control points (GCP), with their planimetric coordinates in WGS 84 / UTM zone 20S (EPSG::32720), have been taken at permanent locations (Fig. 3): rocky promontories on the coast and inland, with an estimated error of 0.68 m.

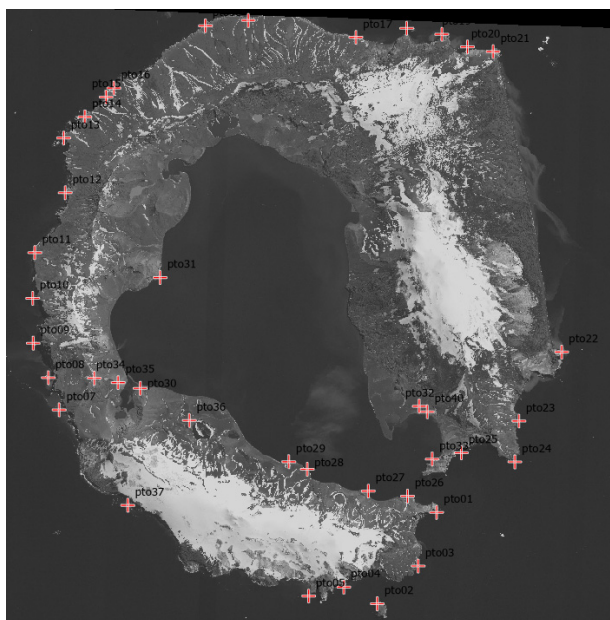


Figure 3: Geographical distribution of the 37 GCP + on Deception Island QB2 image.

These points must be detectable in the images of the 1956 and 1968 flights and in the QB2 image, and their position must not be affected planimetrically or altimetrically by the volcanism of the island to date. Finally, the map D.O.S. (1960) has been scanned at 300 dpi, 24 bits, reprojected to UTM WGS84, geometrically readjusted with a 2nd order polynomial transformation and georeferenced to the QB2 satellite image taken as ground reality.

#### 4. Workflow methodology

The aim of this work is to obtain a series of digital products from historical images with sufficient quality for the identification of geomorphological processes active at the time, and the quantitative treatment of their geospatial information. To this purpose, a photogrammetric restitution scheme of the images has been established,

which can be summarised as follows. a) Scanned images pre-processing to identify and discard those of poor quality, adjust sharpness, locate their centres and the GCPs. b) SfM camera orientation processing, optimisation of camera parameters, considering the reduction of reconstruction uncertainty, reprojection error, and improving projection accuracy, to obtain the 3D sparse point cloud (3DSPC). c) SfM-MVS with the 3DSPC georeferenced to the GCPs to obtain the 3D dense point cloud (3DDPC) and depth maps. After this error minimisation processing, the triangulation irregular network (TIN), the DTM, and the orthomosaic of the images are obtained. Finally, d) the quality of the products is evaluated by comparing the global location errors of the images, the GCP, planimetry, and altimetry of the 1:25000 map of 1960, with the coastline and rocky outcrops of the QB2 image unaffected by the eruptions. Some recent works (USGS James 2017; Mayer *et al.* 2018; Girod *et al.* 2018; Riquelme *et al.* 2019, among others) present a sequential workflow that attempts to standardise the process on Agisoft Metashape even for historical image processing, however, the authors present differences in the guidelines and the results they show do not establish or value a quantitative quality criterion for the final products (Singh and Fraizer 2018). Therefore, this work incorporates an improvement (Fig. 4) of the 3DSPC to be used for the MVS algorithm and to obtain the 3DDPC, gradually selecting the points with the worst estimation in terms of different projection errors, optimising sequentially each improvement.

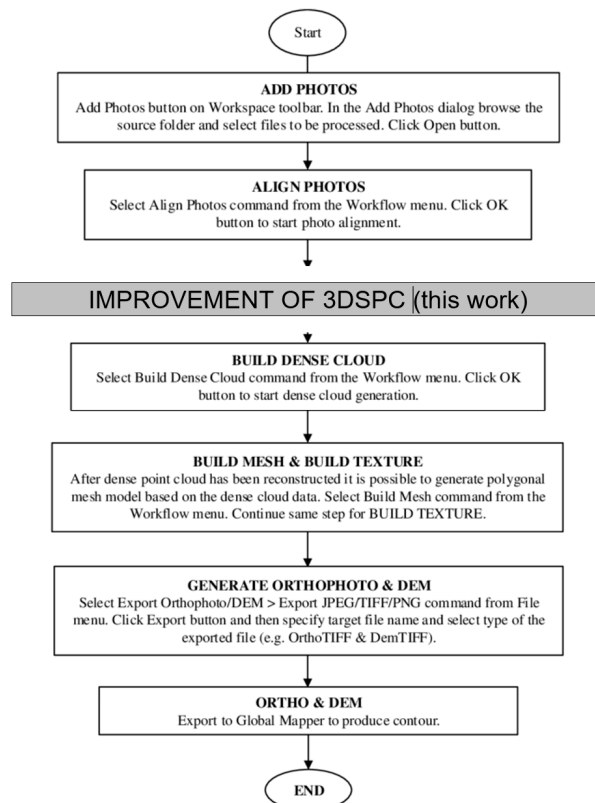


Figure 4: Standard SfM-MVS flowchart for aerial image processing with the contribution of this work.

Nowadays, there is a wide range of software applications that implement SfM-MVS techniques (Metashape, Pix4D, Photomodeler Scanner, OpenDroneMap, etc.), in this work Metashape 1.6.5. from Agisoft LLC is used as it

enables full restitution processing with operator intervention and control, and uses cameras and images with very little metadata.

#### 4.1. Pre-processing, orientation and alignment

The stereographic restitution process is strongly conditioned by the quality and orientation of the images taken over the object or area of interest. The contrast, brightness, and sharpness conditions should be as close as possible to the shape, and width of the histogram: uniform, without change by zones, and full band. Therefore, the first step is to check the quality of the images, discard those with clouds covering the areas of interest, readjust their histogram if necessary, and apply reject masks for areas of no interest (sea, clouds...) or difficult to link stereo pairs.

The alignment of the photos is then performed by SfM, discarding the position of the GCPs. The procedure automatically detects the tie points (TP) by coincidence of images, matching in which each TP appears, obtaining the 3DSPC, returning the parameters of interior and exterior orientation of all images, the systematic compensation of errors and distortions of the camera lenses. The orientation of the cameras through the adjustment of the 8 parameters  $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ , considers that, during the flight, there were oscillations in the shots of up to  $10^\circ$  due to the wind streams that hit the aeroplane, which could also generate a rolling shutter effect (Mott 1986).

#### 4.2. Error reduction over 3DSPC

Possible non-linear deformations from the former pre-processing can be eliminated by optimising the camera parameters on the basis of the known reference coordinates of the photos. For this purpose, the coordinates of the 3DSPC points and the camera parameters are adjusted by minimising the sum of the reprojection errors and the misalignment error of the reference coordinates. To achieve better results, a maximum of 10% to 20% of the misallocated 3DSPC points are removed and the camera parameters ( $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ) are re-optimised iteratively, until the reconstruction uncertainty  $RU < 10$ . This process is carried out in an analogous way to achieve a projection accuracy  $PA < 3 - 10$ . Thus, the less reliable joint points with poor 3D point determination relative to the strongest ones are eliminated. Throughout the optimisation process, in addition to controlling the number of points that are eliminated due to poor estimation, we try to reduce the mean square error of the image localisation RMSE, maintain a high number of projections on these (above 120) and reduce the values of the covariance of the points of the 3DSPC.

After several iterations (usually less than 10), and obtaining a value close to 1.0 for the standard error of unit weight (SEUW) in the optimization process, the orientations, and camera parameters ( $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) are re-computed restricted to the accuracy of the tie points. The tie point accuracy parameter depends on the image quality, as the tie point positions are estimated based on the significant features encountered in the images. If the images are sharp, the tie points are located accurately and the default value of

1.0 pixels may represent too small a weight. Precision values and weights work inversely: the higher the precision, the higher the weight. A precision of about 0.5 pixels is more realistic for identifying features well recognisable by a human operator in flight imagery.

#### 4.3. Dense geo-referenced photogrammetric processing

To georeference the 3DSPC, when accurate navigation and location data are not available for many images, a feasible but appropriate number and spatial distribution of GCPs must be chosen. In this work, the block of aerial images oriented in the previous step is georeferenced using the 37 GCPs that have been identified in QB2 and that have been located on each of the photographs. In this step, the set of images and the 3DSPC are reprojected to the ground truth.

Next, the orientations and the 13 camera parameters ( $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) are re-optimised conditional on the location of the 37 GCPs and a SEUW close to 1.0 is achieved. Finally, points with large residuals are selected in the georeferenced 3DSPC according to their reprojection error (RE), given in pixel units, which indicates poor 3D point determination of the corresponding point projections, as well as erroneously coincident points. Following an iterative process, a maximum of 10% to 20% of the 3DSPC points with a high reprojection error are removed and the camera parameters ( $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ) are re-optimised iteratively, until the reprojection error  $RE < 1$  px. The RE parameter has a more direct influence on the RMSE of the control points and can significantly improve the orientation parameters.

#### 4.4. Quality control assessment

The use of photogrammetry, in its analogue beginnings, to obtain a cartographic representation of topography, used stereographic pairs of images taken in aerial missions that had to be meticulously programmed and carried out if a quality product was desired, with very low tolerances in the flight suitability parameters. These "historical" products are now reused by digitising them to obtain a digital terrain elevation model (DTM) of the past using modern interpolation techniques on the digitised point cloud in a GIS. Considering the quality for 1:25000 maps, the accuracy of DTM planimetry is of the order of 3 to 4 m according to the Koppe tables, i.e., the reference value that would prove this is, for example, the graphic accuracy of 0.2 mm in 1:25000 is 5 m on the ground, where the accuracy according to Koppe is below 5 m. For altimetry, the accuracy depends on the fidelity of the representation of the relief according to contour curves and ground support points. The mean square errors of contour line positions, which determine the height accuracy, are commonly used as an elevation indicator of the accuracy of classical topographic maps, as well as the mean square errors of height points in relation to the nearest geodetic control points. Otherwise, this mean square error is given by the  $\pm 0.2\%$  of the flight height which, for the flights examined, is about 10 m.

Since this work has employed massive image processing using the SfM-MVS technique, in addition to considering the planimetric and altimetric qualities of the resulting products, such as the DTM, the derived topographic map,

and the orthoimage, it is necessary to take into account the different errors committed and their significance to assign an appropriate threshold to each one, following the workflow presented in Figure 5.

The reconstruction uncertainty is the ratio of the semi-major axis to the semi-minor axis of the error ellipse of the 3D triangulated point coordinates. By taking a criterion value of less than 10, the tie points in image margin areas and points in models with a low base/height ratio, i.e., less than 1:2.3, are filtered out. The removal of these points does not affect the accuracy and does lighten the 3DSPC.

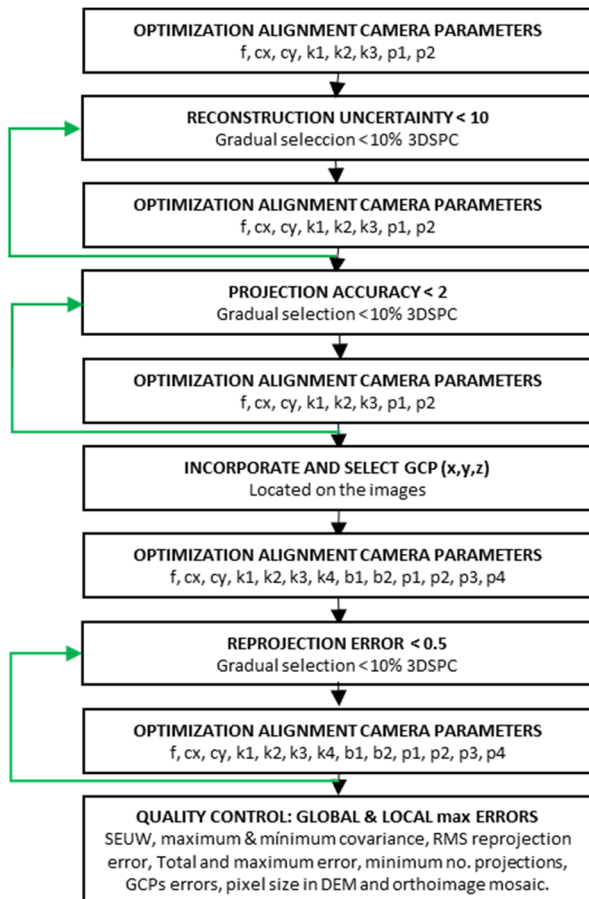


Figure 5: Development of the module *Improvement of 3DSPC* in Figure 4.

As the projection accuracy is the average scale of the image at which the image coordinates of the tie point were measured, imposing  $PA < 2$  has filtered out points with less localised projections due to the larger size. That is, eliminating the less reliable tie points with poor 3D point determination relative to the stronger ones.

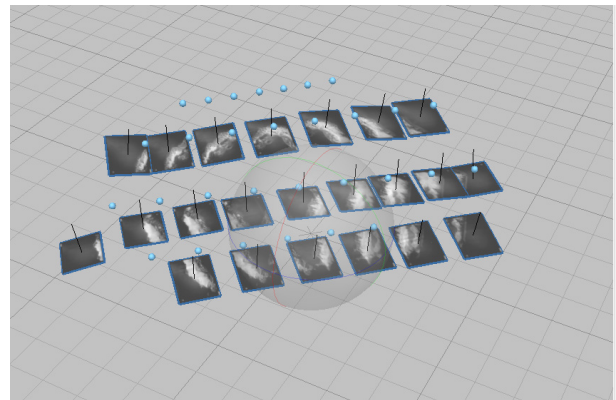
The high reprojection error evaluated in pixels indicates poor 3D point determination of the corresponding point projections as well as erroneously matched points, i.e., poor localisation accuracy of the corresponding point projections in the point matching step. The elimination of points with high reprojection error can improve the accuracy of the subsequent optimisation step. A tie point reprojection error of 0.3 to 0.5 pixels is possible in the case of sharp images.

The fact that the values of each of the errors below the established thresholds  $RU < 10$ ,  $PA < 10$ ,  $RE < 1.0$  have been achieved, ensures an adequate quality for the

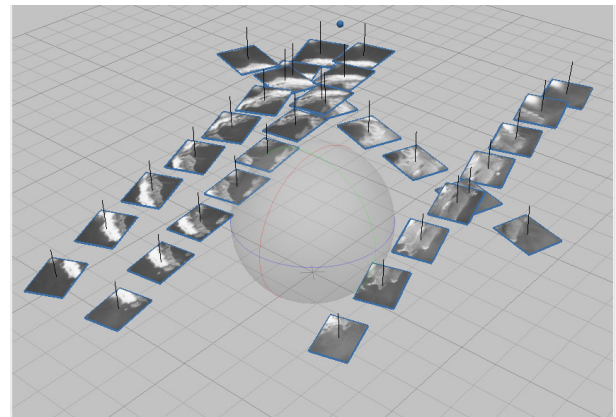
processing of the 3DSPC and the obtaining of the 3DDPC and depth maps. According to the flowchart in Figure 4, the triangulation irregular network (TIN) and the DTM and the have been obtained by means of the depth maps; the computed orthomosaic uses the obtained DTM. All products are referenced to the coordinate system in WGS 84 / UTM zone 20S (EPSG::32720).

## 5. Results

We selected for the FIDASE flight 22 images of the second pass (taken on 19/12/1956) covering an area (Fig. 6a) of 263 km<sup>2</sup>, neglecting those of the first track (17/12/1956) because they had cloudy areas and an uncovered zone between Morro Baily and Punta SouthEast. Photocentre coordinates (EPSG::4326) and flying altitude from the USGS flight database have been directly incorporated in the image reference list. The histogram of the 22 images has been equalized with 200% brightness and 44% contrast. The image qualities are between 0.85 and 0.96, higher than 0.7 as USGS recommend.



(a)



(b)

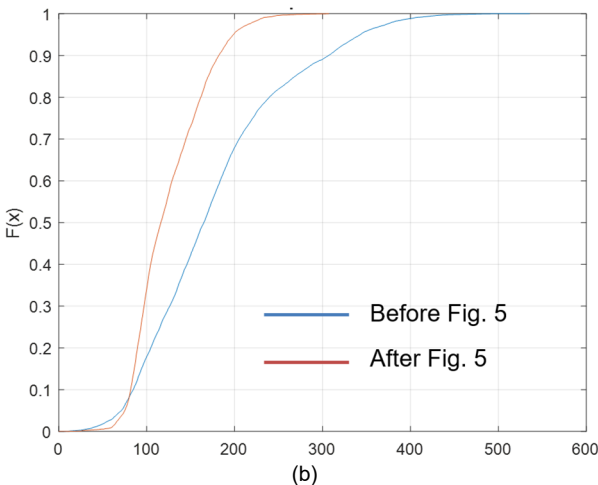
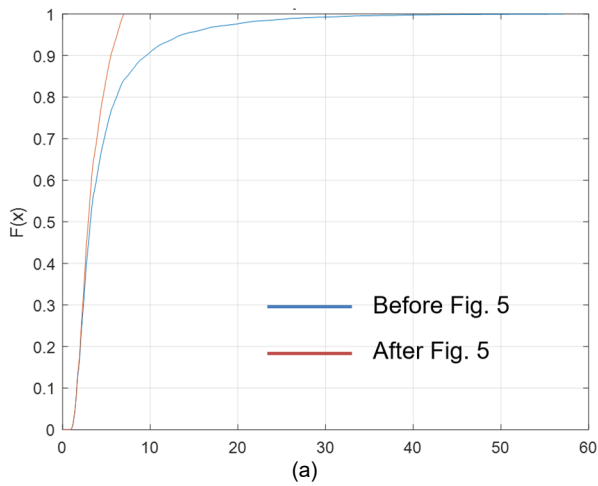
Figure 6: Relative location of images from: a) FIDASE; b) Argentinian photogrammetric flights.

The 33 images of the Argentinian flight (Fig. 6b) have a worse quality, between 0.81 and 0.53. We have tried to correct the histogram by taking 140% for brightness and 57% for contrast, slightly improving its sharpness for the key and tie point image matching process. The coordinates (EPSG::32720) of the 37 GCPs are also incorporated, identifying them manually in the 22 and 33 images of each flight.



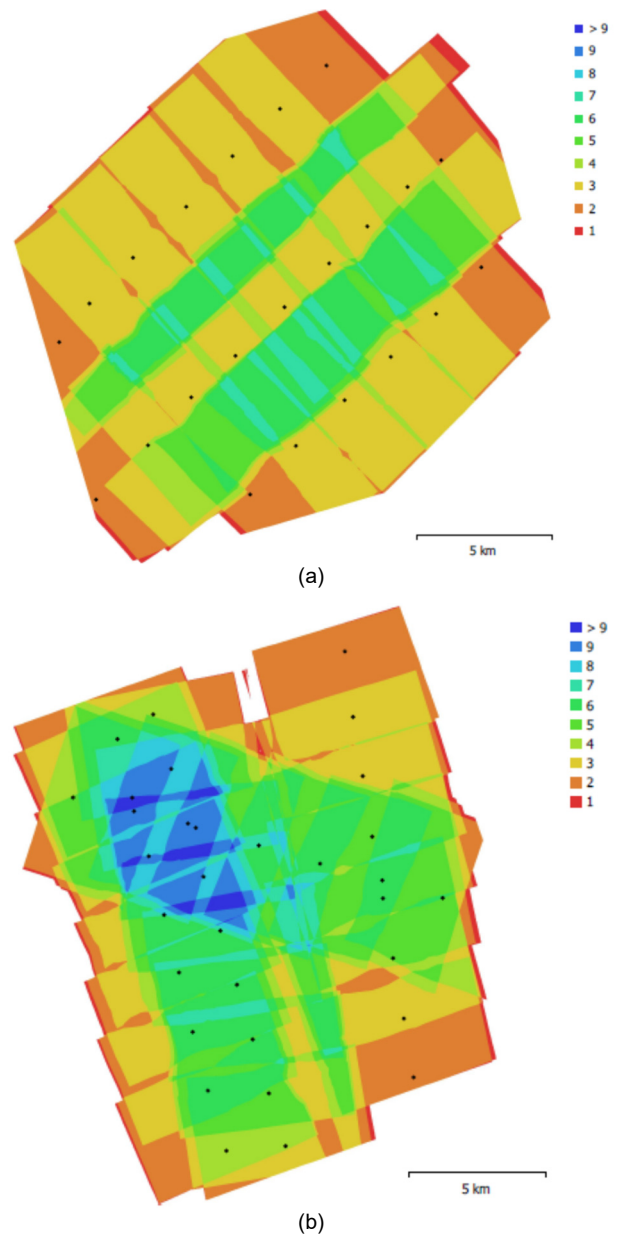
The alignment of the photos is then performed by SfM, discarding the position of the GCPs, just considering the images from the FIDASE flight. However, in the case of Argentinean flight, the GCPs had to be used in conjunction with the images to obtain a first approximation of the photocentres that will then be used to complete the reference list of the images as well as the flight altitude. Once the image references of both flights have complete data ( $X_{east}$ ,  $Y_{north}$ ,  $Z_{altitude}$ ), the SfM algorithm is used, discarding the GCP to obtain the 3DSPC and the interior and exterior orientation of the images and optimisation of the camera parameters.

Next, the Sfm procedure automatically detects the tie points (TP) by coincidence of images, matching in which each TP appears, obtaining a preliminary 3DSPC for FIDASE and Argentinean flights. Using the proposed working scheme, within the standard Sfm-MVS photogrammetric restitution scheme (Fig. 4), which incorporates error reduction (Fig. 5), the quality 3DSPCs have been improved. The effect caused by the imposition of a certain threshold value on the projection accuracy and reprojection errors, does not only imply a censoring of the maximum value but, as shown in the empirical cumulative distribution functions (Fig. 7), a readjustment of all its values on the 3DSPC. This is due to the successive optimisations of the alignment and orientation of the cameras after each filtering.



**Figure 7:** Variation of the empirical cumulative distribution functions after improvement of the projection accuracy and reprojection error of the 3DSPC of the FIDASE flight: a) Projection accuracy; b) Absolute reprojection error.

The camera calibration, its extrinsic and intrinsic parameters, provide an average error of 48.62 m and 22.84 m in the location of the photocentres for the FIDASE and Argentinean flight, respectively. The obtained planimetric distribution of the cameras and their overlaps (Fig. 8) shows a multiplicity greater than 3 in the area of interest. Once the processign is supported on the 37 GCPs, the total location error in the points on the ground decreases to 5.79 m and 4.72 m, values that are within the limits recommended in the Koppe tables for the planimetric accuracies. Locally, these errors exceed the overall average in the area north of Kendall Terrace to Macaroni Head, and south of Costa Recta at Baily Head, probably due to the difficulty of properly locating the GCPs in those areas, because of the orientation of the shadow.



**Figure 8:** Camera locations and image overlap: a) FIDASE; b) Argentinean photogrammetric flights.

From the 3DSPC, the 3DDPC is calculated by means of depth maps. These average maps allow to capture the depth, the distance of the surfaces of objects in a scene, or the distance at which a pixel, recognised in several



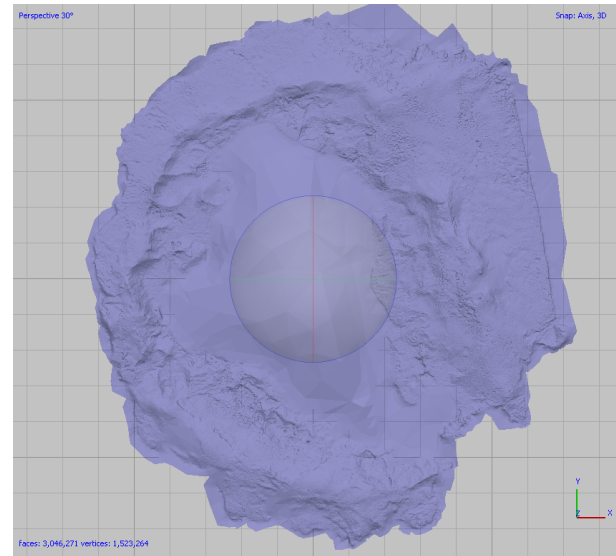
images, is located from one point of view (in this case, the aircraft camera). From the camera orientation of the 3DSPC, the depth map can be calculated by trigonometry between the rays projected from the camera origin(s) to the image pixels, and the intersection between the rays from different images determines a depth value, which allows the projection of a 2D pixel coordinate into the 3D space, displayed as a depth map. The use of depth maps allows the calculation of a 3D component not found in 2D images alone, improves filtering during dense stereo adjustment, and reduces noise on the final surface while preserving the detailed structures of the scene. The orientations and relative positions of multiple cameras allow the calculation of different depth maps, which can be combined to determine a statistically probable 3D position for any pixel found in overlapping images. For each point in the final 3DDPC, the number of combined depth maps that contribute is recorded and presented as a confidence value. This confidence value can then be used to further filter out low confidence points and discard them from the DTM or TIN retrieval process. The set of parameters used to control the quality of the process and the results obtained are listed in Table 2. In addition to this parameter set, it is possible to define other parameters on the 3DDPC, such as DPGFs (Javadnejad *et al.* 2021) that include proximity to keypoint features, distance to GCPs, angle of incidence, camera separation distance, number of overlapping images, brightness index, and darkness index, which could be assessed by Sfm-MVS processing of historical images.

**Table 2:** Summary of the quality control parameters obtained for each flight.

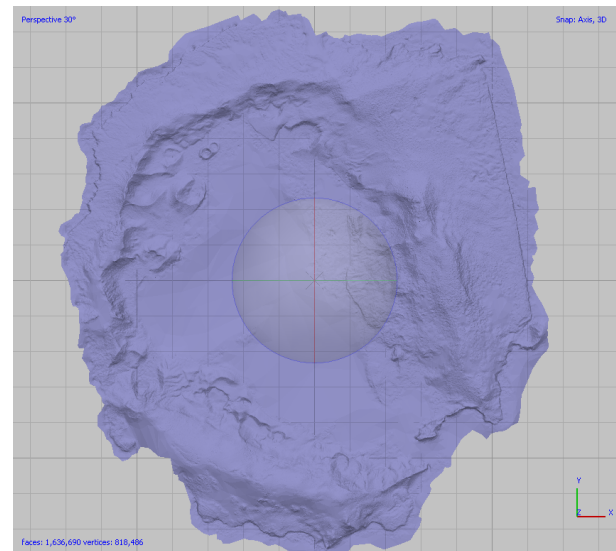
Quality control parameter	FIDASE Hunting UK 1956	Argentinean Army 1968
DTM pixel size	1.78 m/px	2.64 m/px
Ortho pixel size	0.773 m/px	1.205 m/px
No. pts. 3DSPC	10 176	24 597
No. pts. 3DDPC	45 429 979	24 471 902
RMSE <sub>image</sub>	48.62 m	27.84 m
Easting <sub>GCP</sub> error	3.93 m	3.45 m
Northing <sub>GCP</sub> error	3.60 m	2.75 m
Altitude <sub>GCP</sub> error	2.25 m	1.66 m
RMSE <sub>GCP</sub>	5.79 m	4.72 m
RU <sub>max</sub>	7.05	8.64
PA <sub>max</sub>	5.99	8.99
RE <sub>max</sub>	5.98 px	4.01 px
RMSE <sub>RE</sub>	0.693 px	0.645 px
CoV <sub>min</sub>	1.3	1.1
CoV <sub>max</sub>	6.4	9.4

Using the depth maps (Fig. 9), instead of using the 3DDPC to obtain the TIN, we work directly with the depth map data, which allows us to reconstruct an exceptionally detailed geometry by using all available information. The result of the process fills gaps better than using 3DDPC and the definition of the surface relief appears clearer. The quality control of the obtained TIN can be done with the model confidence which is collected as an additional

parameter on the TIN, and which allows to identify parts of the photogrammetric scene that are less accurate or with values in the order of  $10^0$ , e.g. interpolated areas have 0 confidence, then low overlap areas, etc.



(a)



(b)

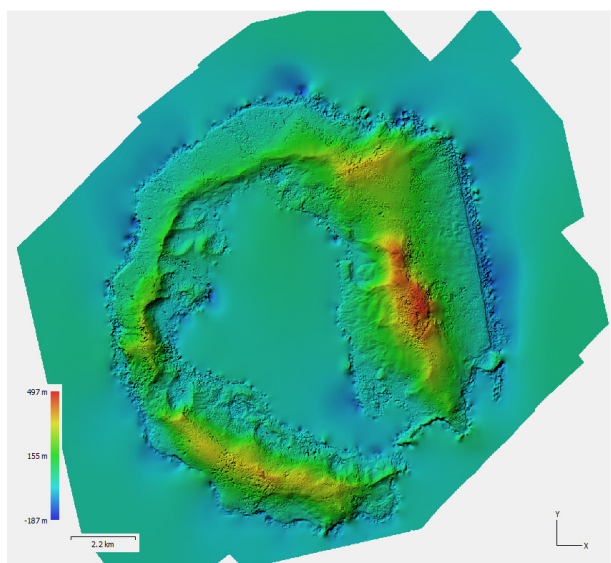
**Figure 9:** Triangulation irregular network TIN: a) FIDASE; b) Argentinean photogrammetric flights.

The results obtained with the depth maps in TIN have served as an incentive to use them also in the calculation of the DTM through TIN (Fig. 10). If 3DSPC is used directly, the results obtained show an extremely irregular surface, with numerous bumps, hollows, and unnatural prominences. The pixel size obtained is within the resolution limits for a 1:25 000 mapping, from which it can be accurately estimated down to 1/5 of a millimetre.

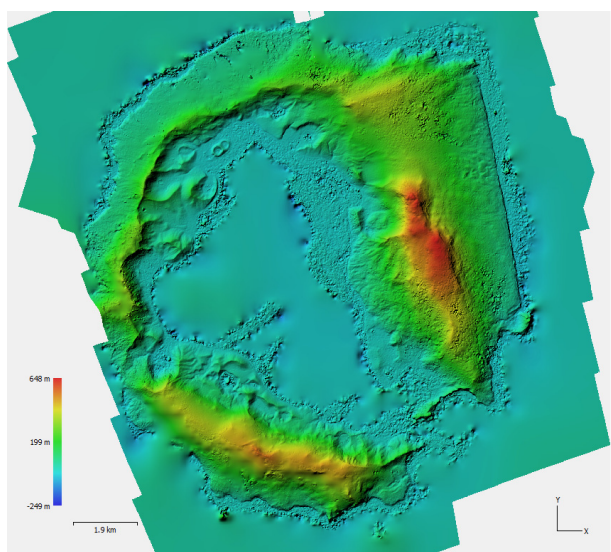
Finally, the orthomosaic (Fig. 11) of each flight has been obtained, taking as support the previous DTM and applying a refinement to the seam lines between the images that compose the orthorectified collage. The combination of this orthoimage with the DTM allows us to identify and quantify at a glance the morphometric changes produced in the area of the last eruptions (Hunt *et al.* 2020) in the NE of Foster Bay (Fig. 12). It will also

help to estimate other changes related to active geomorphological processes such as coastal recession or land erosion and gulying near the Argentinean and Spanish Antarctic bases and to study their possible relationship with the deterioration of permafrost and the possible effect of climate change since historical times.

will allow us to evaluate not only qualitatively but also quantitatively the changes that the island has undergone since then.



(a)

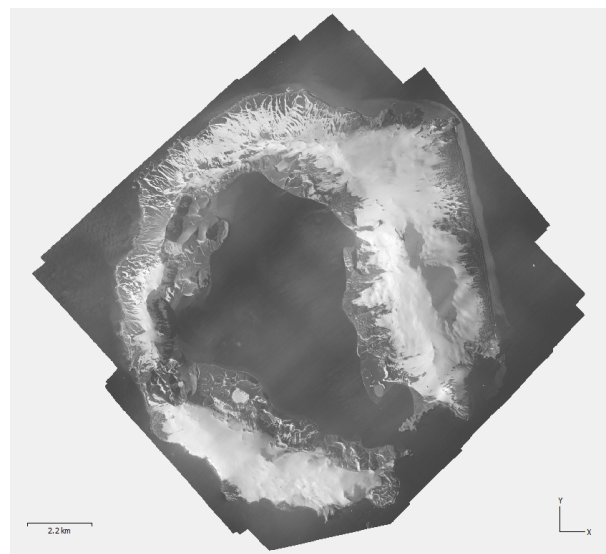


(b)

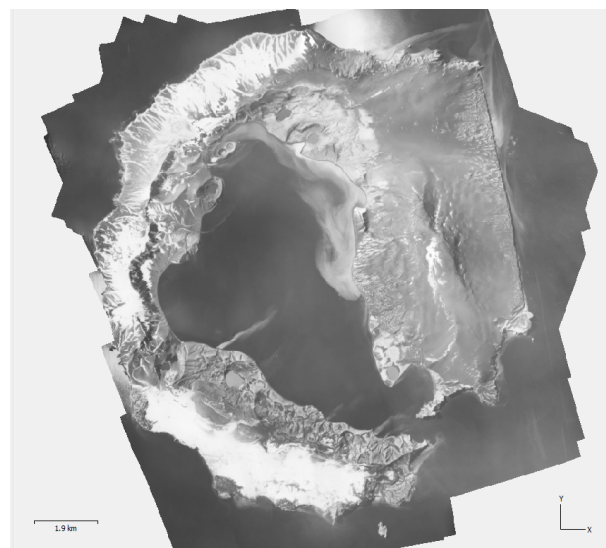
**Figure 10:** Digital terrain model (DTM): a) FIDASE; b) Argentinean photogrammetric flights.

## 6. Conclusions

The photogrammetric processing of the 22 and 33 digitised images from the second pass of the FIDASE expedition over Deception Island on 19/12/1956 and the 1967 posteruption aerial photogrammetric survey flight by the Argentine Navy on 21/01/1968 using SfM-MVS techniques implemented in Agisoft Metashape, has made it possible to obtain a DTM of the island in 1956 and 1967 with a higher or comparable quality than the 1960 D.O.S. topographic map with the additional advantage that the products are in digital format and have been obtained from the original sources. With the DTM we have obtained what may be the first orthorectified photomosaic of the island in 1956, which, used in conjunction with the DTM,



(a)

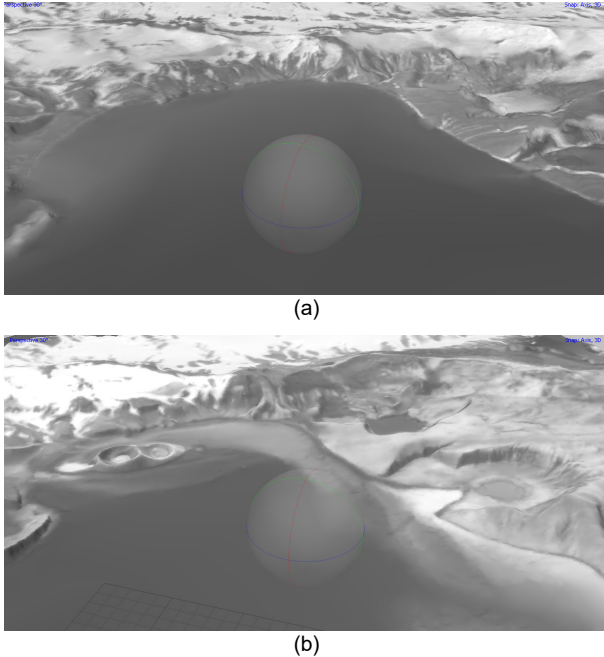


(b)

**Figure 11:** Orthomosaic using DTM: a) FIDASE; b) Argentinean photogrammetric flights.

The procedure presented for the photogrammetric restitution of the historical images has proved to be efficient, in view of the planimetric and altimetric errors of the results, and despite the fact that the images were not photogrammetrically scanned and presented important deficiencies in terms of quality and sharpness. Even the matching of images with areas that were difficult to link, especially ice-covered areas, where relief variations become indistinguishable by contrast, has been possible, while in high relief areas there is an excessive amount of contrast between the brightness or reflected light from the snow compared to the vertical faces of the exposed rock and the deep shadows cast by the mountains. Currently, the team is also working with the English 1:12000 (1979), and Chilean 1:30000 (1986) flights using the procedure presented. The authors are not aware of any other flights of lesser relevance, for which significant results have been published. The DTMs and orthoimages obtained

from the 4 flights will be used to complete the historical catalogue of other geomorphodynamic processes that occurred on the island during its geodynamic evolution in the recent past.



**Figure 12:** Orthomosaic draped over DTM: a) FIDASE: b) Argentinean photogrammetric flights.

## Acknowledgements

This work has been developed within the Project "Auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla" of the INTA - Ejército de Tierra financed by the Ministry of Defence and collaboration with UPM. The authors are grateful for the support received from the BGC staff, the Antarctic Campaign Office and the Logistics Division of the Army General Staff, the Hydrographic Institute of the Navy (IHM), Spanish Polar Committee (CPE), and Universities.

## References

- BAKER, P., MCREATH, M.A., HARVEY, M.R., ROOBOL, M.J. and DAVIES, T.G., 1975. The geology of the South Shetland Islands: V. Volcanic evolution of Deception Island. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, **78**, 107 p.
- BERROCOSO, M., TORRECILLAS, C., JIGENA, B., and FERNANDEZ-ROS, A., 2012. Determination of geomorphological and volumetric variations in the 1970 land volcanic craters area (Deception Island, Antarctica) from 1968 using historical and current maps, remote sensing and GNSS. *Antarctic Science*, **24**(04), pp. 367–376. DOI: 10.1017/S0954102012000193.
- DOS. 1960. Directorate of Overseas Surveys, Deception Island, D.O.S. 310, scale 1:25,000 (map), Great Britain.
- GIROD L, NIELSEN NI, COUDERETTE F, NUTH C. and KÄÄB A., 2018. Precise DEM extraction from Svalbard using 1936 high oblique imagery. *Geosci Instrum Methods Data Syst.*, **7**, pp. 277–288. DOI: 10.5194/gi-7-277-2018.
- HARTLEY, R., and ZISSERMAN, A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. 655 p.
- HUNT, J.A., MATHER, T.A., and PYLE, D.M., 2020. Morphological comparison of distributed volcanic fields in the Main Ethiopian Rift using high-resolution digital elevation models. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, **393**(1), 106732. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.106732.
- HYDROGRAPHIC DEPARTMENT ADMIRALTY, 1949. South Shetland Islands, Deception Island, Naval Hydrographic Unit, FIDS, 1948/9, Great Britain, E8566 Press, 31s (unpublished report).
- JAMES, M.M., 2017. SfM-MVS PhotoScan image processing exercise. *The IAVCEI 'Drone' workshop*, held on 13th August. Portland, USA.
- JAVADNEJAD, F., SLOCUM, R. K., GILLINS, D. T., OLSEN, M. J., and PARRISH C. E., 2021. Dense point cloud quality factor as proxy for accuracy assessment of image-based 3D reconstruction. *J. Surv. Eng.*, **147**(1), 04020021. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000333.
- LIE – ROPERO, M.A., 2015. *Proyecto de estudio de afecciones morfológicas en la base Gabriel de Castilla en isla Decepción – Antártida*. Madrid: Laboratorio de Ingenieros del Ejército "General Marvá", INTA - Ministerio de Defensa. 264 pages.
- MAYER, C., GOMES PEREIRA, L. M. and KERSTEN, T., 2018. A Comprehensive Workflow to Process UAV Images for the Efficient Production of Accurate Geoinformation. *CNCG2018 - IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Amadora, Portugal*, Oct. Pp. 25-26.

- MOTT, P.G., 1986. *Wings over Ice: The Falkland Islands and Dependencies Aerial Survey Expedition*; Peter Mott: Long Sutton, UK, 167 pages.
- RIQUELME A., SOLDATO M.D., TOMÁS, R., CANO, M., BORDEHORE, L., and MORETTI, S., 2019. Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos. *Geomorphology*, **329**, pp. 206–223.
- SINGH, K.K. and FRAZIER, A.E., 2018. A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *Int. J. Remote Sens.*, **39**, pp. 5078–5098. DOI: 10.1080/01431161.2017.1420941
- TORRECILLAS, C., M. BERROCOSO, M., PÉREZ-LÓPEZ, R., and TORRECILLAS, M.D., 2012. Determination of volumetric variations and coastal changes due to historical volcanic eruptions using historical maps and remote-sensing at Deception Island (West-Antarctica). *Geomorphology*, **136**, pp. 6-14.
- ULLMAN, S., 1979. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London*, **203**(1153), pp. 405–426.



## DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE ILUMINACIÓN DE VÍAS PÚBLICAS CON POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO

### DESIGN OF A SELF-POSITIONING STREET LIGHTING DEVICE

José Ángel Garrido<sup>a,b,\*</sup>, Ángel Marqués<sup>b</sup>, Ángel Martín<sup>b</sup>, José Llorens<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de I+D+i, TECHNOSUN S.L.U., C/ Villa de Madrid (P.I. Fuente del Jarro), 46988 Paterna, España.  
[angel.garrido@technosun.com](mailto:angel.garrido@technosun.com); [jolloma7@topo.upv.es](mailto:jolloma7@topo.upv.es)

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València, España. [amarques@cgf.upv.es](mailto:amarques@cgf.upv.es); [aemartin@upvnet.upv.es](mailto:aemartin@upvnet.upv.es)

#### Abstract:

Current trends in urban lighting design are focused on factors such as energy efficiency, environmental sustainability, and multi-service effectiveness. As in most urban facilities, geographic location is a key attribute in the management of urban lighting infrastructures, and although street lighting hardware based on IoT devices allow users to connect multiple sensors, GNSS chips are rarely considered in hardware and software design. In this paper, we present the prototype of a lighting device intended for urban networks that allows positioning lampposts. The hardware equipment consists of four fundamental blocks: the BeagleBone Black (BBB) board, the energy manager board, the serial wired LED array, and the RS-485 communication bus. Blocks one and two form a subsystem that we name the energy management system (EMS), while block four is responsible for low level communication with the sensors, particularly the GNSS sensor. After its integration in the network, our device is considered as a node in a branched structure with three hierarchical levels: the operations command centre, the control cabinets, and the lampposts themselves; or in other words, the central, mid, and peripheral node groups respectively. The operation of the positioning procedure is mostly autonomous, starting with the GNSS data collection by the lamppost equipment. All those data are sent to the upper level, i.e. cabinets, for further processing in a different computing environment. This separation reduces the computational requirements of terminal nodes. Nodes in level 2 are also responsible for communicating geolocation updates to nodes in level 3 as well as to the command centre in level 1. Communication tasks rely on HTTP requests over lines that link the three levels. We used the open-source platform Fiware, a framework designed to support smart solutions, which in turn relies on other well-known components such as MongoDB, a NoSQL database system. As a result, we have a positioning procedure that can be embedded into a lighting network that guarantees efficiency and other requirements in modern city management.

**Key words:** renewable energy management, lighting networks, georeferencing, GNSS sensor, IoT technology, IT

#### Resumen:

Las tendencias actuales en el diseño de iluminación urbana se centran en factores como la eficiencia energética, la sostenibilidad medioambiental y la eficacia de múltiples servicios. Como en la mayoría de las instalaciones urbanas, la ubicación geográfica es un atributo clave en la gestión de las infraestructuras de iluminación urbana, y aunque el hardware de alumbrado público basado en dispositivos IoT permite a los usuarios conectar múltiples sensores, los chips GNSS rara vez se consideran en el diseño de hardware y software. En este trabajo presentamos el prototipo de un dispositivo de iluminación destinado a redes urbanas que permite geolocalizar farolas. El equipo de hardware consta de cuatro bloques fundamentales: la placa BeagleBone Black (BBB), la placa electrónica de gestión de la energía, la matriz de LED cableados en serie y el bus de comunicación RS-485. Los bloques uno y dos forman un subsistema que denominamos sistema de gestión de energía (EMS), mientras que el bloque cuatro es el responsable de la comunicación de bajo nivel con los sensores, en particular el sensor GNSS. Tras su integración en la red, nuestro dispositivo es considerado como un nodo en una estructura ramificada con tres niveles jerárquicos: el centro de mando, los nodos de control y las propias farolas; o en otras palabras, los grupos de nodos central, medio y periférico, respectivamente. La operación del procedimiento de posicionamiento es fundamentalmente autónoma, comenzando con la recolección de datos GNSS por el equipo electrónico de la luminaria. Todos esos datos se envían al nivel superior para su posterior procesamiento en un entorno informático diferente. Esta separación reduce los requisitos computacionales de los nodos terminales. Los nodos en el nivel 2 también son responsables de comunicar las actualizaciones de geolocalización a los nodos en el nivel 3, así como al centro de mando en el nivel 1. Las tareas de comunicación se basan en solicitudes HTTP a través de líneas que vinculan los tres niveles. Utilizamos la plataforma de código abierto Fiware, un marco diseñado para admitir soluciones inteligentes, que a su vez se basa en otros componentes de código bien conocidos como MongoDB, un sistema de base de datos NoSQL. Como resultado, tenemos un procedimiento de posicionamiento que puede integrarse en una red de iluminación que garantiza la eficiencia y otros requisitos en la actual gestión de la ciudad.

**Palabras clave:** gestión de energías renovables, redes de iluminación, sensor GNSS, tecnología IoT, TIC

\* Corresponding Author: José Ángel Garrido, [angel.garrido@technosun.com](mailto:angel.garrido@technosun.com)

## 1. Introducción

Actualmente existe una tendencia ampliamente aceptada hacia el desarrollo de ciudades inteligentes basadas en los siguientes pilares (Albino *et al.* 2015):

- Uso de energías renovables y sistemas autosostenibles energéticamente.
- Gestión inteligente y eficiente de la energía necesaria para alimentar al sistema, tanto el alumbrado público como otros usos y servicios del espacio urbano.
- Georreferenciación de los elementos más importantes del alumbrado público, específicamente farolas y centros de mando.
- Asociación de sensores tanto para la monitorización de variables medioambientales, como de sensores-actuadores del propio sistema para el control, monitorización y fiabilidad del sistema.
- Conectividad mediante dispositivos Internet of Things (IoT) y tecnologías de la información y comunicación (TIC).

El uso combinado de estos cinco conceptos es la clave de la noción de Smart city del futuro.

Este artículo presenta los primeros resultados de una tesis doctoral desarrollada en modalidad de doctorado industrial en la empresa TECHNOSUN S.L.U. en el marco del programa de doctorado interuniversitario del departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València (UPV) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Esta tesis ha recibido fondos europeos a través de la Agencia Valenciana de la Innovació AVI, cuyo objetivo es el fomento del I+D+i en el tejido industrial y empresarial Valenciano.

El objetivo de la tesis es contribuir a la gestión eficiente de energía en el contexto de la ciudad inteligente. La Figura 1 muestra un diagrama conceptual donde se representan todos los elementos que conforman el sistema en su totalidad.

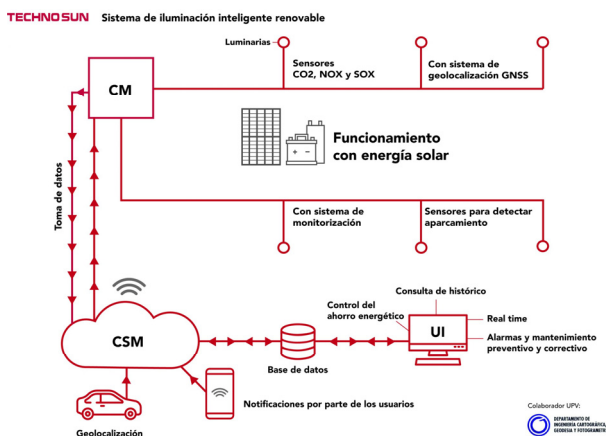


Figura 1: Bloques sistema completo.

La idea que se pretende transmitir en la Figura 1, es que el uso eficiente de una red de alumbrado público es un concepto básico para la ciudad inteligente. Esta red se puede dividir jerárquicamente en tres niveles: (1) sistema central de gestión (CMS), (2) centros o nodos de control

(CM) y (3) luminarias (nodos periféricos). Las luminarias en particular conforman un conjunto de puntos, repartidos por toda el área urbana, que potencialmente permiten recolectar, tanto datos de los sensores del sistema de iluminación, como datos relacionados con las variables medioambientales. Si dichas luminarias se equipan adecuadamente, permitirán además actuar sobre el comportamiento de las propias luminarias para gestionar la energía de manera eficiente, aparte de ayudar a monitorizar el entorno de manera autónoma.

Es importante que la componente tecnológica no nos haga perder de vista el propósito fundamental del concepto de ciudad inteligente, que es contribuir a la conservación del medioambiente e incrementar el bienestar y seguridad de todos los seres vivos, incluyendo los usuarios humanos, pero sin olvidar toda la diversidad tanto de animales como plantas que habitamos en nuestro planeta (Pérez 2019).

En este sentido cabe recordar que el planeta tierra es en última instancia un contenedor que posee unos recursos finitos: agua, energía y alimentos, animales, plantas y seres humanos. Sobre estos últimos recae la responsabilidad de preservar el entorno mediante la correcta gestión de los recursos y la cohabitación de forma respetable con toda la biodiversidad del planeta. Este enfoque vital es bien conocido en multitud de poblaciones indígenas y nuestro planeta recibe nombres propios como Pachamama en Sudamérica, Asase Yaa en algunas zonas de África o Akna en la cultura Inuit.

El proyecto de tesis doctoral que se está desarrollando presenta un grado de complejidad considerable como consecuencia del carácter multidisciplinar necesario para poder abordar, integrar y desarrollar todos los elementos que conforman el sistema.

En esta comunicación presentamos un primer prototipo funcional a pequeña escala en el que se considera un único nodo compuesto por:

- Luminaria, módulo solar, sistema de acumulación, sistema de control y monitorización con tres intensidades de regulación correspondientes a tres escalones de consumo en función de las necesidades.
- Caja de sensores. La caja asociada a este nodo contiene sensores GNSS para posicionamiento, además de sensores de temperatura y humedad. Asimismo, contiene el módulo solar, sistema de acumulación y sistema de control y monitorización al igual que en el caso anterior.
- Centro de mando. En nuestro prototipo, este bloque está compuesto por el dispositivo IoT BeagleBone Black (nodo 2 intermedio) conectado a una red local, donde se encuentra integrado el equivalente del nodo de nivel 1 (sistema central), en una máquina con sistema operativo Linux, que en el prototipo definitivo se alojará en la nube haciendo uso del estándar Fiware que se explica posteriormente.

Este prototipo ya está funcionando y la interconexión entre luminarias-sistema fotovoltaico, caja de sensores-sistema fotovoltaico integrado y centro de mando o CM se ha realizado mediante un bus de comunicaciones denominado Power over Bus RS-485 (POB-485). La Figura 2 muestra un diagrama de bloques del prototipo.



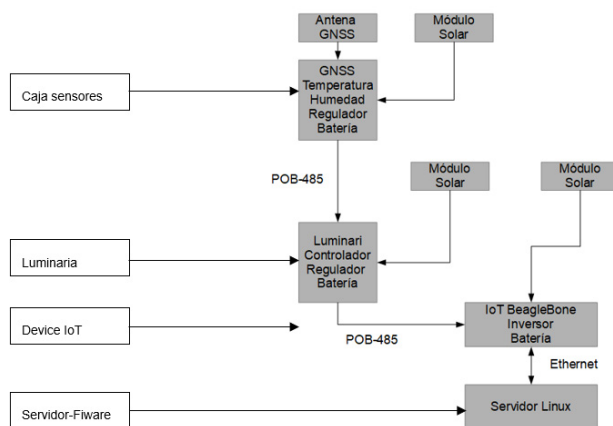


Figura 2: Bloques prototipo funcionando.

Es interesante destacar que tanto el dispositivo IoT como el servidor Linux y la propia red local están alimentados por energía solar. Esto se implementa por medio de un inversor-sai que por defecto alimenta de forma ininterrumpida el sistema con energía fotovoltaica. En caso de fallo o agotamiento de las baterías debido a la ausencia de energía solar, el sistema toma la energía de la red eléctrica para mantener la continuidad del servicio. La autonomía nominal de este prototipo es de 10 días.

## 2. Gestión energética

Uno de los aspectos fundamentales de este trabajo es el enfoque en la gestión y uso de la energía eléctrica. El concepto de gestión energética tiene como punto de partida fundamental la orientación del diseño del sistema, tanto software como hardware, hacia los principios de uso eficiente, razonable y sostenible de la energía eléctrica. Esto se consigue a través de los siguientes elementos:

- Conversión en origen, en los centros de mando y control, de la corriente eléctrica alterna (AC) trifásica en corriente continua (DC).
- Maximización de la producción de energía eléctrica procedente de fuentes renovables (tan cercana al consumo real de energía como sea posible).
- Optimización de las pérdidas en las líneas de distribución del alumbrado.
- Optimización de la gestión y conversión de la energía punto a punto (luminaria hardware DC/DC BUCK).

Una vez alcanzados los puntos anteriores, se debe aplicar un control de la energía en función de las necesidades reales de cada una de las vías que alumbran las luminarias, adecuando la intensidad lumínica a dichos recursos necesarios y por tanto controlando el consumo energético.

En la situación operativa final, se trata de ejercer el control citado anteriormente en función de la ocupación o saturación de la vía y aplicando distintos tramos horarios en los que se regula la intensidad lumínica y por consiguiente el consumo.

### 2.1. Conversión de AC a DC en los CM

El objetivo de esta transformación es elevar al máximo la tensión eléctrica y minimizar todo lo posible la corriente eléctrica que se transmite sobre las líneas. También es

necesario eliminar la descompensación habitual de potencia entre las fases de la corriente alterna trifásica, evitando así la generación de pérdidas en los centros de transformación por la descompensación de potencias entre fases donde se conectan los CM. La Figura 3 muestra el esquema eléctrico de la rectificación de AC a DC en el CM.

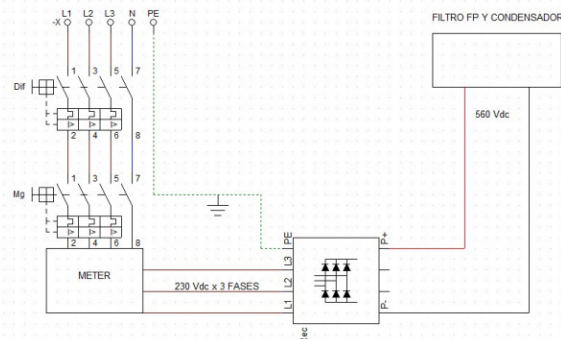


Figura 3: Esquema eléctrico rectificación y filtrado.

La Figura 4 muestra los componentes físicos que conforman la rectificación de AC a DC en el CM. La instalación está compuesta por diferentes bloques destinados a protección, monitorización de variables eléctricas, rectificador y filtro.

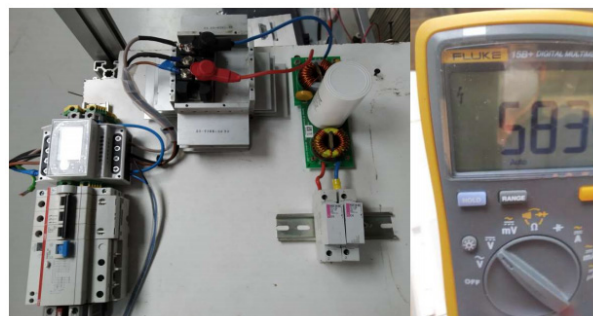


Figura 4: Componentes reales rectificador y filtro.

### 2.2. Maximización en el punto de consumo del uso de energías renovables

Para conseguir los puntos 2 y 3 citados anteriormente (maximización de la utilización de energía solar renovable y optimización de las pérdidas en las líneas eléctricas), la premisa seguida durante el desarrollo e implementación del sistema es, generar energía fotovoltaica en los mismos nodos, sean periféricos o intermediarios. Como el consumo de dicha energía es nocturno, la producción energética no coincide con el consumo de energía siendo necesario la integración de los elementos: módulo solar, regulador de carga y batería o acumulador litio-ion.

De esta forma se consiguen dos propósitos importantes que conforman los pilares del sistema:

- Utilización de energía renovable.
- Disminución de las corrientes de línea minimizando pérdidas (una gran parte de la energía necesaria para los nodos, no tiene que ser transportada por las líneas ya se encuentra acumulada en las baterías de cada nodo).

En la Figura 5, se muestran los elementos que conforman los nodos autónomos.

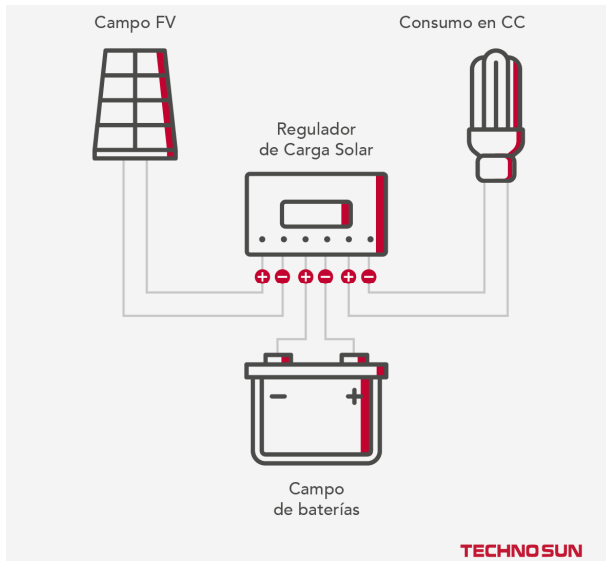


Figura 5: Elementos de los nodos autónomos.

### 2.3. Minimización de las pérdidas en las líneas de distribución del alumbrado

Es necesario tener en cuenta que las pérdidas en las líneas se producen como consecuencia de la circulación de la corriente eléctrica, es decir, del total de la energía transportada hay un porcentaje de ésta que se pierde (o se malgasta) por efecto Joule en forma de calor (Joule 1884).

Parece bastante razonable que la magnitud sobre la que debe actuarse es la corriente eléctrica, con el objetivo de minimizarla. Este comportamiento es posible, por una parte, maximizando el transporte en forma de tensión (V) y no de corriente (I), y, por otra parte, consumiendo la energía en el mismo punto de generación, evitando así las pérdidas como consecuencia de la resistencia del tendido eléctrico que aumenta con la longitud (L).

### 2.4. Optimización de gestión y conversión de la energía punto a punto (luminaria hardware DC/DC BUCK)

Se ha desarrollado una tarjeta electrónica que se encarga de la puesta en marcha, control de la potencia, y por lo tanto de la intensidad lumínica (gestión energética). La electrónica de la tarjeta consta de una fuente de alimentación conmutada Buck-Reductora de potencia, controlada analógicamente. La gestión se lleva a cabo mediante la variación de los parámetros  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$  (PWM  $V_{RMS}$  en DC) de la tensión de alimentación del led en función de la tensión de entrada y las necesidades preestablecidas de consigna de tensión a corriente constante. Existe además un proceso de control-supervisión digital que se ejerce a través de la BBB.

La potencia se ajusta en función de la variación de la tensión manteniendo la corriente constante. En su estado de operación, la tarjeta electrónica puede funcionar de forma indefinida mediante el control analógico sin necesidad de intervención del sistema digital. En caso de problemas del control de la intensidad lumínica o avería del controlador analógico, el sistema digital toma el

control, quedando indicada la avería o anomalía sin interrupción del servicio.

En la Figura 6 se observa un diagrama de bloques-esquemático electrónico que muestra el conjunto de la tarjeta electrónica.

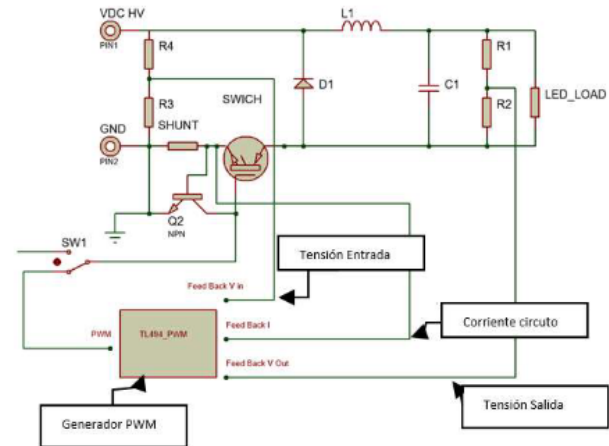


Figura 6: Esquema Fuente Buck-reductora.

La fuente descrita actúa sobre la luminaria (Fig. 7) aplicando alta tensión mediante la configuración de la trama LED gracias a la disposición en serie de 15 LEDs de 33 V<sub>DC</sub>, en total 495 V<sub>DC</sub> y cuya corriente máxima es de 0.250 A. La potencia total máxima es de 123 W en corriente continua.

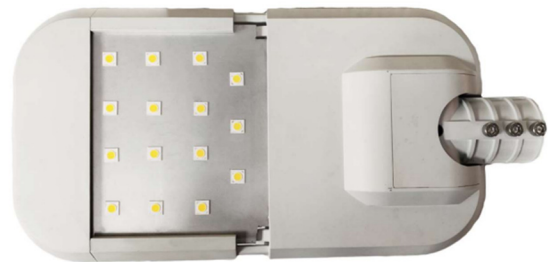


Figura 7: Luminaria de Alta Tensión.

Las ventajas de este sistema en términos de ahorro total son evidentes. Los elementos clave para la minimización de pérdidas de energía eléctrica en el tendido eléctrico son la utilización de la tecnología led, la utilización de fuentes de alimentación conmutadas DC/DC Buck, generación y acumulación (Li-Ion) de energía en el mismo punto de consumo, la fuente de generación energía solar fotovoltaica y finalmente la regulación y control de la intensidad lumínica y por lo tanto de la energía consumida.

Es interesante remarcar que en el diseño del prototipo final se entrega la potencia a la máxima tensión posible y a la menor corriente posible.

## 3. Prototipo del sistema

Los bloques que conforman el prototipo del artículo se muestran en la Figura 8 y se describen en esta Sección.

El prototipo diseñado consta de los siguientes subsistemas:

- Subconjunto caja de sensores.

- Subconjunto luminaria.
- Dispositivo IoT.
- Servidor Fiware sobre Linux Ubuntu.

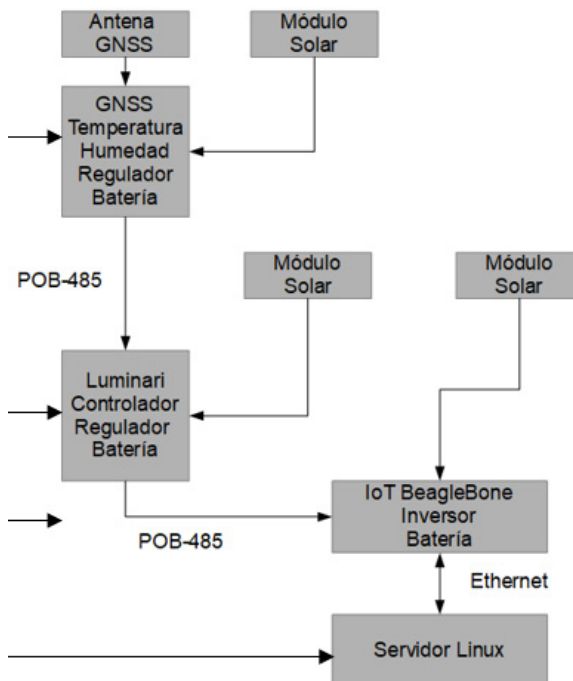


Figura 8: Bloques del prototipo.

### 3.1. Subconjunto caja de sensores

El sensor GNSS transmite los datos por el bus de comunicaciones serie RS-232 mediante el pin TX, que se conecta a su vez a un conversor serie RS-485. Este conversor permite dos acciones importantes, por una parte, prolongar la distancia de propagación de los datos hasta 1200 m y, por otra parte, poder conectar otros sensores o dispositivos al mismo bus. El bus es un recurso compartido multi-punto, cuyas salidas se llaman A+ y B-, a las cuales nos referiremos simplemente como bus compartido a partir de aquí.

El sensor de humedad y temperatura se conecta al dispositivo BBB a través del pin 2 dedicado a la entrada de interrupciones. La lectura de temperatura y humedad son gestionadas por una librería específica proporcionada por el fabricante mediante interrupciones en este pin. La placa BBB a su vez, se conecta a través del pin 1 TX RS-232 a otro conversor RS-232 a RS-485, conectando al bus compartido RS-485.

Se ha programado un software en lenguaje C, con un bucle de toma de datos bi-frecuencia. La operación normal consiste en recolectar datos GNSS y transmitirlos por el bus compartido. En periodos de 30 segundos el dispositivo BBB inhibe la línea del bus compartido RS-485 del receptor GNSS y habilita el periférico RS-485 conectado a la propia BBB, emitiendo por el recurso compartido, la temperatura y la humedad, pasando a continuación a restaurar el envío de datos del sensor GNSS sin pérdida de datos. La habilitación-inhibición se consigue mediante dos salidas digitales.

El recurso compartido (formado por el POB-RS485 Power Over Bus RS-485) y el cable se prolongan hasta una

distancia de 70 m, donde está situada una segunda placa IoT BeagleBoard Black en el laboratorio de Technosun.

La alternancia de los dos intervalos de recolección de datos es temporizada y controlada con la habilitación e inhibición de los dos periféricos RS-485, mediante dos salidas digitales, a través del bus compartido.

Durante el ciclo de vida del programa, cuando se procesan los datos del intervalo 2, además de enviar la información de temperatura y humedad se evalúa la puesta en marcha o la parada de un ventilador encargado de mantener la temperatura de la caja en valores razonables. En caso de detección de una temperatura en el interior de la caja mayor o igual a 35 °C, se activa el ventilador, el cual no se desactiva hasta que la temperatura descienda por debajo de los 30 °C dejando un rango de histéresis de 5°C, para evitar la puesta en marcha y parada continua del ventilador y por tanto un consumo exagerado.

Los datos recolectados por el sistema, tanto los datos GNSS como los datos ambientales, se envían utilizando sentencias NMEA (ver Sección 4).

El contenido de la caja de sensores (Fig. 9) consta de los siguientes elementos:

- Módulo solar fotovoltaico 8 W.
- Regulador PWM TECHNOSUN 14 A 12 Vdc.
- BeagleBoard.
- Batería de GEL AGM 12 Vdc 7Ah.
- Sensor de Humedad y temperatura.

Esta composición proporciona un sistema con funcionamiento autónomo y energéticamente autosuficiente.



Figura 9: Caja de sensores instalada.

### 3.2. Subconjunto luminaria

La luminaria utilizada en el prototipo presentado en esta comunicación se observa en la Figura 10. La diferencia



fundamental entre este prototipo y la luminaria con la que se está experimentando para la versión final de la tesis doctoral es que, a pesar de que las potencias son prácticamente iguales, la forma en que se entrega dicha potencia es muy diferente. La Tabla 1 contiene una comparativa entre las características energéticas de las dos luminarias.



Figura 10: Luminaria de Baja tensión.

Tabla 1: Comparativa entre la implementación del prototipo presentado en CIGeo 2021 y el prototipo final.

Prototipo	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
CIGeo	10	12	120
Final	0.25	500	125

A pesar de tener potencias muy parecidas, en el caso del prototipo final, esta potencia es entregada aumentando la energía potencial ( $V \times t$ ) y disminuyendo la energía cinética ( $I \times t$ ) al máximo. Este aspecto es de vital importancia, puesto que las pérdidas de energía siempre se producen por el calor que se desprende como consecuencia del movimiento de los electrones. A mayor corriente mayor es la cantidad de electrones que circulan por el conductor y los propios LEDs, aumentando así la energía disipada en forma de calor y no de intensidad lumínica.

### 3.3. Dispositivo IoT

El sistema empujado BeagleBoard Black dispone de un microprocesador principal o host Sitara AM335x ARM A8 a 1GHz y dentro de este, dos unidades PRU (AM335x PRU-ICSS Reference Guide, Programmable Real-Time Unit), también denominadas DSP (Digital Signal Processor) que son las que se encargan de gestionar el procesamiento de señales digitales. Estas dos unidades pueden ser directamente programadas de forma independiente del host, o a través del sistema operativo Linux. El conjunto forma un Mini PC embebido con sistema operativo Debian Linux.

Se ha considerado como plataforma ideal para este proyecto porque combina en un mismo chip la posibilidad de programar a alto y bajo nivel. El usuario de lenguajes de alto nivel como C, Python, e incluso JavaScript mediante Node, pueden desarrollar código como en cualquier entorno Linux. Sin embargo, esta placa permite además la posibilidad de programar microcontroladores directamente, ya sea con librerías en lenguaje C especializadas o incluso en lenguaje ensamblador, siendo esta una visión más cercana al hardware a bajo nivel, muy útil para usuarios con perfil de ingeniero electrónico.

El diseño de la BBB permite entradas y salidas digitales, entradas de interrupción, entradas analógicas y salidas PWM, cubriendo así todas las necesidades desde el punto de vista de la electrónica.

Esta placa se podría definir como una hibridación entre un sistema basado en microprocesador con otro basado en microcontrolador, es decir, se puede considerar como un sistema microcontrolado con capacidades de trabajo en tiempo real.

## 4. Recolección y transmisión de datos

Las operaciones de recolección y transmisión de datos se han llevado a cabo mediante varias piezas de software que permiten el intercambio de información entre los distintos componentes físicos del sistema descrito en secciones anteriores.

El origen de los datos son los dos sensores integrados en el sistema, el sensor GNSS (NEO-6 de U-BLOX) y el sensor de variables ambientales (DHT 11 Humidity & Temperature). Este sistema es asimilable a un nodo de nivel 3 (luminaria) en el esquema ramificado descrito anteriormente. Estos conjuntos de datos se transmiten a un nodo de nivel 2, equivalente a un gabinete de control en una red de iluminación real. En este trabajo, el nodo de nivel 2 consiste en un ordenador que actúa de intermediario con el espacio de almacenamiento final de los datos, o nodo de nivel 1. Este espacio de almacenamiento estaría en el dominio del centro de control en el diseño final y en el prototipo presentado aquí consiste en otro ordenador comunicado con el resto de nodos mediante una red Ethernet. En esta sección detallamos algunos aspectos del funcionamiento del conjunto.

El receptor GNSS es un modelo muy popular en muchas aplicaciones de electrónica *amateur*. Aunque se trata de un modelo de bajo coste, tiene la precisión suficiente para usarse en proyectos profesionales. Este receptor, como la mayoría de receptores de su categoría, proporciona una salida procesada estructurada en el protocolo de la National Marine Electronics Association (NMEA 1998). El protocolo NMEA define todos los aspectos técnicos de la transmisión de datos, desde la velocidad de transmisión recomendada, hasta el juego de caracteres utilizado o la terminología de uso para fabricantes. La información más relevante en este trabajo es la definición del formato de datos. En el formato NMEA, la información se transmite secuencialmente en fragmentos de texto denominados sentencias NMEA. Una sentencia está delimitada por un carácter inicial y dos caracteres finales. Entre estos delimitadores la información se estructura en campos separados por comas. Algunos campos están definidos con una longitud fija, aunque en general ésta puede ser variable. Es obligatorio que cada sentencia tenga un código de comprobación o *checksum* que es un campo especial situado al final de la sentencia y separado del resto de campos con un asterisco.

Un ejemplo de sentencia tomado de la publicación original (NMEA 1998) ayudará a entender el formato:

```
$GPGLL,5057.970,N,00146.110,E,142451,A*27
<CR><LF>
```

En este caso la etiqueta identificadora de la sentencia es GPGLL. Las sentencias transmitidas por receptores GPS/GNSS comienzan por las letras GP. En el caso

particular de la sentencia GPGLL, la información transmitida consta de las coordenadas geográficas latitud y longitud, la hora del cálculo de la posición y el estado del sistema. En este caso el código de verificación es 27 y está separado del resto de información con un asterisco.

Los delimitadores de la sentencia son el símbolo \$ al comienzo y los caracteres CR (retorno de carro) y LF (nueva línea) al final. Estos dos últimos caracteres no son imprimibles y por tanto son invisibles en un listado NMEA.

La comunicación entre el receptor GNSS integrado en la caja de sensores, y el ordenador que simula el nodo de nivel 2 es inmediata y se realiza a través del bus RS-485 compartido. En el nodo de nivel 2 existe un programa que recibe los datos transmitidos por el puerto serie y realiza una serie de transformaciones de formato con el objetivo de agrupar la información de la manera más adecuada para las posteriores etapas del procesamiento. Estos dos elementos fundamentales de la comunicación, el receptor GNSS y el nodo superior, se denominan *talker* y *listener* en terminología NMEA.

El software en ejecución en el nodo de nivel 2 consiste en un script Python que hace uso de un módulo llamado *nmea*, desarrollado específicamente para esta tesis doctoral. El módulo contiene funciones específicas para la decodificación de las sentencias NMEA originales y su transformación a otra estructura de datos basadas en diccionarios. En la versión actual únicamente es posible decodificar las sentencias GPGLL y GPGSV, que en realidad cubren las necesidades de posicionamiento requeridas. La sentencia GPGLL es similar a la GPGLL, pero contiene algunos parámetros interesantes como el HDOP y un indicador de calidad no presentes en esta última. Por su parte, la sentencia GPGSV contiene información sobre los satélites usados en el cálculo de las coordenadas que podría ser usada en etapas de postproceso.

El módulo *nmea* fusiona la información de las sentencias GPGLL y GPGSV y crea un diccionario intermedio con la información relevante. Este diccionario se procesa posteriormente para su almacenamiento en disco.

El sensor de temperatura y humedad también envía datos desde la caja de sensores hasta el nodo de nivel 2. En la Sección 3 se describió el mecanismo para compartir el mismo bus de datos entre los dos sensores. Sin embargo, este sensor no proporciona salida en formato NMEA, lo cual es un inconveniente a la hora de integrar la información de ambos sensores.

La solución que adoptamos fue crear una sentencia específica para transmitir datos ambientales. El propio estándar NMEA proporciona un esquema para crear este tipo de sentencias, llamadas sentencias propietarias, de modo que un fabricante pueda poner a disposición del usuario final toda la información relevante de su dispositivo (NMEA 1998).

Las etiquetas de las sentencias propietarias comienzan por la letra P y van seguidas de tres caracteres que identifican al fabricante del equipo y uno o varios caracteres finales que identifican el tipo de información contenida en la sentencia. En el equipo descrito en esta comunicación creamos una sentencia para la transmisión de los valores de temperatura y humedad del interior de

la caja de sensores, junto con el estado del ventilador. Un ejemplo de la sentencia propietaria es el siguiente:

```
$PTSNE,32.2,45,OFF*23<CR><LF>
```

Donde, siguiendo la recomendación del estándar, P indica sentencia propietaria, TSN es la abreviatura del nombre Technosun y E indica valores de parámetros ambientales. El significado de los campos es trivial, conteniendo valores de temperatura y humedad relativa de 32.2°C y 45% respectivamente, junto con el estado del ventilador que en este caso está desactivado. La sentencia se completa con el código de control o checksum y los terminadores de registro estándar.

La creación de la sentencia propietaria se lleva a cabo en tres fases. En primer lugar, se obtienen los valores numéricos en crudo y se convierten a variables de algún tipo válido del lenguaje C, lo que permite generar la sección de sentencia situada a la izquierda del asterisco. A continuación, se calcula el código de verificación con una función específica para tal fin. Finalmente, se añade el código calculado junto con los terminadores y la sentencia se envía por el bus compartido.

Las sentencias propietarias se intercalan entre las sentencias propias del receptor GNSS. Para ello, el microcontrolador del nodo final suspende temporalmente la salida procedente del receptor y envía la sentencia propietaria descrita anteriormente (ver Sección 3.1). En las pruebas que hemos realizado no se produce ninguna pérdida de datos importante, aunque a veces puede llegar alguna sentencia del receptor GNSS incompleta o con caracteres inservibles. En ese caso, el módulo de procesamiento NMEA ignora las sentencias corruptas.

La última etapa en el procesamiento de los datos procedentes de los sensores es el almacenamiento físico. Esta tesis se desarrolla en el contexto de las llamadas ciudades inteligentes y hemos optado por utilizar una plataforma especialmente creada para tales entornos llamada FIWARE (EC 2017; García 2015). Se trata de una plataforma respaldada por la Unión Europea que nació a partir de una iniciativa público-privada para definir nuevas estrategias de emprendimiento alrededor de conceptos como los datos abiertos, las ciudades inteligentes o la Internet del futuro.

FIWARE se distribuye bajo el esquema de código abierto y consta de varios componentes que, a su vez, son ejemplos conocidos de la filosofía del código abierto. Un punto fundamental del sistema es su facilidad de uso, basada en un estándar universalmente aceptado hoy día como el protocolo HTTP (Fielding *et al.* 1999).

FIWARE tiene dos componentes principales. El primer componente se denomina Orion y es un intermediario que se encarga de comunicar los usuarios con el espacio de almacenamiento. El segundo componente es MongoDB (Hows *et al.* 2014), una base de datos NoSQL que se adapta perfectamente a las necesidades de escalabilidad y flexibilidad de una ciudad inteligente.

La instalación típica se basa en el uso de contenedores mediante Docker (Spencer 2016), aunque no es necesario usar este entorno para desplegar FIWARE. La instalación con Docker permite una gestión ágil de la plataforma y una resolución de problemas adecuada.

El almacenamiento en FIWARE se realiza desde el módulo *nmea* reseñado en esta misma sección. El



mecanismo consiste en la ejecución de una función que toma como entrada los diccionarios intermedios creados a partir de la combinación de las sentencias NMEA procedentes del receptor GNSS y devuelve la información en el formato NGSI-LD (Privat 2021) utilizado por FIWARE.

Este formato se basa en un esquema JavaScript Object Notation (JSON) con una serie de requerimientos en cuanto al nombre y estructura de los campos. La transformación consiste básicamente en reformatear los diccionarios intermedios a cadenas JSON y enviarlos a Orion mediante una petición POST del protocolo HTTP.

Existen dos campos obligatorios en FIWARE llamados "id" y "type". El campo id debe ser único y tiene estructura URN (*uniform resource name*), con campos separados por el símbolo dos puntos (":"). Un ejemplo de las pruebas realizadas es el siguiente:

```
"urn:ngsi-
ld:Technosun:001:GeolocationNMEAObserved:
2021-05-10T13:58:52.00Z"
```

Este identificador se representa en realidad en una sola línea; en este caso se divide en dos líneas debido a limitaciones de formato de texto.

Los dos primeros campos del identificador, urn y ngsi-ld son estándar, mientras que el resto los define el usuario para garantizar un identificador único. El tercer campo representa la empresa donde se desarrolla la tesis doctoral. El cuarto campo es el identificador de la luminaria. El quinto es el tipo de la entidad FIWARE y por último se añade la fecha y hora de cálculo de las coordenadas. Este campo procede de las sentencias NMEA procesadas y está expresado en tiempo UTC.

El otro campo obligatorio en cualquier entidad FIWARE es type. Este campo se define por el usuario y debe ser único en el dominio de la aplicación. En este trabajo hemos elegido el tipo "GeolocationNMEAObserved", que como hemos visto también se incluye por convenio en el identificador de las entidades.

El resto de campos que componen la entidad FIWARE son definidos por el usuario, mediante un nombre, un tipo y un valor encapsulados en una subcadena JSON. También es posible añadir metadatos a cada campo de la entidad. Un ejemplo de subcadena JSON para almacenar la latitud es el siguiente (la cadena se ha tabulado y separado en líneas para su mejor representación):

```
"lat": {
  "type": "Float",
  "value": 39.517173833,
  "metadata": {}
}
```

La concatenación de los campos "id", "type", "lat" y el resto de información forman una entidad FIWARE típica en formato JSON.

El resultado inmediato de las pruebas realizadas hasta ahora es el posicionamiento de la caja de sensores. La Figura 11 muestra la posición del dispositivo obtenida en las primeras pruebas del sistema sobre una imagen aérea.



Figura 11: Posicionamiento de la caja de sensores.

## 5. Conclusiones

El trabajo presentado en esta comunicación ha permitido crear una aproximación cercana al prototipo final, así como la verificación de la solidez de los principios sobre los que se implementará el sistema completo.

Las pruebas realizadas hasta ahora han sido muy satisfactorias demostrando que el sistema es estable, tanto desde el punto de vista hardware como software.

La incorporación a cada nodo de un sistema de geolocalización basado en receptores GNSS, abre un nuevo camino en la georreferenciación de los componentes de la ciudad inteligente. Asimismo, el sistema de comunicación utilizado para la transmisión de datos constituye una infraestructura consistente que añade nuevas posibilidades, no solo para funciones de georreferenciación de los elementos que conforman el sistema, sino también para poder suministrar servicios geolocalizados a terceros en un futuro.

Por otra parte, la utilización de las energías renovables nodo a nodo presenta un ahorro importante del uso de energía eléctrica proveniente de fuentes convencionales no renovables.

Por último, otro aspecto de diseño importante es el uso de corriente continua, en contraposición al uso habitual de corriente alterna, y particularmente la forma en que se transporta ésta a alta tensión, consiguiendo disminuir la corriente que fluye por las líneas y por tanto minimizando las pérdidas en el transporte.

## Agradecimientos

El trabajo presentado en esta comunicación ha sido parcialmente financiado por la Agència Valenciana de la Investigació (AVI) mediante la concesión de la ayuda INNTA3/2020/26 del Programa Promoción del talento L3, doctorandos empresariales (Innodocto).

También quiero agradecer a TECHNOSUN S.L.U., y en especial a los CEOS Antonio Ramos Beneyto y Toni Ramos Sánchez por la confianza depositada tanto en esta tesis doctoral, como en mí mismo. Asimismo, quiero agradecer la ayuda e ideas aportadas por el Ingeniero Eléctrico Jesús Saiz Crespo, compañero de trabajo en TECHNOSUN S.L.U.

## References

- ALBINO, V., BERARDI, U., and DANGELICO, R.M., 2015. Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, **22**, pp. 1-19.
- JOULE, J.P., 1884. *The scientific papers of John Prescott Joule*. London: The Physical Society of London, 657 pages.
- EC., 2017. *Breaking the mould: A new model for EU innovation programmes*. Brussels: European Comission, 72 pages.
- FIELDING, R., GETTYS, J., MOGUL, J.C., FRYSTYK, H., MASINTER, L., LEACH, P. and BERNERS-LEE, T., 1999. *Hypertext Transfer Protocol - HTTP/1.1*. Washington DC: The Internet Society. 114 pages.
- HOWS, D., MEMBREY, P., and PLUGGE, E., 2014. *MongoDB basics*. New York: APRESS, 120 pages.
- GARCÍA, M., 2015. *New businesses around open data, smart cities and FIWARE*. Brussels: European Public Sector Information (EPSI) Platform. 30 pages.
- NMEA., 1998. *NMEA 0183 Standard for interfacing marine electronic devices*. Version 2.30. New Bern: National Marine Electronics Association. 81 pages.
- PRIVAT, G., 2021. Guidelines for modelling with NGSI-LD. ETSI White Paper No. 42. Nice: European Telecommunications Standards Institute. 54 pages.
- PÉREZ, J.L., 2019. *El poshumanismo. Los derechos de los seres vivos. La naturaleza y la humanidad en el Horizonte 2050*. Madrid: Instituto Español de Estudios Estratégicos. 46 páginas.
- SPENCER, A., 2016. *Docker: The complete beginners guide to start with Docker*. Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform. 44 pages.

## POTENTIAL OF CORONA SATELLITE IMAGERY FOR 3D RECONSTRUCTION OF ARCHAEOLOGICAL LANDSCAPES

### POTENCIAL DE LAS IMÁGENES SATELITALES CORONA PARA LA RECONSTRUCCIÓN 3D DE PAISAJES ARQUEOLÓGICOS

Jorge Angás<sup>a,\*</sup>, Paula Uribe<sup>b</sup>, Manuel Bea<sup>b</sup>, Mercedes Farjas<sup>a</sup>, Enrique Ariño<sup>c</sup>, Verónica Martínez-Ferrerías<sup>d</sup>, Josep María Gurt<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, Autovía de Valencia km. 7, 28031 Madrid, Spain. [j.angas@usal.es](mailto:j.angas@usal.es); [m.farjas@upm.es](mailto:m.farjas@upm.es)

<sup>b</sup> Departamento de Ciencias de la Antigüedad, Universidad de Zaragoza, C/ Corona de Aragon 12, 50019 Zaragoza, Spain. [uribe@unizar.es](mailto:uribe@unizar.es); [manubea@unizar.es](mailto:manubea@unizar.es)

<sup>c</sup> Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología, Universidad de Salamanca, C/ Cervantes s/n, 37002 Salamanca, Spain. [argil@usal.es](mailto:argil@usal.es)

<sup>d</sup> Department of Ancient History and Archaeology, University of Barcelona, Carrer de Montalegre 6-8, 08001 Barcelona, Spain. [vmartinez@ub.edu](mailto:vmartinez@ub.edu); [jmgurt@ub.edu](mailto:jmgurt@ub.edu)

#### Abstract:

This paper presents a preliminary use of satellite imagery from the CORONA program in the reconstruction of the archaeological landscape of two different sites: Ancient Termez (southern border of Uzbekistan) and Khatm Al Melaha (eastern coast of United Arab Emirates in Kalba area). This analysis constitutes the first step of the work carried out in the field since 2018 at both sites for an analysis of the syntactic interoperability of multi-scale geospatial data for archaeological heritage. The aim of this work was to establish an approach for the use of CORONA satellite imagery for archaeological DEM reconstruction. The objectives of the reconstruction were conditioned for different reasons: in the case of Termez prior to the anthropic transformation of the site in the Soviet - Afghan War and in the case of Khatm Al Melaha prior to the urban, coastal and road transformation. The results have provided uneven data due to the characteristics of the existing imagery: mission, resolution, overlap, orography and different ground control point distribution. This methodology opens a door to the reconstruction of archaeological landscapes that have suffered evident deterioration for different reasons by means of historical aerial imagery in the last 60 years, practically, in some cases, as a primary and unique source for analysing this type of change from the past.

**Key words:** CORONA satellite program, archaeological landscape, Termez (Uzbekistan), Khatm Al Melaha (United Arab Emirates), multi-scale geospatial data, historical aerial photography

#### Resumen:

Este artículo presenta un uso preliminar de imágenes satelitales del programa CORONA en la reconstrucción del paisaje arqueológico de dos yacimientos diferentes: la Antigua Termez (frontera Sur de Uzbekistán) y Khatm Al Melaha (costa Este de los Emiratos Árabes Unidos en la zona de Kalba). Este análisis constituye el primer paso del trabajo realizado en campo desde 2018 en ambos yacimientos para un análisis de la interoperatividad sintáctica de datos geoespaciales multi-escala para el patrimonio arqueológico. El objetivo de este trabajo ha sido establecer una aproximación sobre el uso de imágenes de satélite CORONA para la reconstrucción arqueológica del MDE. Los objetivos de la reconstrucción estuvieron condicionados por diferentes motivos, en el caso de Termez, previo a la transformación antrópica del yacimiento, por la guerra soviético-afgana y, en el caso de Khatm Al Melaha, previo a la transformación urbana, costera y red de carreteras. Los resultados han proporcionado datos desiguales debido a las características de las imágenes existentes: misión, resolución, solape, orografía y diferente distribución de puntos de control terrestres. Esta metodología abre la puerta a la reconstrucción de paisajes arqueológicos que han sufrido un deterioro evidente por diferentes motivos mediante imágenes aéreas históricas en los últimos 60 años, donde prácticamente en algunos casos, constituye una fuente primaria y única para analizar este tipo de cambios del pasado.

**Palabras clave:** programa satelital CORONA, paisaje arqueológico, Termez (Uzbekistán), Khatm Al Melaha (Emiratos Árabes Unidos), datos geoespaciales multiescala, fotografía aérea histórica

### 1. Introduction

The use of aerial and terrestrial photogrammetric techniques for the reconstruction of different types of

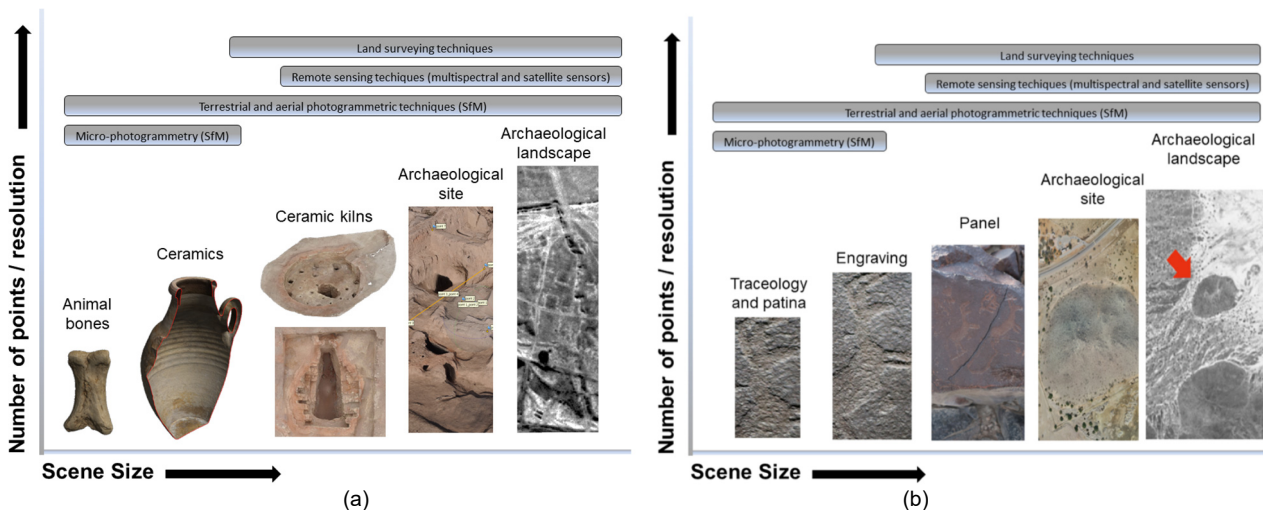
archaeological multi-scale is extremely useful. In the last ten years, the use and combination of 3D laser scanner data with photogrammetric techniques of automatic image correlation have been unified for the reconstruction

\* Corresponding Author: Jorge Angás, [j.angas@usal.es](mailto:j.angas@usal.es)

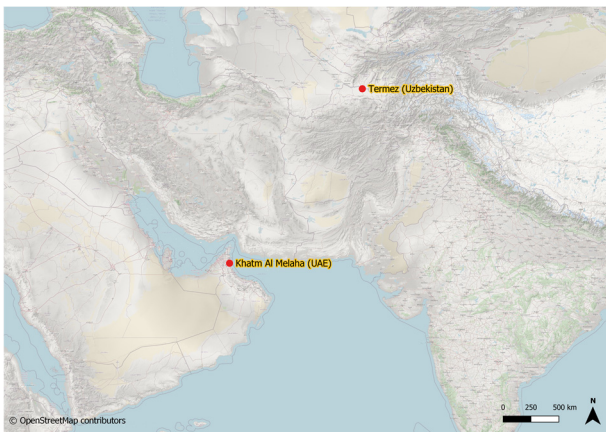
of Digital Cultural Heritage (DCH). Although it is true that there are different types of application scales, scanners have often not been applied either due to excessive cost or due to different types of magnitudes. Photogrammetric techniques applied to archaeology have been in development for the last 150 years (Stolze 1882) and their use is very varied, from microphotogrammetric techniques to the use of aerial imagery with different types of aircraft or satellite images for archaeological research, including landscape reconstruction (Sevara *et al.* 2018). If we must trace a beginning in the use of satellite imagery, the CORONA program from the 1960s provides information of great utility for the archaeological scientific community. The advantages of this program are its resolution of up to 1.8 meters, worldwide coverage and accessibility by means of National Archives and Records Administration (NARA). In this sense, the use of this program provides a very useful document to visualize the degree of deterioration that an archaeological site has suffered (Ur 2003; Altmaier and Kany 2002; Goossens *et al.* 2006). It is even more useful above all in those territories that have undergone a significant change in the last 60 years due to armed conflicts, changes in agriculture land use, urban sprawl, desertification, etc.

This preliminary study has used field data from the last five years for the reconstruction of two sites with different geospatial strategies that have undergone very significant changes in the archaeology of the landscape as presented in Figure 1 (Angás *et al.* 2019a; 2019b). In order to fill this gap in both sites, CORONA satellite imagery was processed, analysed and compared to historical and archaeological data. Although this paper will only focus on the historical landscape analysis part, its use relates to a multi-scale documentation strategy with the utilization of other types of documentation techniques.

The first site in this study is Ancient Termez (Uzbekistan). It is an important historical city on the Silk Road, located in the ancient Bactria region, that was founded after the campaigns of Alexander the Great in the late 4<sup>th</sup> century BC Yuezhi (Martínez *et al.* 2014; Gurt *et al.* 2015). This research requires macro-spatial approaches to accurately record all the archaeological structures and to evaluate the integration and evolution of the pottery workshops into the general topography of the city. As an alternative, the use of drones to reconstruct this area, previous to the Soviet-Afghan War, is not possible due to the location of the archaeological site close to the border area between Uzbekistan and Afghanistan (Fig. 2).



**Figure 1:** Geospatial multi-scale strategy documentation and the techniques used in each archaeological site: a) Termez; b) Khatm al Melaha. The CORONA satellite program is related to the last step and its relationship with the knowledge of the archaeological landscape.



**Figure 2:** Location of the archaeological sites studied in this work: Termez (Uzbekistan) and Khatm Al Melaha (UAE).

The second example, Khatm Al Melaha (Emirate of Sharjah, United Arab Emirates) is an archaeological site close to the southwest border with the Sultanate of Oman along the Gulf of Oman in Kalba area with a high concentration of open-air rock art engravings. More than 370 rock art engraved motifs, from different chronological phases, were documented on 149 stone blocks with different dimensions and morphologies, distributed along the slope of an isolated 58-metre-high elevation (Fig. 2).

## 2. CORONA satellite program

Despite finding powerful geospatial analysis at scale in archaeology, such as Picterra, the first aerial documentary sources with the greatest global coverage are still used as references today, such as the CORONA satellite program. It is a highly useful source of information due to its high resolution, overlap and worldwide coverage



in the study of archaeological landscapes of up to 60 years ago. This program replaced the U2 spy planes, which had a much more limited coverage and were also used for historical aerial photography for archaeological purposes (Hammer and Ur 2019). Although President Eisenhower approved the CORONA satellite program in February 1958, the beginning of its use was from the incident on 1 May 1960 when U2 spy plane was shot down by the Soviet Air Defence Force. From this moment CORONA was developed until 1972 with different missions and different resolutions. The stereoscopic images of this program allow the partial reconstruction of archaeological landscapes which in some cases have been lost.

On May 24, 1995, the Central Intelligence Agency and National Air & Space Museum began the declassification of over 800,000 images taken under the CORONA satellite reconnaissance program by the United States in the 60s and 70s during the Cold War from the CORONA programs (KH-1 through KH-3 -CORONA-, KH-4, 4a, 4b -MURAL-, KH-5 -ARGON-, KH-6 -LANYARD-). The importance of the CORONA program is key in satellite history since it involved a number of precedents - the first photo-reconnaissance satellite in the world, the first mid-air recovery of a vehicle returning from space, the first mapping of Earth from space, the first stereo-optical data from space, the first multiple reentry vehicles from space, the first reconnaissance program to fly a hundred missions and the first reconnaissance satellite program to be declassified. The declassification process provided material which was potentially valuable for territorial analysis and interest element detection thanks to the spatial resolution obtained from the continuous satellite improvement. However, the declassification process did not include additional information related to the cameras used nor to the satellite position at the image capture time. Because of that, using these images in a photogrammetrically or a visual analysis based on its digital treatment context is very difficult. Nevertheless, CORONA imagery is one of the best alternatives for images and cartographic resources lacking in places where it has not been developed for different reasons.

The CORONA program was declassified in three different periods (1996, 2002, 2013) with some exceptions:

- Declass 1 (1996) = Corona, Lanyard, & Argon Missions - KH1 thru KH6: 1960 – 1972.
- Declass 2 (2002) = KH-7 and KH-9 Global Camera Photos: 1963 – 1980.
- Declass 3 (2013) = USGS Subset of Hexagon Missions - KH-9: 1971 – 1984.

The imagery provided by the CORONA program has been widely used in recent years in different fields such as urban sprawl, disaster risk (Fekete 2020), geomorphology, land-use, coastline and forest cover change, DEM reconstruction (Galiatsatos 2004; Galiatsatos *et al.* 2008; Schmidt *et al.* 2001) and cultural heritage (Watanabe *et al.* 2017). Although on many occasions it is not sufficiently clear what the data processing flow has been with respect to the results obtained.

### 3. Fieldwork

The fieldwork activities represent the fundamental part both in the acquisition of multi-scale data and in the subsequent verification of the results.

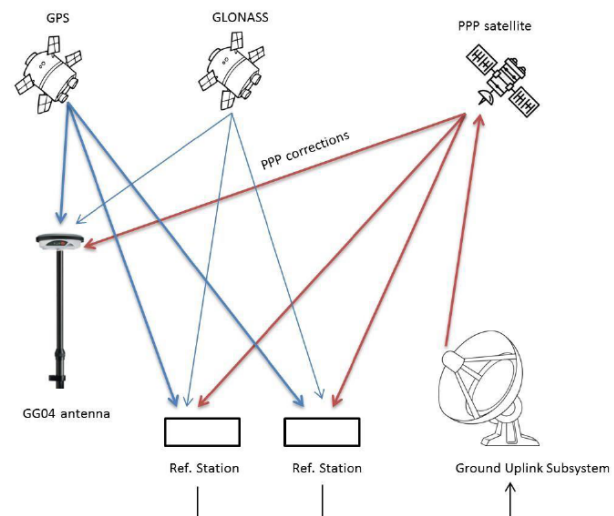
Each archaeological site has undergone different treatment and the documentation has been adapted to these idiosyncrasies.

The coordinate systems used are the following:

- Termez = EPSG: 3857 WGS84.
- Khatm al Melaha = EPSG 32640 UTM zone 40N EPSG:32640.

The common elements between fieldwork activities and images have been to take current benchmarks that have lasted for at least 50 years on the ground. These can be synthesised in old constructions, irrigation channels and any easily identifiable singular elements on the ground that have lasted until today.

Following the above indications, different types of Ground Control Points (GCPs) have been taken with a GNSS combination between Leica GNSS1200 static mode and Leica Zeno GG04, with a precise global positioning system: Precise Point Positioning (PPP) with Spot Prime subscription service, which provides great versatility with an approximate error of 15 centimeters and a convergence time of 20 minutes. The great advantage of this system is that it provides us with real-time high accuracy positioning in regions without an Internet connection, reference network or a local reference station as presented in Figure 3.



**Figure 3:** Precise Point Positioning Infrastructure used in GCPs strategy.

However, this system has some limitations in the Spot service. The Precise Point Positioning satellites are geostationary and therefore it is possible to acquire at least one satellite almost anywhere in the world. Nevertheless, obstructions may occur that prevent a correct calculation or the complete loss of satellite signal for which it is necessary to restart the whole process.

### 4. Methodology

Once the Ground Control Points have been obtained either by surveying PPP techniques or by means of a selection strategy of those common elements between the CORONA imagery and their current presentation, the corresponding images have been downloaded and classified (Fig. 4).

Entity ID	Date	Mission	Camera Resolution	Image and film type	Stereo	Stereo type	GSD Nadir	Used for
DZB00403800056H011001	08/06/1967	4038	KH-7 High Resolution Surveillance	Black and White, 9 inch by variable	No		0,60 m.	Archaeology interpretation
DS1029-2102DF114	09/02/1966	1029-2	Stereo Medium	Black and White, 70mm Panoramic	Yes	Forward	2,7 m.	Archaeology interpretation
DZBI210-500127L011001	12/07/1975	1210-5	KH-9 Lower Resolution Mapping	Black and White, 9 inch	No		6 m.	Archaeology interpretation
DS1012-1039DA163	20/10/1964	1012-1	Stereo Medium	Black and White, 70mm Panoramic	Yes	Afterward	2,7 m.	Photogrammetry and Archaeology interpretation
DS1012-1039DF157	20/10/1964	1012-1	Stereo Medium	Black and White, 70mm Panoramic	Yes	Forward	2,7 m.	Photogrammetry and Archaeology interpretation
DS1021-2087DA004	24/05/1965	1021-1	Stereo Medium	Black and White, 70mm Panoramic	No	Afterward	2,7 m.	Archaeology interpretation
DS1031-2167DF155	18/04/1966	1031-2	Stereo Medium	Black and White, 70mm Panoramic	Yes	Forward	2,7 m.	Archaeology interpretation

Figure 4: Example of classification of declassified CORONA images that have been used for the Termez site.

Data can be accessed from the USGS EROS Archive through the National Archive Records and Administration (NARA) (Table 1). Each zone corresponds to different missions, film acquisition periods and ground resolution (Figs. 4 and 5).

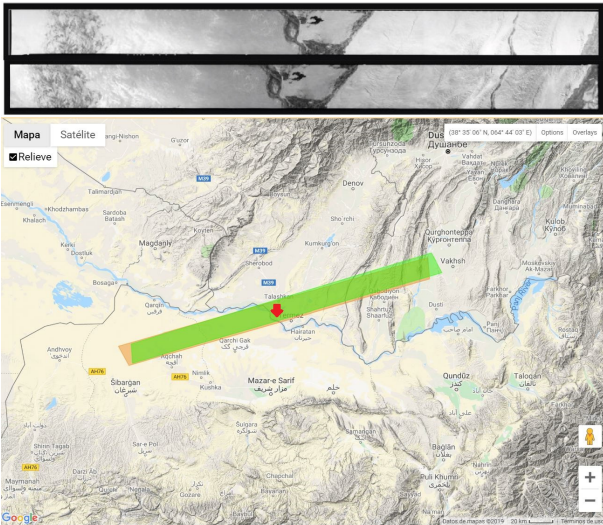


Figure 5: Stereoscopic imagery used in Ancient Termez: DS1012-1039DA163 and DS1012-1039DF157 (above) and their footprints (green and orange) on the ground (below) (USGS-EarthExplorer).

Once the different images had been downloaded, the specific area was cut for processing in the Agisoft Metashape software following the classic workflow:

1. Alignment of photos.
2. GCP identification.
3. Construction of dense point cloud.
4. Construction of digital elevation model.

5. Exporting of results in the coordinate system selected.

The use of this software for archaeological purposes has already been used with CORONA imagery (Watanabe et al. 2017). In both cases the mean of ground control points used were 50.

Table 1: Table example of the initial exterior orientation parameters of the images.

Image	DS1012-1039DA163	DS1012-1039DF157
X <sub>0</sub>	7.477.170 m	7.489.300 m
Y <sub>0</sub>	4.485.140 m	4.490.290 m
Z <sub>0</sub>	185.000 m	185.000 m
Yaw	244°	244°
Pitch	-16, 375°	-16, 375°
Roll	0°	0°

### 5. Results

The reconstruction of the Ancient Termez site could not be completed due to the failure in obtaining an old DEM from the CORONA imagery at our disposal (Bellido 2018). However, we were able to reconstruct the current site thanks to the DEM generated from the interpolation of points with altitudinal data extracted from the level curves in the relief map of the site in Ancient Termez (Pidaev 2001; Leriche 2001). Finally, the orthoimage obtained could be projected onto the mesh by unwrapping the UV coordinates with the Blender software. The mapping of this type of coordinates consists of unwrapping the mesh to cover a 3D object with a 2D texture (Fig. 6).



(a)



(b)

Figure 6: Comparison between images: a) CORONA results processed with Metashape software and some GCPs; b) web mapping with different layers to draw hypothetical buried archaeological structures.

As to the archaeological interpretation, the photointerpretation has been carried out based mainly on the final orthophoto, which has also been georeferenced and tiled for the Leaflet library. In terms of the visual improvement in order to identify the archaeological remains, the best results were obtained with the Simple Local Relief Model. This algorithm is based on eliminating the most notable morphological elements to reveal the smallest scale record (Kokalj and Hesse 2017).

In contrast, the processing of the Kalba area has been able to calculate the DEM with practically the same number of GCPs and the same resolution of the images as the previous site (Fig. 6). The difference between the two large groups of images are the orographic differences in the two sites that produce a better contrast. In the case of Kalba, the final Z error has been higher due to the height difference between the coastal zone and the mountain range, with an approximate slope difference of 500 meters (Table 2).

**Table 2:** Processing errors and final resolution obtained.

Archaeological Site	Final X error (m)	Final Y error (m)	Final Z error (m)	Final resolution (m)
Ancient Termez	3.35	3.62	4.53	2.14
Kalba area	2.84	3.13	8.49	2.49

The reconstructed model in Figure 7 allows us to extract optimal routes from the interior to the coast and above all to compare those areas (currently transformed) where there is a confluence of ravines and concentrations of engravings are likely to be found.

Finally, the results obtained have been uploaded to a new web platform that combines different types of information both in 2D through web mapping and in point clouds with different Potree-related libraries (Boutsi *et al.* 2019; Schütz 2016) to understand the geometry of each archaeological site. In the case of Termez, only the web mapping viewer has been incorporated with the orthophoto obtained in different layers, in order to be able to overlap the current satellite imagery together with the interpretive drawing of the archaeological structures buried (Fig. 6).

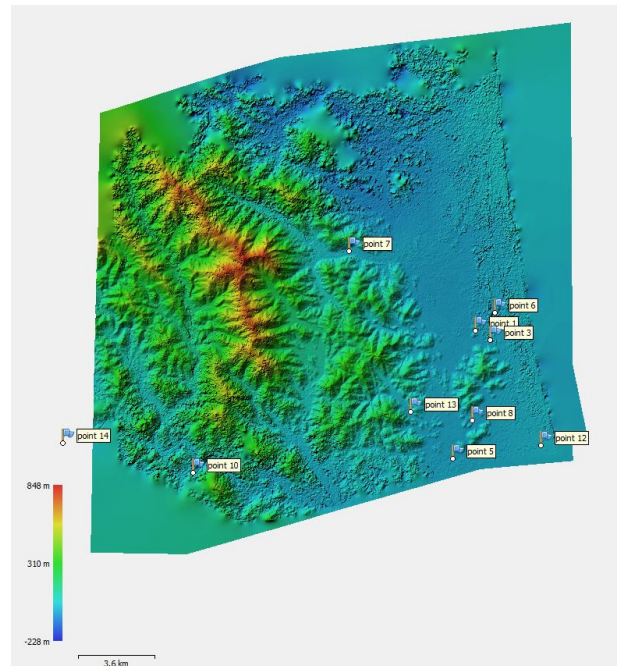
## 6. Conclusions

We have presented a preliminary workflow for the reconstruction of historical landscapes currently lost or modified. The findings have produced uneven results of which the use of this type of imagery cannot be generalised for all areas since this is dependent on the CORONA mission, number of images, overlaps, resolution and control points.

Precise Point Positioning GNSS method is valid but only in capturing a limited number of points for the re-convergence timeout should the signal be lost. Its combination with static GNSS systems has been useful.

Furthermore, this initial study demonstrates that the use of CORONA imagery represents a key source of information in archaeology since in many cases it is virtually the only one available for the reconstruction of the pre-war archaeological landscape or areas modified by

urban growth. The use of drones would have provided useful updated information on the current state of the site but would not have allowed the reconstruction of the archaeological landscape fifty years ago. The period from the late 1960s to the early 1970s precedes agricultural mechanisation and urban development and thus many of the sites studied at that time were well-preserved. Above all, it allows for comparing ground anomalies to corroborate buried archaeological structures. However, the spatial resolution and spectral amplitude does not allow a detailed study of archaeological structures of small dimensions.



**Figure 7:** Reconstructed digital elevation model of the Kalba area (UAE) with the GCPs used.

In spite of the great potential of the CORONA imagery, the difficulties involved in correcting their geometry to obtain adjusted spatial information means that it has not been possible to complete the DEM reconstruction of Ancient Termez (Uzbekistan). Likewise, the lack of relief in the area together with the quality of the imagery used have not contributed to the total reconstruction. This difficulty derives from a lack of auxiliary information which was excluded from the declassification process of 1995. The methodology applied here includes a series of auxiliary requirements in order to address this shortcoming in the case study.

In the second archaeological area located in Kalba (UAE), the application results have been satisfactory. In this sense, it has allowed us to reconstruct a digital elevation model for later comparison with the current model and verification of ravine crossings. Experience in this area shows us concentration of rock art engravings in this type of archaeological landscape.

However, in both archaeological sites, the data obtained will be verified on the field in future campaigns.

As to the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) failing to include auxiliary data in the declassification process of the CORONA imagery, this is an issue that should be debated as this information would clearly help



the scientific community in the use of these images (Galiatsatos 2004; Goosens et al. 2006; Hamandawana et al. 2007; Wierzbicki et al. 2015). Firstly, information on these images and their use would grow exponentially especially in the field of remote sensing, where the processes associated with photogrammetry are not particularly advanced despite being closely related. However, the auxiliary information used throughout the CORONA program to identify common elements is not likely to be compatible with the new technological tools for a camera's interior orientation and the exterior orientation of images in space.

### Acknowledgements

The Termez project was supported by two R&D&I projects, CERAC (HAR2016-75133-C3-1-P) led by V.

Martínez and J.M. Gurt, and CONCERTAC (HAR2016-75133-C3-3-P) led by E. Ariño, all funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities. The Palarq Foundation supported the archaeological campaign in Termez in the year 2018. V. Martínez worked on this paper through the post-doctoral research contract Ramón y Cajal (RYC-2014-15789).

Research campaigns in Kalba area have been carried out thanks to the collaboration of SHARJAH ARCHAEOLOGY AUTHORITY (Emirate of Sharjah, United Arab Emirates). This work was developed within the project H2019/HUM-5742 AVIPES-CM (CAM-Comunidad de Madrid, Spain/ ESF-Fondo Social Europeo).

### References

- ALTMAYER, A., and KANY, C., 2002. Digital surface model generation from CORONA satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **564**, pp. 221-235. DOI: 10.1016/S0924-27160200046-1
- ANGÁS, J., JASIM, S. A., BEA, M., FARJAS, M., URIBE, P., LANAU, P., and OTERO, X., 2019a. Rock Art recording in Khatm al Melaha (United Arab Emirates): multirange data scanning and web mapping technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLII-2/W15**, pp. 85-92. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-85-2019
- ANGÁS, J., URIBE, P., ARIÑO, E., GURT, J. M., MARTÍNEZ-FERRERAS, V., and PIDAEV, S., 2019b. A multi-scalar photogrammetric recording approach in Termez (Uzbekistan). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W15**, pp. 93–100. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-93-2019.
- BELLIDO, A., 2018. *Análisis del potencial de las imágenes del programa Corona a través de la reconstrucción del paisaje arqueológico del yacimiento de Termez (Uzbekistán)*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza.
- BOUTSI, A.-M., IOANNIDIS, C., and SOILE, S., 2019. Interactive online visualization of complex 3D geometries. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W9**, pp. 173-180. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-173-2019
- FEKETE, A., 2020. CORONA High-Resolution Satellite and Aerial Imagery for Change Detection Assessment of Natural Hazard Risk and Urban Growth in El Alto/La Paz in Bolivia, Santiago de Chile, Yungay in Peru, Qazvin in Iran, and Mount St. Helens in the USA. *Remote Sens.* **12**(19), pp. 3246. DOI: 10.3390/rs12193246
- GALIATSATOS, N., DONOGHUE, D. N. M., and PHILIP, G., 2008. High Resolution Elevation Data Derived from Stereoscopic CORONA Imagery with Minimal Ground Control: An Approach Using Ikonos and SRTM Data. *Photogrammetric engineering*, **14**.
- GALIATSATOS, N., 2004. *Assessment of the CORONA series of satellite imagery for landscape archaeology: a case study from the Orontes valley, Syria*, Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/281/>
- GOOSSENS, R., DE WULF, A., BOURGEOIS, J., GHEYLE, W., and WILLEMS, T., 2006. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archaeological Science*, **336**, pp. 745-755. DOI: 10.1016/j.jas.2005.10.010
- GURT ESPARRAGUERA, J. M., ARIÑO GIL, E., MARTÍNEZ FERRERAS, V., and PIDAEV, S. R., 2015. The Buddhist occupation of Tchingiz Tepe Termez, Uzbekistan in the Kushan period through the ceramic contexts. *Archaeological Research in Asia*, **3**, pp. 19-33. DOI: 10.1016/j.ara.2015.04.003
- HAMANDAWANA, H., ECKARDT, F., and RINGROSE, S., 2007. Proposed methodology for georeferencing and mosaicking Corona photographs. *International Journal of Remote Sensing*, **281**, pp. 5-22. DOI: 10.1080/01431160500104400
- HAMMER, E., and UR, J., 2019. Near Eastern Landscapes and Declassified U2 Aerial Imagery. *Advances in Archaeological Practice*, **7**(2), pp. 107-126
- KOKALJ, Ž., and HESSE, R., 2017. *Airborne Laser Scanning Raster Data Visualization. A Guide to Good Practice*. Ljubljana: Založba ZRC.
- LERICHE, P., 2001. Termez antique et médiévale. In P. Leriche, S.R. Pidaev, M. Gelin, K. Abdullaev and F. Fourniau ed., *La Bactriane au carrefour des routes et des civilisations de l'Asie centrale*, pp. 75–99. Maisonneuve and Larose, Paris.



- MARTÍNEZ FERRERAS, V., ARIÑO GIL, E., GURT ESPARRAGUERA, J. M., Aand PIDAEV, S., 2014. The Enclosure of Tchingiz-Tepe Ancient Termez, Uzbekistan during the Kushan and Kushan-Sassanian Periods. *Iranica Antiqua*, **49**, pp. 413–469. DOI: 10.2143/IA.49.0.3009247
- PIDAEV, S.R., 2001a. Contribution à l'histoire ancienne de Termez. In P. Leriche, S.R. Pidaev, M. Gelin, K. Abdullaev, F. Fourniau ed., *La Bactriane au carrefour des routes et des civilisations de l'Asie centrale*, pp. 47–57. Maisonneuve and Larose, Paris.
- PIDAEV, S.R, 2001b. Mosquées de quartier dans l'ancienne Tirmidh (Ouzbékistan). *Archéologie islamique*, pp.61-74.
- SCHMIDT, M., GOOSSENS, R., MENZ, G., ALTMAIER, A., and DEVRIENDT, D., 2001. The use of CORONA satellite images for generating a high-resolution digital elevation model. In IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. *Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Cat. No.01CH37217 Vol. 7*, pp. 3123-3125. Sydney, NSW, Australia: IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS.2001.978277
- SCHÜTZ, M., 2016. *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers*. Faculty of Informatics at the Vienna University of Technology.
- SEVARA, C., VERHOEVEN, G., DONEUS, M., and DRAGANITS, E., 2018. Surfaces from the Visual Past: Recovering High-Resolution Terrain Data from Historic Aerial Imagery for Multitemporal Landscape Analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **25**(2), pp. 611-642. DOI: 10.1007/s10816-017-9348-9
- STOLZE, F., 1882. *Persepolis, die achaemenidischen und sasanidischen Denkmäler und Inschriften von Persepolis, Istakhr, Pasargadae, Shāhpūr*, 2 vols., Berlin.
- UR, J. 2003. CORONA satellite photography and ancient road networks: A northern Mesopotamian case study. *Antiquity*, **77****295**, pp. 102-115.
- WATANABE, N., NAKAMURA, S., LIU, B., and WANG, N. 2017. Utilization of Structure from Motion for processing CORONA satellite images: Application to mapping and interpretation of archaeological features in Liangzhu Culture, China. *Archaeological Research in Asia*, **11**, pp. 38-50. DOI: 10.1016/j.ara.2017.06.001
- WIERZBICKI, D., KRASUSKI, K., and RYKACH, S. P. W. 2015. Estimation of rotation angles based on GPS data from a UX5 Platform. *Measurement Automation Monitoring*, **61**, pp. 516-520.

***CIGeo***

**Geodesy and Geophysics**  
*Geodesia y Geofísica*

## A DATA-INTENSIVE APPROACH TO EXPLOIT NEW GNSS SCIENCE OPPORTUNITIES

### EXPLOTACIÓN DE NUEVAS OPORTUNIDADES CIENTÍFICAS DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS) DESDE UNA PERSPECTIVA INTENSIVA EN DATOS

Vicente Navarro\*, Javier Ventura-Traveset

Navigation Science Office, European Space Agency, Camino Bajo del Castillo s/n, 28692 Villanueva de la Cañada, Spain.  
[vicente.navarro@esa.int](mailto:vicente.navarro@esa.int); [javier.ventura-traveset@esa.int](mailto:javier.ventura-traveset@esa.int)

#### Abstract:

With the current GNSS infrastructure development plans, over 120 GNSS satellites (including European Galileo satellites) will provide, already this decade, continuous data, in several frequencies, without interruption and on a permanent basis. This global and permanent GNSS infrastructure constitutes a major opportunity for GNSS science applications. In the meantime, recent advances in technology have contributed "de-facto" to the deployment of a large GNSS receiver array based on Internet of Things (IoT), affordable smart devices easy to find in everybody's pockets. These devices – evolving fast at each new generation – feature an increasing number of capabilities and sensors able to collect a variety of measurements, improving GNSS performance. Among these capabilities, Galileo dual band smartphones receivers and Android's support for raw GNSS data recording represent major steps forward for Positioning, Navigation and Timing (PNT) data processing improvements. Information gathering from these devices, commonly referred as crowdsourcing, opens the door to new data-intensive analysis techniques in many science domains. At this point, collaboration between various research groups is essential to harness the potential hidden behind the large volumes of data generated by this cyberinfrastructure. Cloud Computing technologies extend traditional computational boundaries, enabling execution of processing components close to the data. This paradigm shift offers seamless execution of interactive algorithms and analytics, skipping lengthy downloads and setups. The resulting scenario, defined by a GNSS Big Data repository with co-located processing capabilities, sets an excellent basis for the application of Artificial Intelligence / Machine Learning (ML) technologies in the context of GNSS. This unique opportunity for science has been recognized by the European Space Agency (ESA) with the creation of the Navigation Scientific Office, which leverages on GNSS infrastructure to deliver innovative solutions across multiple scientific domains.

**Key words:** GNSS, Cloud Computing, Artificial Intelligence, Internet of Things, Open Science, Geodesy

#### Resumen:

Con los planes actuales de desarrollo de la infraestructura GNSS, más de 120 satélites GNSS (incluidos los satélites europeos Galileo) proporcionarán, ya en esta década, datos continuos, en varias frecuencias, sin interrupciones y de forma permanente. Esta infraestructura GNSS global y permanente constituye una gran oportunidad para las aplicaciones científicas de GNSS. Mientras tanto, avances recientes han contribuido al despliegue de una red GNSS paralela basada en la Internet de las Cosas (IoT), asequibles dispositivos inteligentes fáciles de encontrar en todos los bolsillos. Estos dispositivos, que evolucionan rápidamente con cada nueva generación, acumulan un número creciente de funcionalidades y sensores capaces de recopilar una gran variedad de mediciones. Entre estas funcionalidades, los receptores de teléfonos inteligentes de banda dual Galileo y el soporte Android para la grabación de datos GNSS sin procesar representan pasos especialmente relevantes. La recopilación de información mediante estos dispositivos, comúnmente conocida como crowdsourcing, abre la puerta a nuevas técnicas de análisis de datos en múltiples dominios científicos. Llegados a este punto, la colaboración entre diversos grupos de investigación resulta esencial para aprovechar el potencial que se esconde en los grandes volúmenes de datos generados por esta ciberinfraestructura. Las tecnologías de *Cloud Computing* extienden los límites computacionales tradicionales permitiendo la ejecución de componentes de procesamiento cerca de los datos. Este cambio de paradigma ofrece una rápida ejecución de algoritmos y análisis interactivos, omitiendo largas descargas y configuraciones. El escenario resultante, definido por un repositorio GNSS Big Data con capacidades de procesamiento acopladas, establece una base excelente para la aplicación de tecnologías de Inteligencia Artificial / Aprendizaje Automático (ML). Esta oportunidad única para la ciencia ha sido reconocida por la Agencia Espacial Europea (ESA) con la creación de la Oficina Científica de Navegación, que aprovecha la infraestructura GNSS para ofrecer soluciones innovadoras en múltiples dominios científicos.

**Palabras clave:** GNSS, *Cloud Computing*, Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas, Ciencia Abierta, Geodesia

---

\* Corresponding Author: Vicente Navarro, [vicente.navarro@esa.int](mailto:vicente.navarro@esa.int)

## 1. Introduction

Over an estimated 175 zettabytes of data produced in the world, connected smart devices forming the Internet of Things (IoT) are expected to carry out 80% of the data processing and analysis by 2025 (EC 2020). This computational model close to the user ('Edge Computing') nicely complements centralised facilities ('Cloud Computing') to enable new science opportunities offered by Crowdsourcing, where citizens become distributed observatories ('Citizen Science').

Simultaneously, in the GNSS arena, Space and Ground Segments of all major players (Galileo, GPS, Beidou and Glonass) will undergo continuous upgrades leading to new features and increased levels of reliability, precision and accuracy. On the user segment side, in addition to advancements in professional GNSS receivers, an extremely dynamic IoT mass-market led by smartphones, steadily delivers technological breakthroughs in terms of chipset miniaturisation (Sony 2020), multi-constellation multi-frequency, power efficiency or data processing (Diggelen 2021).

Therefore, the scenario depicted by the all-weather, long-term, stable, high quality, worldwide GNSS physical infrastructure and the intrinsic characteristics of their signals presents a unique opportunity for science interests.

As already happened with TRANSIT, which leveraged on Doppler based navigation discovered while tracking Sputnik, in the era of Big Data and Machine Learning (ML), the continuous flow of data generated by GNSS signals from GNSS satellites offers a research value that breaks original boundaries defined by positioning, navigation and timing (PNT) services.

The ubiquity of both, GNSS signals and GNSS-enabled IoT receivers, has reached a situation where scientists devise situations where unavailability of GNSS signals represents a source of information that, properly processed, can support generation of 3D city models (UCL 2021).

Nevertheless, full realisation of the scientific potential of GNSS systems as a signal of opportunity (SOOP) demands extensions to current approaches for data processing, recording and product generation. Among these extensions, long-term preservation and systematic recording of GNSS signal digitized intermediate frequency (LaChapelle and Broumandan 2016; Navarro *et al.* 2019) represents a key aspiration to achieve fine grain information resolution and re-processing capabilities demanded for innovative science use cases.

In addition to the technical challenges derived from high data volumes and processing requirements, effective scientific exploitation involves efficient collaboration across different research groups working together towards a common goal. For this purpose, complex cyberinfrastructures, commonly known as Thematic Exploitation Platform (Navarro *et al.* 2019; Nikutta *et al.* 2020,) foster the creation of essential synergies regarding data discovery, access and analysis.

## 2. GNSS Signal Fundamentals

GNSS signals contain all required information to continuously estimate satellite to receiver travelling time

and satellite coordinates. Methods and algorithms behind these signals are well known and ample literature is available (Sanz *et al.* 2013). Three main components define the core characteristics of GNSS signal definition and processing:

- **Carrier:** Radio frequency sinusoidal signal.
- **Ranging code:** binary sequences allowing calculation of radio signal travel time. They are known as Pseudo-Random Noise (PRN) sequences, PRN codes or spreading codes.
- **Navigation data:** binary sequence providing ancillary information on satellite ephemeris, clock bias, almanac, satellite health status, ionosphere data and other complementary information.

These main components aim to support the two key target measurements in object of GNSS signal processing, pseudorange and carrier phase measurements, which can be defined as in Eq. (1):

$$P = cd\tau = \rho + d_\rho + c(dt-dT) + d_{trop} + d_{ion} + \epsilon_{mp} + \epsilon_p \quad (1)$$

$$\Phi = \rho + d_\rho + c(dt-dT) + \lambda N + \lambda w - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_{m\Phi} + \epsilon_\Phi$$

Where:

$P$  = Code (or pseudorange) measurement

$\Phi$  = Carrier phase measurement

$dt$  = time of transit of signal  $\tau$

$c$  = speed of light in vacuum

$\rho$  = geometric range

$d_\rho$  = orbital errors

$dt$  = satellite clock offsets

$dT$  = receiver clock offsets

$d_{ion}$  = ionospheric delay

$d_{trop}$  = tropospheric delay

$\epsilon_{mp}$  = code multipath noise

$\epsilon_p$  = code receiver noise

$\lambda$  = frequency wavelength

$N$  = integer ambiguity

$\lambda w$  = wind-up effect

$\epsilon_{m\Phi}$  = phase multipath noise

$\epsilon_\Phi$  = phase receiver noise

As introduced by Eq. (1), multiple sources of errors affect both measurements in different ways and orders of magnitude. Fortunately, the vast experience accumulated over years of operations in GNSS systems, has led to the development of multiple signal and data processing techniques able to provide very good estimates for the contribution of each error under most common circumstances.

Nevertheless, a closer look at the extremely high precision expected from one of the GNSS basic observables, the time of transit of signal  $\tau$ , highlights the difficulty of this endeavour. As a convenient approximation, following rule of thumb provides an idea of



GNSS sensibility with regard to time alterations. Taking into account that the theoretical maximum resolution from code is about 1 percent of the spreading code chipping rate, 1 nanosecond delay would imply 30 cm for Precision code (P-code) and for Coarse/Acquisition code (C/A code), due to its x10 lower chipping rate, it would imply 3 meters.

Therefore, this landscape has triggered the creation of a large human and physical infrastructure aiming at the precise categorisation and understanding of all different elements that contribute to signal disturbances.

### 3. GNSS Infrastructure Fundamentals

GNSS infrastructure does not differ in its organisation from other space missions, featuring the traditional three segments split:

- *Space Segment*: it comprises the satellites in charge of transmitting carrier, ranging code and navigation data elements previously presented.
- *Ground Segment*: it carries out continuous monitoring and update to ensure overall stability and availability of the system.
- *User Segment*: it comprises the community of users making use of GNSS receivers.

The level of maturity and adoption reached by GNSS systems allows this infrastructure to feature uncommon characteristics in space missions, namely, cost-effectiveness, with satellites created in batches, excellent spatial-temporal resolution in all three segments, and public, free of charge accessibility.

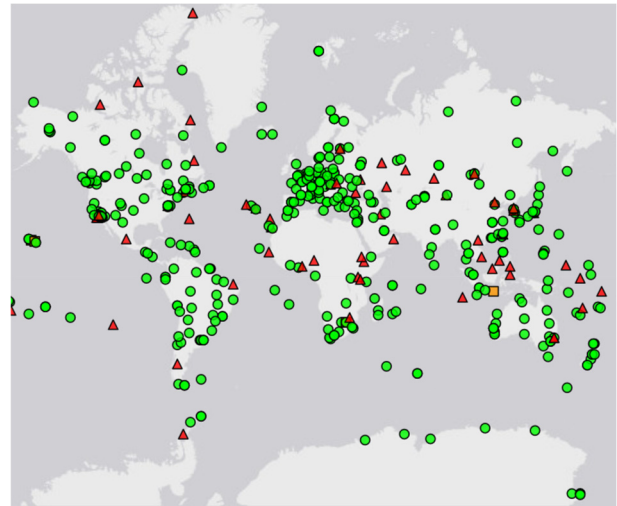
When it comes to GNSS infrastructure, it is important to distinguish between global and Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS). The latter have many similarities and even share elements with global systems, complementing them to provide higher accuracy in limited areas for a restricted number of users. This restriction makes SBAS less relevant for data crowdsourcing purposes, moving the focus to the four global constellations currently available, Galileo (Europe), GPS (USA), Beidou (China) and GLONASS (Russia).

Along the lines of data crowdsourcing, we will zoom-in to the user segment, where we can differentiate between professional and recreational groups depending on their utilisation of the GNSS signal. The first group gathers industrial and research organisations in navigation related domains. The second group represents end-users making use of GNSS for daily activities.

While not formally part of the ground segment, the first group is an essential active contributor to the scientific relevance of GNSS. More specifically, operated as a service of the International Association of Geodesy (IAG), the International GNSS Service (IGS) has been providing free and open access to high-precision GNSS data and products for twenty-five years already.

Initially focused on the delivery of the IGS core reference frame, orbit, clock and atmospheric products, over the years IGS is evolving into a multi-GNSS service as more sites expand core IGS network (500 stations approx.).

IGS operations entails data collection, archiving and dissemination of observation data sets from contributing global networks of tracking stations (Fig.1).



**Figure 1:** IGS Core Network, data received within last 10 days (green), last 30 days (orange), unhealthy (red). Source IGS.

Several Global IGS Data Centres (Navarro *et al.* 2019) replicate this data to ensure fast and fault tolerant access across the community. Furthermore, IGS coordinates and monitors the quality of a products generated by a network of Analysis Centres, combining them to produce high quality official IGS products.

IGS Final products provide the highest quality level, made available on a weekly basis with a delay up to 20 days. The IGS Final products are the basis for the IGS reference frame and they are intended for applications demanding high consistency and quality.

IGS Rapid products represent the second level in terms of quality. They become available on a daily basis with a delay of about 17 hours following the end of the observation day. Quality degradation from IGS Final to Rapid products is not significant for most use cases.

IGS Ultra-rapid products, initially conceived as predicted products and released every six hours, they are intended for real time and near real time use cases. The Ultra-rapid products lead to significantly improved orbit predictions and reduced errors for user applications.

Moreover, relying on this very same infrastructure of stations network, data centres and analysis centres, IGS provides real time access to GNSS orbit and clock corrections, key for Precise Point Positioning (PPP).

Finally, IGS distributes key ancillary data collected from instruments co-located with GNSS receivers, such as local weather data highly relevant for troposphere post-processing use cases.

The global, coordinated effort of IGS members ensures that data and products adhere to agreed standards and strict quality checks, generating a repository readily available for science exploitation. Moreover, many other organisations contribute to create a rich ecosystem of regional data sources and GNSS receivers that complement IGS, like the Nevada Geodetic Laboratory, further increasing spatial and temporal density of GNSS data.

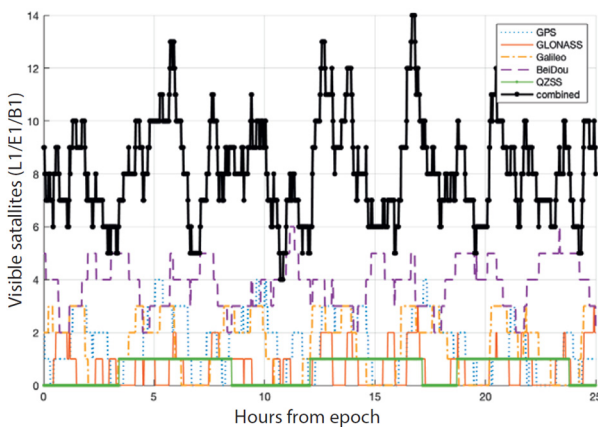
From the point of view of signals and infrastructure, we could conclude that GNSS sets the basis for a worldwide

large, virtual instrument and a highly distributed science data processing pipeline.

#### 4. GNSS Science Opportunities

As presented in Eq. (1), the need for precise quantification of the different elements affecting the GNSS signal has spawned the creation multiple research fields. Moreover, quite a number of examples demonstrate GNSS far-reaching impact in terms of science opportunities.

Originally conceived for navigation on Earth, utilisation of GNSS in space has become routine in the LEO region covered by the Terrestrial Service Volume at 0 – 3.000 km altitude. Despite the small fraction of satellites using GNSS above LEO, improved coverage (Fig. 2) has increased interest in the development of the Space Service Volume (SSV) at 3.000 - 36.000 km (GEO) altitude (UN 2018).



**Figure 2:** Estimated number of satellites visible, by individual constellation and combined, for sample L1/E1/B1 GEO user with 20 dB-Hz C/No threshold. (UN 2018).

Reached this point, travelling well beyond GEO altitude, we start devising a Lunar Navigation System where advancements in knowledge of GNSS transmit antenna patterns and promising results from experiments regarding the utilisation of a GPS-only receiver in a Moon Transfer Orbit (MTO) have demonstrated the potential of GNSS based Lunar Navigation (Delépauta *et al.* 2020).

In the field of SSV, the utilisation of GIOVE-A to demonstrate autonomous orbit determination at high altitudes with a GNSS receiver showcased, early on in its life, Galileo’s potential to go beyond its original purpose. Later on, Galileo became a precious testbed for Fundamental Physics (in addition to nominal use). GNSS satellite clocks, subject to both Special Relativity (SR) and General Relativity (GR) effects, correct these effects considering an almost perfectly circular orbit. The special characteristics of Galileo Satellites 5 and 6, located in an eccentric orbit due to a launch anomaly, combined with the frequency stability of Galileo’s Passive Hydrogen Maser (PHM) clocks and highly precise orbits, allows to verify GR predictions below current “state of the art” observing the periodic signature in their clock rate. Based on this concept, the GREAT project assessed data accumulated for over 1000 days, improving gravitational redshift determination for the very first time since Gravity Probe (Delva *et al.* 2019).

Back to Earth, multiple GNSS applications derive from its signal interaction with the environment or data fusion geolocalisation:

- Troposphere and Weather forecast: specific humidity, precipitation
- Ionosphere and Space Weather: electron density.
- Climate: sea level, sea ice coverage, ice shelf altitude, salinity
- Disasters: tsunami early warning, flood monitoring.
- Land surfaces: soil moisture, biomass, snow cover and depth, humidity content of snow

On the climate side, as global warming progresses, water vapour increases, with potential increases in intensity of precipitation and decreases in frequency (Allan and Soden 2008). GNSS complements systems such as radiosondes and remote sensing providing complementary coverage of water vapour. Remote sensing of Atmospheric Water Vapour Using the Global Positioning System (Bevis *et al.* 1992) positions GNSS at the service of weather forecast and climate change monitoring. GNSS networks like IGS provide long-term time series to support climatological requirements for global coverage, spatial resolution and homogeneity. IGS produces continuous estimates of vertically integrated water vapour content. The limited coverage over the oceans can be estimated from space-borne GNSS receivers using reflectometry techniques.

On a different topic, but still related to climate change, animal tracking with GNSS sensors provides bio-indicators of change. Animals offer in-situ stations that interact with key environments through “behaviours” like ecology of movement, identification of potential threats, conservation measures. Birds have already shown changes in reproduction and migration events linked to warming (Masello *et al.* 2021). Penguins forage in sectors of rich energy landscape where low energy is required from them. Changes in currents or temperatures affecting their energy landscape forced them to forage in expensive parts. Results show that lower foraging costs may favour a higher breeding success, explaining the positive population trend by the Gentoo penguins in the Antarctic Peninsula.

In the field of 3D city modelling, UCL (2021) has demonstrated feasibility to estimate height and some types of materials of buildings from the blockage, reflection, and attenuation of GPS (and in general Global Navigation Satellite Systems (GNSS)) data. Using semi-crowdsourced GNSS raw data from smartphone volunteers, the research has managed to extract some patterns applying machine learning (ML) techniques. This approach could provide a ubiquitous and free of charge 3D models creation/update instrument.

Travelling into space, Pajares and Moreno (2020) build on their indicator Global Navigation Satellite Systems Solar FLare (GSFLAI) to detect solar flares and quantify the associated extreme ultraviolet (EUV) solar flux rate based on over-ionization, measured from hundreds of IGS dual-frequency receivers. A generalisation of GSFLAI is presented for the much weaker stellar superflares. The new algorithm, Blind GNSS search of Extraterrestrial EUV Sources (BGEES) is able to detect EUV flares without the previous knowledge of the position of the source, which is

also simultaneously estimated. BGESS results concerning the detection and location of two stellar superflares, Proxima Centauri (18 March 2016, 08:32UT) and NGTS J121939.5-355557 (1 February 2016, 04:00UT), strongly suggest the possibility to extend the technique, also in real time.

## 5. Machine Learning for GNSS

In traditional programming, developers build systems writing sequences of instructions to describe very carefully what to do to achieve a goal. Machine learning changes this in a fundamental way, enabling computers to learn from data to achieve a goal without being explicitly programmed (Samuel 1959). While it has been around for quite some years already, substantial increase in data generation rates along with advancements in processing power and software libraries has led to a new golden age of machine learning. Commonly associated to computer vision, speech recognition or games, there is a large portion of complex use cases where it is significantly easier to define a behaviour in terms of input and output data.

The popular term Software 2.0 (Karpthy 2017), adopted for the machine learning programming paradigm, reflects its revolutionary impact in software development. Machine Learning fundamentally departs from Software 1.0 “classical stack”, where programmers use languages such as Java, Python, C++, etc. to reach some desirable behaviour point in the program space (Fig. 3). Now the quest is delegated to algorithms designed to autonomously reach the aforementioned desired state through a training process that makes use of abstract weights and hyperparameters to govern the behaviour of a neural network. Human intervention shifts towards understanding those features driving the expected behaviour and the subsequent selection of the artificial model that best suits observed characteristics like for example temporal correlation.

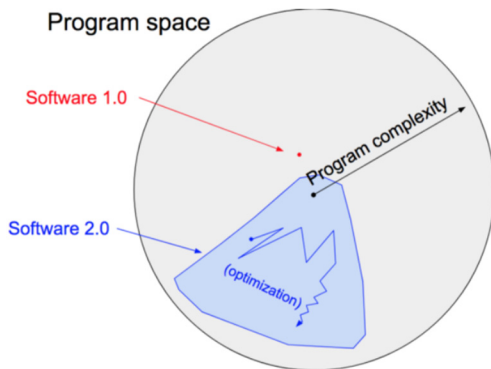


Figure 3: Software 2.0 space.

In fact, many well-known problems in the GNSS arena, traditionally formulated as mathematical expressions, fit within the premise defined by the problem of improving some measure of performance  $P$  when executing some task  $T$ , through some type of training experience  $E$ . (Mitchell 1997).

In analogy with biology, the basic element of a Neural Network is a neuron, which can be defined as in Eq. (2):

$$a = g(W_x x + b) \quad (2)$$

Where:

$a$  = neuron output vector

$g$  = activation function

$W_x$  = neuron weight

$x$  = neuron input vector

$b$  = bias term

Neural networks present different characteristics depending on activation functions and architecture. For example, Recurrent Neural Networks (RNN) are known for their ability to account for temporal correlation in the data. However, in their first implementation, they are not efficient memorizing long-term information. The Long Short Term Memory (LSTM) adds an internal memory concept, allowing information to flow further into the network. Many more efficient architectures exist. There are many alternatives and architectures, for a complete review on one could refer to (Goodfellow *et al.* 2016).

A review of literature focused on the application of machine learning to GNSS data shows significant utilisation of neural networks, time series, and classification technologies. Areas of interest go from the core GNSS goal, improving localization (Hosseinyalamdary 2018; Diggelen 2019) to all other bias effect presented in Eq. (1) like multipath (Diggelen and Wang 2020; Quan *et al.* 2018), ionosphere (Orus 2018; Jiao *et al.* 2007; Liu *et al.* 2020; Linty *et al.* 2019) and troposphere (Benevides *et al.* 2019) effects. These works demonstrate how ML can contribute to address problems addressed in a different way.

ML principle lays behind the so-called “hidden layers”. During training, weights defined for each neuro-to-neuron connection evolve to maximise task performance. When applied to GNSS the basic inputs, usually the residuals, are complemented with “fused” ones relevant for the task like, C/N0, 3D models (Diggelen 2021), constellation type, signal type, etc. The architectural support for data fusion presents ML as a very promising alternative to other analytical solutions with rigid definitions of their input parameters. False ionospheric problems (Benton and Mitchell 2011), would greatly benefit from ML capability for seamless integration of data. ML algorithms can work at signal level (Navarro *et al.* 2019) to assess automatically the quality of the received signal.

In order to realise ML benefits, explainability, reliability, security and privacy challenges (EC 2020) require a systemic approach throughout the ML lifecycle comprising data preparation, feature extraction, training and validation.

- **Data Preparation:** this is the first and most critical one as good data represents the basis for all ML subsequent steps. It is in charge of filtering, sampling, cleaning and basic transformation.
- **Feature Extraction:** this step is dedicated to the extraction of information, which will be provided as input to the Machine Learning Modules.
- **Training:** during this step, the Machine Learning Modules embedding the algorithms construct the model.



- **Validation:** it implies comparing real with predicted data in two steps. The first one refers to data used during the model training while the second refers to data absent during model construction.

Assessment of GNSS ML algorithms implies processing simulated or real data collected via GNSS receivers for a set of scenarios. Outputs compared with a “ground truth” derive ML performance metrics driving an iterative process.

## 6. Raw GNSS Data, Internet of Things and Crowdsourcing

On the 14th of April 2021, EUSPA announced the mark of two billion Galileo-enabled smartphones in the market, increasing the dominance of smartphones in the GNSS user segment. As we will see, this is particularly relevant when it comes to the utilisation of the second frequency, E5. A few months earlier, Sony (2020) had announced de release of a multi-constellation, dual-band GNSS Receiver for wearable devices with the industry’s lowest power consumption to date. Besides, since Android 7, the possibility to access GNSS raw measurements on smartphones fosters development of new processing techniques and optimisations (GSA 2017). Hence, fast-paced advances in mass-market technology provide, “de-facto”, a large GNSS receiver network of affordable, smart and ubiquitous devices, sometimes referred as the Internet of Things (IoT).

Science initiatives to leverage on the potential represented by this GNSS-enabled “virtual instrument” expand to domains with a long tradition of dedicated instruments like Astronomy (CRAYFIS 2021) or 3D mapping (UCL 2021). These initiatives rely on a crowdsourcing process, characterised by a collaborative effort to obtain the required data or service from a large group of people (usually undefined volunteers). This process is becoming increasingly popular as it provides a cost-effective solution to collect a large volume of data. There are a variety of applications, such as image labelling, object counting, translation or slogan design (Marcus and Parameswaran 2013).

Few references in GNSS literature devise crowdsourcing approaches for GNSS science. De Oliveira *et al.* (2020), proposed a crowdsourcing concept to estimate troposphere water vapour distribution from GNSS using a simulated smartphone network. However, one of the key feasibility problems is the definition of the effective minimum sample for crowdsourced data (Meng 2018). Without careful assessment of data quality, quantity and problem complexity, the apparently large crowdsourced data may effectively account for a small fraction of the full scenario.

Finally, the aforementioned dual-frequency represents a game changer for smartphone accuracy (Fig. 4). On one hand, the dispersive nature of the ionosphere allows to remove the ionospheric effect using two-frequency measurements. On the other hand, the narrower correlation peak L5/E5 signals improves accuracy and multipath resilience.

Moreover, exploitation of dual-frequency and ancillary data, like 3D maps, enables unprecedented solutions for urban canyons accuracy like 3DMA GNSS (Diggelen and Wang 2020).



**Figure 4:** Dual-frequency test at the European Space Technology Centre (ESTEC). Samsung S8 (left), Xiaomi Mi-8 (right). Source ESA.

## 7. Ionosphere Science Case

The ionosphere is a dispersive medium that extends from about 50km up to more than 1300 km in terrestrial atmosphere. As presented in Eq. (1) the ionosphere plays a fundamental role in GNSS, as signal propagation speed varies with its electron density, measured as Total Electron Content (TEC). Perturbations in the ionosphere go from global to local effects (a few hundreds of km range) and their temporal range varies between seconds and days. Physical background differs and impact on GNSS may vary from a slight delays causing accuracy degradation to Loss-of-Lock (LoL). Hence, beyond the great interest for scientific research, monitoring and understanding of the ionosphere is critical for a large number of daily life applications that rely on radiosignals.

For multi-frequency GNSS receivers under nominal conditions, ionosphere-free combination allows to remove the ionospheric effect. Single frequency receivers depend on ionospheric model information broadcasted in the navigation message (Klobuchar, NeQuick). These models present a correction capability from 50% to 70%. Furthermore, IGS, in coordination with its Analysis Centres, distributes post-processed Global Ionosphere Maps (GIM). These maps are more precise than the broadcast model by approximately 20%, and they can be used as references for ionospheric studies (Orus 2018).

Monitoring of ionospheric parameter like TEC, combined with indexes like ROTI, S4 or  $\sigma_\phi$ , acting as proxy of ionospheric perturbations (Borries *et al.* 2020) provide a solid dataset for Machine Learning predicting models.

Traditionally, GNSS methods to deal with scintillations events rely on thresholds applied to amplitude and phase scintillation indices S4 and  $\sigma_\phi$ . In presence of noise and disturbances, this method suffers from high number of false alarms and missed detections.

Figure 5 shows an example where threshold discrimination only some values would be part of the scintillation events. However, human inspection or sophisticated ML models (SVM) identify a longer duration of the event (Savas and Dosis 2019).

Therefore, the goal of Machine Learning in this case is to avoid such missed detections, identifying (similarly to humans) contribution to the same scintillation event, or excluding outliers.



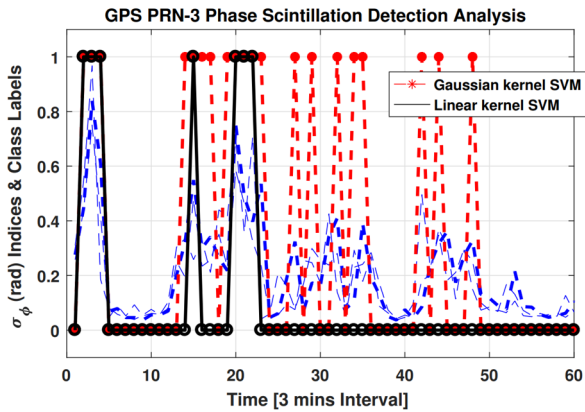


Figure 5: Linear and Gaussian Kernel SVM Result, Data Set: June 6, 2016, SANAE IV.

Despite the nature of the scintillation events does not make straightforward the identification of correlations (Jiao *et al.* 2014), purely data-driven approaches are competing with state-of-the-art, model-based methods. Moreover, the flexibility of neural networks permits further refinements using additional inputs, such as solar imagery (Boulch *et al.* 2018).

Liu *et al.* (2020) LSTM model forecasts spherical harmonic coefficients used for GIM. The model is trained with Dst index, EUV flux and SH coefficients time-series. Reported results showed that the model was competitive against empirical models (IRI-2016 and NeQuick2) performing well in quiet and storm geomagnetic conditions.

Orus (2018) shows promising results in the application of DNN to estimate the ionosphere mapping function. The study highlights NN capability to derive STEC for 150 stations on Earth.

However, current ground station networks spatial resolution limits data availability. Exploiting GNSS Big Data crowdsourcing would allow to “close the gaps”.

The availability of dual band smartphone and the possibility of extracting ionospheric delay from their GNSS raw data (GSA 2017) opens the door to a substantial increase in current spatial resolution by combination of the dual-frequency carrier phase observations (e.g. GPS L1 and L5, or Galileo E1 and E5a). While Orus (2018) delivers a global model of the ionosphere based on historical data, this approach provides a distributed model based on real-time data collected from a network of smartphones.

## 8. Troposphere Science Case

As presented in Eq. (1) tropospheric delay is one of the biases affecting GNSS code and phase measurements (Sanz *et al.* 2013). This delay has wet and hydrostatic components. The hydrostatic component represents approximately 90% of the tropospheric delay. This part has slow variability and its behaviour is quite predictable based on local temperature and atmospheric pressure. Models mainly rely on pressure data providing estimates in the order of millimetres. The estimation of the wet delay presents more difficulties (Bevis *et al.* 1992).

To address this problem GNSS community offers solutions based on the IGS network of geodetic antennas

and receivers, capable of carrying out precise carrier phase GNSS measurements on multiple frequencies. IGS Data Centres provide post-processed troposphere products like total zenith path delay (ZPD) and north/east troposphere gradient. Besides, availability of surface pressure and temperature measurements allow further extraction of precipitable water vapour.

However this solution provides a limited spatial resolution derived from the costs associated to the high precision GNSS receivers required. Crowdsourced ZPD estimates would provide the opportunity to increase the spatial resolution of troposphere maps, thus allowing for improved estimation of the drag coefficient important in the reentry of a spacecraft, climate characterization and severe weather events forecasting. The feasibility of ZPD retrieval from GNSS receivers and antennas embedded in smartphones was demonstrated by (Tagliaferro *et al.* 2019).

## 9. GNSS Science Support Centre (GSSC), Thematic Exploitation Platform

GSSC Thematic Exploitation Platform brings together GNSS science use cases, machine learning frameworks and IoT streaming requirements under an n-tier big data architecture for open science. Organised around several system domains (Fig. 6), it relies on a complex technology stack (Navarro *et al.* 2019) that spans across Software-as-a-Service (SaaS), Platform-as-a-Service (PaaS) and Infrastructure-as-a-Service (IaaS) computing spaces.

- *User Layer*: this layer provides the Human-Machine Interface (HMI) for users and administrators to access all functionalities. The objective of this layer is to decouple presentation logic from business logic implemented by other layers. This layer allows smooth integration of HMI functionalities into a homogeneous look & feel through the provision of extension points.
- *Exploitation and Preservation Layer*: this layer groups domains implementing generic and user specific analysis functionalities. These domains provide access to information and processing assets integrated in GSSC. The system relies on executable modules and data at different levels of processing which are natively stored or federated to other systems. These two types of assets are combined in the exploitation layer to deliver more complex services and products.
- *Support Layer*: this layer groups domains implementing components that include libraries providing common features required across the whole system. These libraries act as glue-code to adapt to component needs.
- *Infrastructure Layer*: this layer provides basic support for the implementation of the preservation and support layers. It is based on COTS that can be reused “as-is” with an integration pattern mainly based on the configuration of a set of parameters to adapt the behaviour of the COTS to the specific needs.

This architecture supports innovative GNSS Science Use cases through seamless integration of remote, edge-

based GNSS Intermediate Frequency Recording Stations (LaChapelle and Broumandan 2016; Navarro *et al.* 2019).

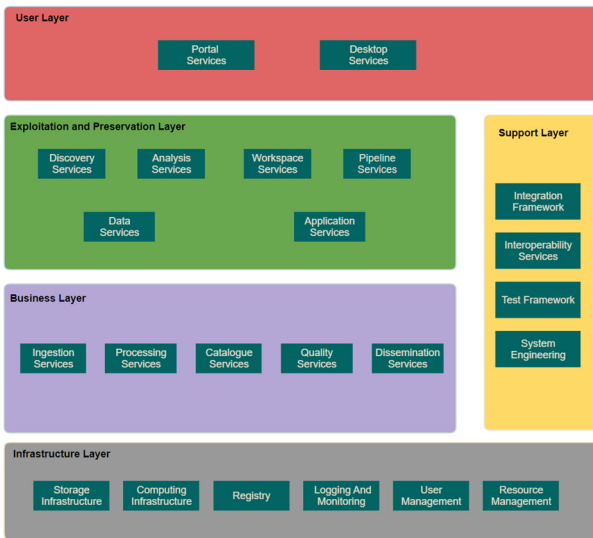


Figure 6: N-Tier Architecture and System Domains.

### 10. First Results

GSSC's repository further extends IGS Global Data Centre with ESA's GNSS related data from projects (GREAT, GESTA) and missions. Taking note of the increasing trend in space missions to embark GNSS receivers, the GSSC repository already integrates SVS data from ESA (SWARM, GOCE) and non ESA missions (SAC-C, JASON, CHAMP, ICESAT). This approach aims to promote and maximise scientific return from this highly relevant data, taking advantage of ESA's privileged position in the field.

Furthermore relevant data from other organisations is also available, like Environmental Monitoring Unit data from GSAT0207 and GSAT0215 satellites.

First internal tests have demonstrated GSSC's suitability to act as a catalyser for GNSS research, students and external organisations. These groups can build their own analysis tools, sitting on top of this repository, to address scenarios like:

- Fast development of prototype ideas requiring initial provisioning of complex systems.
- Software-as-a-Service delivery of desktop applications and systems.
- Training framework for coding competitions, trainees, small external developments.
- Outreach and demonstration of systems requiring complex initial configuration.

GSSC platform is already available at gssc.esa.int for selected private beta users, having successfully completed its core development phase. It features core analysis capabilities and a preliminary catalogue of GNSS data collections.

This platform, characterised by the move of processing components to data, provides native support for open science. It evolves from the traditional FTP solution to provide an integrated environment with advanced services for data discovery (Fig. 7) and analysis (Fig. 8).

This cyberinfrastructure puts the focus on the science community, promoting user contributions to the platform as data and computing extensions.

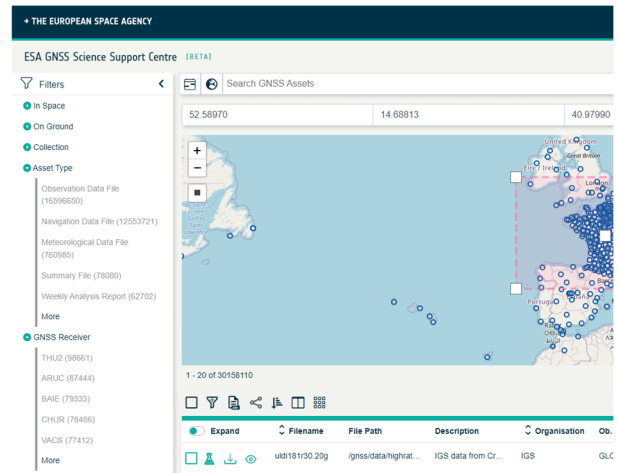


Figure 7: GSSC Discovery Service.

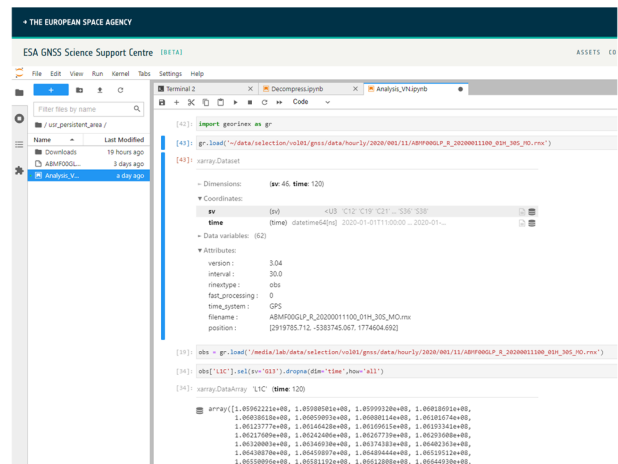


Figure 8: GSSC Analysis Service – Custom JupyterLab.

GSSC Analysis Services provide on-demand web-access to exploitation tools. These tools range from general domain ones like Octave to GNSS-specific ones designed to tackle a particular problem. Prominent example of these general domain systems is JupyterLab. In addition to the vanilla versions of JupyterLab, GSSC provides become notebooks further customised by ESA for specific GNSS analysis.

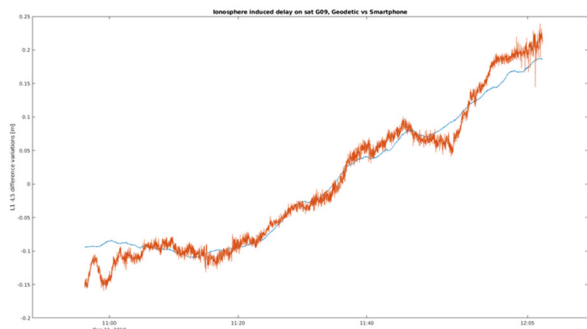
GNSS Big Data infrastructure (Navarro *et al.* 2019), deployed at three sites, has reached stability during the operations campaign allowing the evaluation of target experiments.

Finally, first results shown in Fig. 9 from dual-frequency Xiaomi Mi8 smartphone measurements show promising results to derive ionospheric delay and related TEC from its geometry-free observable.

### 11. Conclusions and Future Work

In this work, we have presented GNSS science achievements and opportunities. We have provided up-to-date status information on several key activities regarding challenges and trade-offs for the exploitation of crowdsourced data, applying machine learning to GNSS

science use cases. The described GSSC architecture has successfully demonstrated its suitability as a Thematic Exploitation Platform.



**Figure 9:** Geometry-free L1-L5 combination obtained from a Xiaomi Mi8 smartphone (red) and a co-located geodetic station (blue).

GSSC next steps gear towards the evolution from currently restricted, beta system into a public environment for open-science and innovation across multi-disciplinary GNSS research communities. Moreover, throughout 2021, new ESA missions and projects are to contribute to build up GSSC catalogue with new applications, notebooks and data collections. Machine Learning exploitation of GNSS crowdsourced data for ionosphere and troposphere use cases the will harness the full potential of this platform.

Key activities related to these use cases encompass:

- Exploitation of Space Service Volume data. Assessment of data fusion for ionosphere modelling (Zakharenkova *et al.* 2016).

- Smartphone data pre-processing improvements to deal with specially noisy measurements.
- Smartphone GNSS antenna phase robot calibration to correct for antenna impact on L1 and L5 phase observations.
- Engagement of third parties for data crowdsourcing required to move away from simulated data.
- Deployment of data processing infrastructure for real time acquisition and distribution of ML-based ionosphere and troposphere corrections.
- Refine approach towards model governance and data provenance (FAIR GNSS). These are two hot topics for implementing AI solutions. In this area, ESA studies on blockchain technology have defined potential contributions.

## Acknowledgements

This work was supported by the European Space Agency as part of Research and Development Programmes under Science and Navigation Directorates.

The authors would like to thank the GNSS Science Advisory Committee and ESA Navigation Support Office for their support and suggestions. We also thank our Industrial partners, involved in science use cases assessment and implementation. Thanks also to the Science and Operations technical IT Unit at ESAC supporting the deployment of the GSSC Thematic Exploitation Platform. We would like to thank all data collection providers, with special thanks to IGS, ILRS, CDDIS, BKG and IGN for their sustained and remarkable support making possible the creation of the GSSC Repository at the core of this work.

## References

- ALLAN, R., and SODEN, B., 2008. Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, **321**, Issue 5895, pp. 1481-1484. DOI: 10.1126/science.1160787
- BENEVIDES, P., CATALAO, J., and NICO, G., 2019. Neural Network Approach to Forecast Hourly Intense Rainfall Using GNSS Precipitable Water Vapor and Meteorological Sensors. *Remote Sens.* 2019, **11**(8), p. 966. DOI: 10.3390/rs11080966
- BENTON, C., and MITCHELL, C., 2011. GPS satellite oscillator faults mimicking ionospheric phase scintillation. *GPS Solut*, **16**, pp. 477–482. DOI 10.1007/s10291-011-0247-3
- BEVIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T. A., ROCKEN, C., ANTHES, R. A., and WARE, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **97**(D14), pp. 15787-15801.
- BOULCH, A., CHERRIER, N., and CASTAINGS, T., 2018. Ionospheric activity prediction using convolutional recurrent neural networks. arXiv preprint arXiv:1810.13273.
- BORRIES, C., WILKEN, V., JACOBSEN, K.S., GARCIA, A., DZIAK-JANKOWSKA, B., KERVALISHVILI, G., ZAKOWSKI N., TSAGOURI, I. PAJARES, M., FERREIRA, A., and HOQUE, M., 2020. Assessment of the capabilities and applicability of ionospheric perturbation indices provided in Europe. *ScienceDirect. Advances in Space Research*, **66** (2020), pp. 546–562.
- CRAYFIS. 2021. The app that turns your phone into a cosmic ray detector. No joke. Available: <https://crayfis.io/> [5/22, 2021].
- DE OLIVEIRA, T., MÄKELÄ, M., MONTLOIN, L., LEHTOLA, T., THOMBRE, S., and LEHTOLA, V., 2020. Towards tropospheric delay estimation using GNSS smartphone receiver network. *Science Direct, Advances in Space Research*, **2020**. DOI: 10.1016/j.asr.2020.09.041

- DELÉPAUTA, A., GIORDANO, P., VENTURA, J., BLONSKIA, SCHÖNFELDT, M., SCHOONEJANS, P., AZIZA, S., and WALKERA, R., 2020. Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development. *21 May 2020 Science Direct*. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.018
- DELVA, P., PUCHADES, M., SCHÖNEMANN, E., DILSSNER, F., COURDE, C., BERTONE, S., GONZALEZ, F., HEES, A., LE PONCIN, C., MEYNADIER, F., PRIETO, R., SOHET, B., VENTURA, J., and WOLF, P., 2019. A new test of gravitational redshift using Galileo satellites: The GREAT experiment. *March-April 2019 Science Direct*. DOI: 10.1016/j.crhy.2019.04.002
- DIGGELEN, F., 2021. Keynote Presentation at the ION ITM Meeting, Jan 2021. Available: <https://sites.google.com/corp/view/frankvandiggelen/videos> [5/22, 2021].
- DIGGELEN, F., 2019. *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Artech House, London, 2019
- DIGGELEN, F., and WANG, J., 2020. *Improving urban GPS accuracy for your app*. Available: <https://android-developers.googleblog.com/2020/12/improving-urban-gps-accuracy-for-your.html> [5/22, 2021].
- EC. 2020. European Commission - White Paper on Artificial Intelligence. A European approach to excellence and trust. Brussels, 19.2.2020, COM (2020) 65 final.
- GOODFELLOW, I., BENGIO, Y., and COURVILLE, A., 2016. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. Available: <http://www.deeplearningbook.org> [5/22, 2021].
- GSA. 2017. White Paper Using GNSS Raw measurements on Android devices. Available: [https://www.euspa.europa.eu/system/files/reports/gnss\\_raw\\_measurement\\_web\\_0.pdf](https://www.euspa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf) [5/22, 2021].
- HOSSEINYALAMDARY, S., 2018. Deep Kalman Filter: Simultaneous Multi-Sensor Integration and Modelling; A GNSS/IMU Case Study. *Sensors (Switzerland)*, **18**(5), p. 1316,
- JIAO, Y., MORTON, Y., and TAYLOR, S., 2014. Comparative studies of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation characteristics of GPS signals. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014*, pp. 37-42.
- KARPATY, A., 2017. Software 2.0. Available: <https://karpaty.medium.com/software-2-0-a64152b37c35> [5/22, 2021].
- LACHAPELLE, G., and BROUMANDAN, A., 2016. Benefits of GNSS IF data recording. *European Navigation Conference (ENC). 2016*. DOI: 10.1109/EURONAV.2016.7530544
- LINTY, N., FARASIN, A., FAVENZA, A., and DOVIS, F., 2018. Detection of GNSS ionospheric scintillations based on machine learning decision tree. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **55**(1), pp. 303-317.
- LIU, L., ZOU, S., YAO, Y., and WANG, Z., 2020. Forecasting Global Ionospheric TEC Using Deep Learning Approach. *Space Weather*, **18**(11). DOI: 10.1029/2020SW002501
- MARCUS, A., and PARAMESWARAN, A., 2013. Crowdsourced Data Management: Industry and Academic. *Perspectives Foundations and Trends in Databases*, **6**(1-2), pp. 1–161. DOI: 10.1561/19000000044
- MASELLO, J. F., BARBOSA, A., KATO, A., MATTERN, T., MEDEIROS, R., STOCKDALE, J. E., and QUILLFELDT, P., 2021. How animals distribute themselves in space: energy landscapes of Antarctic avian predators. *Movement ecology*, **9**(1), pp. 1-25.
- MENG, X., 2018. STATISTICAL PARADISES AND PARADOXES IN BIG DATA (I). *The Annals of Applied Statistics 2018, Institute of Mathematical Statistics*, **12**(2), pp. 685–726. DOI: 10.1214/18-AOAS1161SF
- MITCHELL, T. 1997. *Machine Learning* (McGraw Hill, 1997), ISBN 978-9384761165
- NAVARRO, V., ÁLVAREZ, R., DEL RÍO, S., GUERRA, R., MARTÍN-RUBIO, V., DIEGO, M. Á., and MARSEILLE, M., 2020. ESA Datalabs: Multi Mission Science Exploitation and Preservation Platform. In *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, **527**, p. 287.
- NAVARRO, V., DEL RIO, S., CASTILLO, M., MARTIN, F., and VENTURA, J., 2019. GNSS Science Support Centre. *International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS*, **2019**. DOI: 10.13140/RG.2.2.24797.23525.
- NAVARRO, V., DITTRICH, R., SKABURSKAS, K., YING, Y., BÉGIN M.E., and PEREZ, F., 2019. Big Data GNSS for Intermediate Frequency Recording Stations. *Big Data in Space*, **2019**. DOI: 10.13140/RG.2.2.19920.64005
- NIKUTTA, R., FITZPATRICK, M., SCOTT, A., and WEAVER, B.A., 2020. DataLab — A community science platform. NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory, 950 N. Cherry Ave, Tucson, AZ 85719, USA: DOI: 10.1016/j.ascom.2020.100411
- ORUS, R., 2018. Using TensorFlow-based Neural Network to estimate GNSS single frequency ionospheric delay (IONONet). ScienceDirect, Nov 2018. *Advances in Space Research*, **63**, pp. 1607–1618
- PAJARES, M., and MORENO, D., 2020. Real-Time Detection, Location, and Measurement of Geoeffective Stellar Flares From Global Navigation Satellite System Data: New Technique and Case Studies. *Space Weather*, **18**, e2020SW002441, 2020. DOI: 10.1029/2020SW002441



- QUAN, Y., LAU, L., ROBERTS, G.W., MENG, X., and ZHANG, C., 2018. Convolutional Neural Network Based Multipath Detection Method for Static and Kinematic GPS High Precision Positioning. *Remote Sens.* 2018, **10**, p. 2052. DOI: 10.3390/rs10122052.
- SAMUEL, A. L., 1959. Some studies in machine learning using the game of Checkers (1959). *IBM Journal of Research and Development*, pp. 71-105. DOI: 10.1147/rd.33.0210
- SANZ, J., JUAN, J.M., and HERNANDEZ, M., 2013. *GNSS Data Processing*, Vol. I: Fundamentals and Algorithms (ESA TM-23/1, May 2013), ISBN 978-92-9221-886-7
- SAVAS, C., and DOVIS, F., 2019. Comparative Performance Study of Linear and Gaussian Kernel SVM Implementations for Phase Scintillation Detection. *2019 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*. DOI: 10.1109/ICL-GNSS.2019.8752635
- SONY. 2020. Sony to Release High-Precision GNSS Receiver LSIs for IoT and Wearable Devices. Available: <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/202008/20-069E/> [5/22, 2021].
- TAGLIAFERRO, G., GATTI, A., and REALINI, E., 2019. Assessment of GNSS Zenith Total Delay Estimation using Smart Devices. *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)*, Miami, Florida, September 2019, pp. 3879-3891. DOI: 10.33012/2019.17074
- UCL. 2021. Indicative Data: Extracting 3D Models of Cities from Unavailability and Degradation of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Available: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=MR%2FS01795X%2F1> [5/22, 2021].
- UN. 2018. The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Volume, United Nations Office for Outer Space Affairs, October 2018. ISBN 978-92-1-130355-1
- JIAO, Y., HALL, J. J., and MORTON, Y. T., 2017. Performance evaluation of an automatic GPS ionospheric phase scintillation detector using a machine-learning algorithm. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, **64**(3), pp. 391-402.
- ZAKHARENKOVA, I., ASTAFYEVA, E., and CHERNIAK, I., 2016. GPS and in situ Swarm observations of the equatorial plasma density irregularities in the topside ionosphere. *Earth Planets and Space, Springer/Terra Scientific Publishing Company*, **68**, pp.120.

## PROPOSED METHODOLOGY FOR ESTABLISHING AN EARLY GNSS WARNING SYSTEM FOR REAL-TIME DEFORMATION MONITORING

### METODOLOGÍA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA GNSS PARA LA MONITORIZACIÓN DE DEFORMACIONES EN TIEMPO REAL

Mutaz Qafisheh<sup>a,\*</sup>, Angel Martín<sup>a</sup>, Raquel M. Capilla<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022, Spain. [muqawa@doctor.upv.es](mailto:muqawa@doctor.upv.es), [aemartin@upvnet.upv.es](mailto:aemartin@upvnet.upv.es)

<sup>b</sup> Research section in Geomatics, Cartographic Institute of Valencia, Generalitat Valenciana, C/ de la Democràcia 77, Valencia 46018, Spain. [racaro@upv.es](mailto:racaro@upv.es)

#### Abstract:

Early Warning System (EWS) for monitoring megastructures deformation, natural hazards, earthquakes, and landslides can prevent economic and life losses. Nowadays, Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) plays a vital role in this domain since it relies on precise real-time measurements derived from a single receiver, provides real-time monitoring and global coverage. Nevertheless, RT-PPP measurements and methodology is very sensitive to outliers in products, latencies and changes in the constellation geometry. Consequently, there are long initialization periods, losses of convergence and different noise sources, with a high impact on the warning system's availability or even led out to initiate false warnings. This study presents the first experiment to propose a methodology that can help the decision-makers confirm the warning based on the probability of the detected movement by using machine learning classification models. For this, in the first experiment, a laser engraving machine device was modified to simulate deformations. A control unit will be designed based on open-source software, Python libraries are implemented, and the G programming language used to control the device motions. All this research will be the background on which the early warning service will be developed.

**Key words:** precise point positioning, machine learning, warning system, deformation monitoring

#### Resumen:

Los sistemas de alerta temprana para la monitorización de deformaciones de estructuras, terremotos, movimientos de ladera u otro riesgo natural pueden prevenir pérdidas económicas y de vidas. El Posicionamiento Preciso de Punto en tiempo real (RT-PPP) ha demostrado ser útil en este escenario ya que se basa en medidas de precisión a partir de un único receptor, proporcionando cobertura global en tiempo real. A pesar de esto, la técnica RT-PPP es muy sensible a la precisión de los productos usados, latencia y cambios en la geometría de la constelación. Así, los periodos largos de inicialización de la técnica, la pérdida de convergencia de la solución o las diferentes fuentes de ruido, generan un gran impacto en la disponibilidad de un sistema de alerta temprana, pudiendo incluso generar falsas alarmas. Este trabajo presenta los primeros experimentos para generar un sistema de confirmación sobre una alerta temprana a partir de la probabilidad de detectar movimiento usando modelos de clasificación basados en técnicas de aprendizaje automático. Para esto, en un primer experimento, una máquina de grabado láser ha sido modificada para simular deformaciones. Se ha desarrollado una unidad de control basada en software libre, librerías de Python y el lenguaje de programación G que sirve para controlar los movimientos de la máquina. Este trabajo será la base sobre la que desarrollar, en un futuro, un servicio de alerta temprana.

**Palabras clave:** posicionamiento puntual preciso, aprendizaje automático, sistema de alertas, monitorización de deformaciones

## 1. Introduction

Different surveying ways and earth observations such as levelling, electronic distance measurements, synthetic aperture radar (SAR), besides GNSS, are using in deformation detections. GNSS itself also has different methods for positioning and deformations detection (Blewitt *et al.* 2009; Jäger *et al.* 2005; Roberts *et al.* 1999). Those methods vary in terms of accuracy and availability. The EWS for monitoring natural hazards and deformation can establish using any of the pre-mentioned ways.

Accordingly, the pros and cons of these ways affect the availability and the accuracy of the EWS.

Currently, around 129 navigation satellites are operating under the GNSS umbrella and orbiting the earth planet (GPS.gov 2020; NovAtel Inc 2015). Positioning determination using GNSS can achieve using several ways, including Single Point Positioning, which is an autonomous way, differentially such as static, real-time kinematic, Virtual reference station, or Precise Point Positioning (PPP) (Enge and Misra 2011). Traditional GNSS high accuracy methods required operate at least a

\* Corresponding Author: Mutaz Qafisheh, [muqawa@doctor.upv.es](mailto:muqawa@doctor.upv.es)

couple of the GNSS receivers operating in the same region. Alternatively, to cover vast areas, it requires operating a network of GNSS receivers to establish differential GNSS surveying; consequently, it requires maintaining internet or radio connection, hosting server and powerful processor for corrections creation and transmitting. As a result, it required high cost to maintain and establish such a network (Rizos *et al.* 2012).

At the end of the late nineties in the last century, Zumberge introduced the PPP method (Zumberge *et al.* 1997). The main pro of this method is that it can be implemented using a single GNSS receiver with decimetre level accuracy in real-time mode. This advantage clarifies that an early warning system relying on PPP measurements the only available solution for some areas.

Barker *et al.* (2002) studied different potential areas where PPP usage can take place, like offshore and remote areas. Those areas suffer from a lack of coverage of nearby base stations, or they are not covered by GNSS network solution or Virtual Reference Station (VRS). Isolated areas or regions with fewer infrastructures can take benefit from this technique.

The theoretical background behind the PPP solution contains high-precision pseudoranges and phase measurements composed with different corrections such as clock and orbital, phase and code biases and optionally ionospheric corrections (Rizos *et al.* 2012). Real-time PPP users can receive those corrections via the internet through different products, for instance, IGS01, IGS02 and IGS03, which are considered official IGS products (Johnston *et al.* 2017; International GNSS Service 2013). Additionally, different analysis centres and commercial companies produce their own individual products.

The PPP method is encountering several obstacles, for example, long converging time, corruption or discontinuity of the correction products. Moreover, the correction products themselves suffer latencies and corrections oscillations (Martín *et al.* 2013; Qafisheh *et al.* 2020). These difficulties affect the availability and readability of the EWS. So, the first thing to consider to establish the

final warning system is to understand and correlate all variables involved in the observational process, their limitations, and the impact on the probability to accurately detect or not a deformation movement. The experiment described in this manuscript is related to the objective to become familiar with the GNSS receiver in conjunction with the Computer Numerical Control (CNC) machine to simulate movements, develop the required software, and study the correlations among the different parameters involved in the observation. All this knowledge will be the background for the forthcoming experiments that should lead to the development of the warning system.

## 2. Methodology

In this section, the research methodology divided into different steps and the flow of those steps organized to cover all the research objectives are introduced. Figure 1 shows the research methodology flow chart.

### 2.1. Step 1

Initially, the first step was designed to investigate the station location for collecting high-quality PPP observations. The investigation leads to establish a station on the roof of a building located in the southwest part of Hebron city in West Bank. The station has been chosen with an almost open sky view and lower multipath.

### 2.2. Step 2

The next step was dedicated to obtaining the station coordinates with a high accuracy method. Consequently, that guide us to observe the station through a static method. The static session has been holding on March 3 2021, for 24 hours. The total number of satellites was 36. The station coordinates were derived through the online positioning services provided by the US Department of Commerce (<https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>), NOAA, and National Geodetic Survey. The processing of the static data was repeated after two weeks to use the precise final correction products. Table 1 shows the derived coordinates with ITRF2014 at Epoch 2021.21 (Stone 2006).

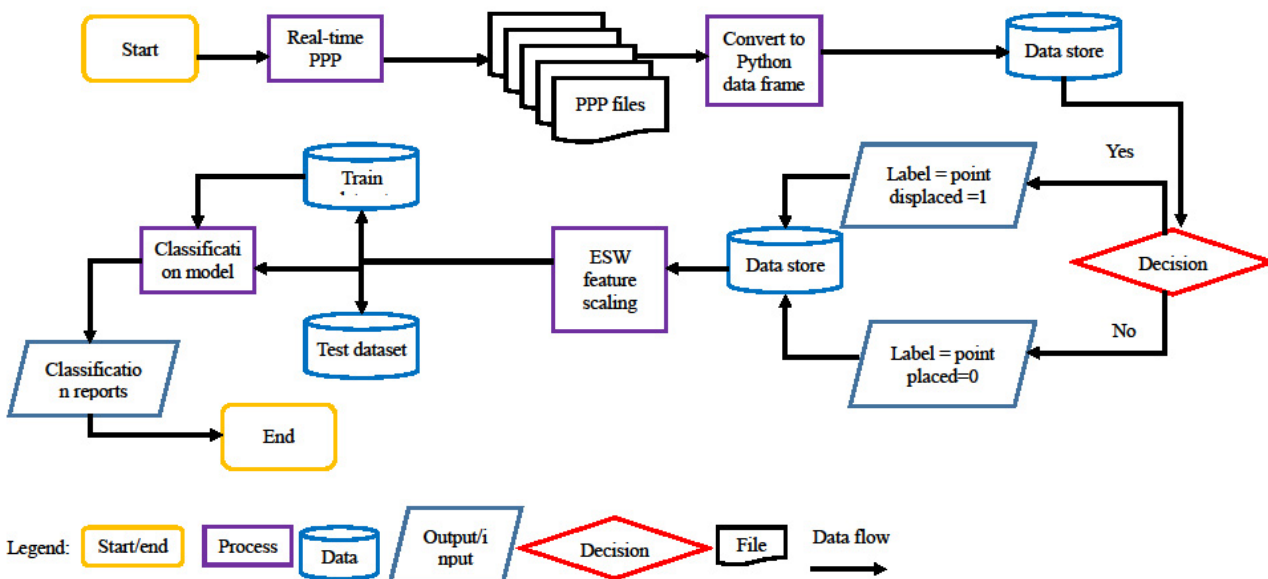


Figure 1: Research methodology flow chart.

**Table 1:** ITRF 2014 polar coordinates for the experiment station.

Station name	Latitude N	Longitude E	Altitude (m)
Mutaz	31°30'25.172" ±0.003	35°03'38.994" ±0.003	915±0.009

### 2.3. Step 3

The third step, designed to obtain the first real-time observations, contains several tasks.

#### 2.3.1. Task 1

The experiment platform contains a CNC machine fixed over a portable table. The table was set up over the station point marker; consequently, the horizontal and vertical level adjusted using circular and tubular vials. Cooperatively, the plump was attached to the GNSS receiver in order to ensure receiver centring. In this experiment, we face problems with the CNC machine controller; the clock equipped on this machine is suffering from the delay. The value of this delay varies, and it was not easy to predict. We overcome this problem by filming the entire observation session.

#### 2.3.2. Task 2

This experiment was detected to collect GNSS observations with 20 centimetres in horizontal displacement. In order to do that, The CNC machine was loaded with 20 points having X and Y coordinate components in the machine coordinate system with a polar distance equal to the desired displacement. The point's components values shuffled in order to add randomization for receiver movements. Twenty centimetres is a movement that real-time PPP can detect good enough. Therefore, the results obtained allow us to get an idea about the minimum limit of movement that real-time PPP may be able to detect.

#### 2.3.3. Task 3

The experiment was designed with 20 displaced points, regularly distributed around the origin station location. The GNSS receiver at the beginning had to be warmed up for 15 minutes over the true marker location in order to end the initialization period. Next, the receiver movement was designed to go back on forth from the displaced points and true marker location with a waiting time equal to 15 minutes in every displaced point and true marker.

### 2.4. Step 4

The PPP real-time observations were collected using code and phase measurement using GPS and GLONASS satellites. Several features had been driven from the observed data, such as horizontal dilution of precision, total satellite number, ionosphere error, latency, coordinate accuracy, and the magnitude of displacement relative to the a priori coordinates. All these parameters have been obtained using BNC software(Weber and Mervart 2007). Based on previous results (Martín *et al.* 2013; Qafisheh *et al.* 2020), a stream with a latency below 15 seconds should be used to obtain precise and accurate real-time PPP coordinates.

### 2.5. Step 5

In this step, Pandas (<https://pandas.pydata.org>) and Numpy (<https://numpy.org>) python libraries were used to read the BNC files. Consequently, the clock timestamp for each observation was added to the Numpy array. Then the Numpy array was converted to the Pandas data frame. The final output data frame contains 21 columns with 36713 rows (one row for every recorded epoch).

### 2.6. Step 6

Data cleaning and preparation is a crucial aspect for the correct implementation of the machine or deep learning techniques. One of the essential aspects of future experiments is data scaling. Machine learning Scikit - learn library has a built-in function, which is useful for data scaling and can be implemented in many ways. Additionally, categorical and null data must be handled before building the model (SciKit-Learn 2016).

### 2.7. Step 7

In this step, Matplotlib is used for visualization, and Seaborn and Panda are used to understand data trends, directions and feature relations. The related software, based on those libraries, has been developed (Matplotlib 2012).

### 2.8. Step 8

Finally, in future experiments, different machine and deep learning classification models will be used with different data sample having various displacement values. The prepared model will test against different observation environments to provide the EWS users with the most appropriate observation conditions to initiate reliable and robust EWS.

## 3. Data collection

This experiment conducted on April 18 with 20 centimetres displacement value. The experiment was held for 10 hours long, The BNC software was used in real-time mode using the CLK93 correction stream (a stream with low latency), and the sampling frequency for NMEA and position intervals was 1 Hz. At the end of the experiment, a total of 36713 GNSS points were collected.

BNC software uses the code/phase ionospheric combination to mitigate the ionospheric delay.

Other configurations related to observation noise, satellite cut off-angle, and the minimum number of observations required for positioning determination has been set.

Figure 2 shows the entire experiment collected data. The figure shows a scatter plot displaying the north and east displacements.

Figure 3 shows the evolution of the displacement with respect to time. The dash borders on the figure show the warm-up period require to end the initialization periods. The figure upper part shows the calculated displacements values when the receiver is displaced from the original location. In contrast, the lower part shows the calculated displacement when the receiver occupies the station marker.



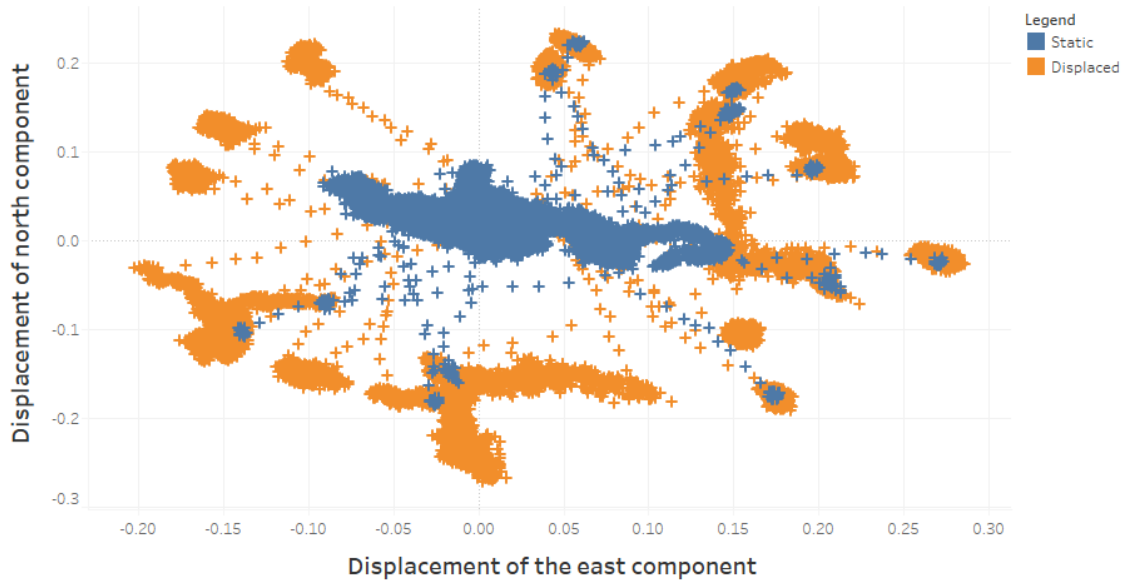


Figure 2: Static and displaced points scatter plot for all the observed points. Units are in meters.

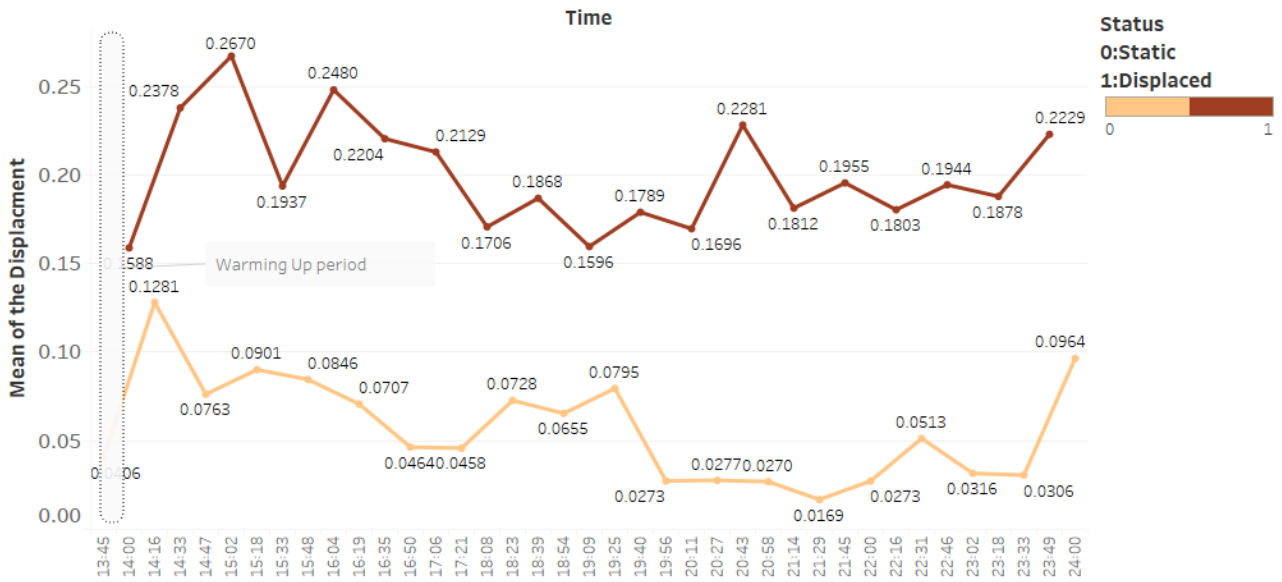


Figure 3: GNSS displacements evolution.

#### 4. Results and discussions

This research section is devoted to understanding data trend and direction, data features, and position relations from collected data. Additionally, this section has statistical results driven from collected PPP observations. Table 2 shows the coordinates in ITRF2014 format. The table contains maximum, minimum, standard deviation, and the mean values for the observed coordinates.

True Coordinates values show the coordinates driven from the post-processed static observations. Table 2 also contains the mean, standard deviation, maximum and the minimum of the X, Y and Z residual, which had been getting the differences calculated by the subtraction of each observation coordinate components from the true value. Next, the mean and the standard deviation were calculated from the differences.

Similarly to the previous table, the following statistical results are driven from the observed data in the displaced points. The computation was done in east, north, and up components with respect to a priori station marker coordinates. Table 3 shows the maximum, minimum, and E, N and Up displacements values.

Another important aspect we consider to focus on it in future investigations is regarded features engineering. On this characteristic, we will try to trade-off between the numbers of required features and model accuracy. Indeed, this trade-off will improve the model accuracy as well as the performance. For example, the following figures show the total satellite number and the Hdop values along 10 hours of observations; Figure 4 shows the number of satellites during the observation session, this number varies between 9 and 17, and Figure 5 shows the Hdop, which reaches 2.0 value as maximum and 1.3 as the minimum. Hdop and the satellite number was averaged for each hour in Figures 4 and 5.

**Table 2:** Experiment statistical summary ITRF2014 Cartesian Coordinates. Units are in meters.

Coordinates' components	Mean	Maximum	Minimum	True	Mean value for the standard deviation
X	4455833.65	4455833.996	4455833.453	4455833.612	0.093
Y	3127063.887	3127064.135	3127063.682	3127063.828	0.092
Z	3314433.218	3314433.410	3314432.989	3314433.169	0.086
X residuals	0.038	0.384	-0.159	0.0	0.093
Y residuals	0.058	0.306	-0.146	0.0	0.093
Z residuals	0.048	0.241	-0.180	0.0	0.086

**Table 3:** Experiment statistical summary for displacement values. Units are in meters.

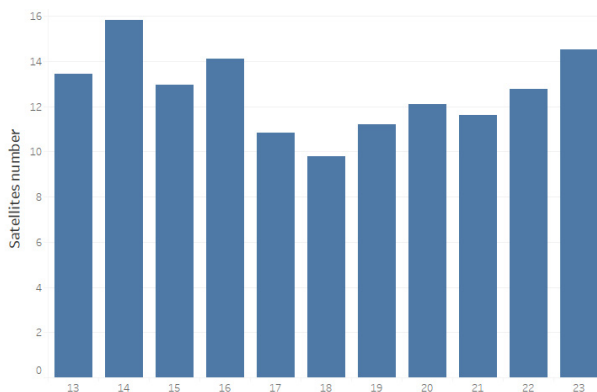
Displacement components	Mean	Max.	Min.	Mean value for the standard deviation
E	0.026	0.285	-0.202	0.108
N	0.007	0.232	-0.272	0.102
Up	0.081	0.391	-0.062	0.050

## 5. Conclusions

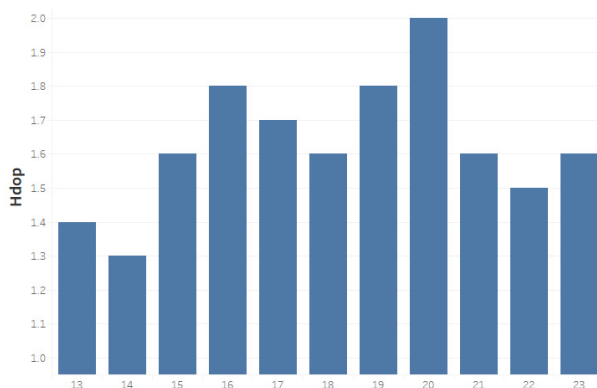
From Tables 1 and 2, we can conclude that it will be very difficult to accurately observe displacements or deformations below 10 centimetres with the real-time PPP technique.

The study of the different features related to the observations can be used for a machine and deep learning classification, considering only two groups, no deformation and deformation.

For doing this, future investigations will involve adding orbital corrections in terms of radial, long track and out of plane corrections values and velocities as features. Also, many different experiments should be done to generate a big database for training the models and to try to reduce the accurate of the observed deformation to a centrimetric level, so the early warning system proposed can be used for monitoring megastructures deformation, or natural hazards such as earthquakes, and landslides.



**Figure 4:** Average number of satellites used in the PPP solutions.



**Figure 5:** Average value of the horizontal dilution precision.

Figure 6 shows the correlation matrix among different collected features. From the figure, we can observe a correlation between Hdop and the total number of used satellites, as Figures 4 and 5 suggest, and a negative and positive correlation between the phase and code residuals with latency values.

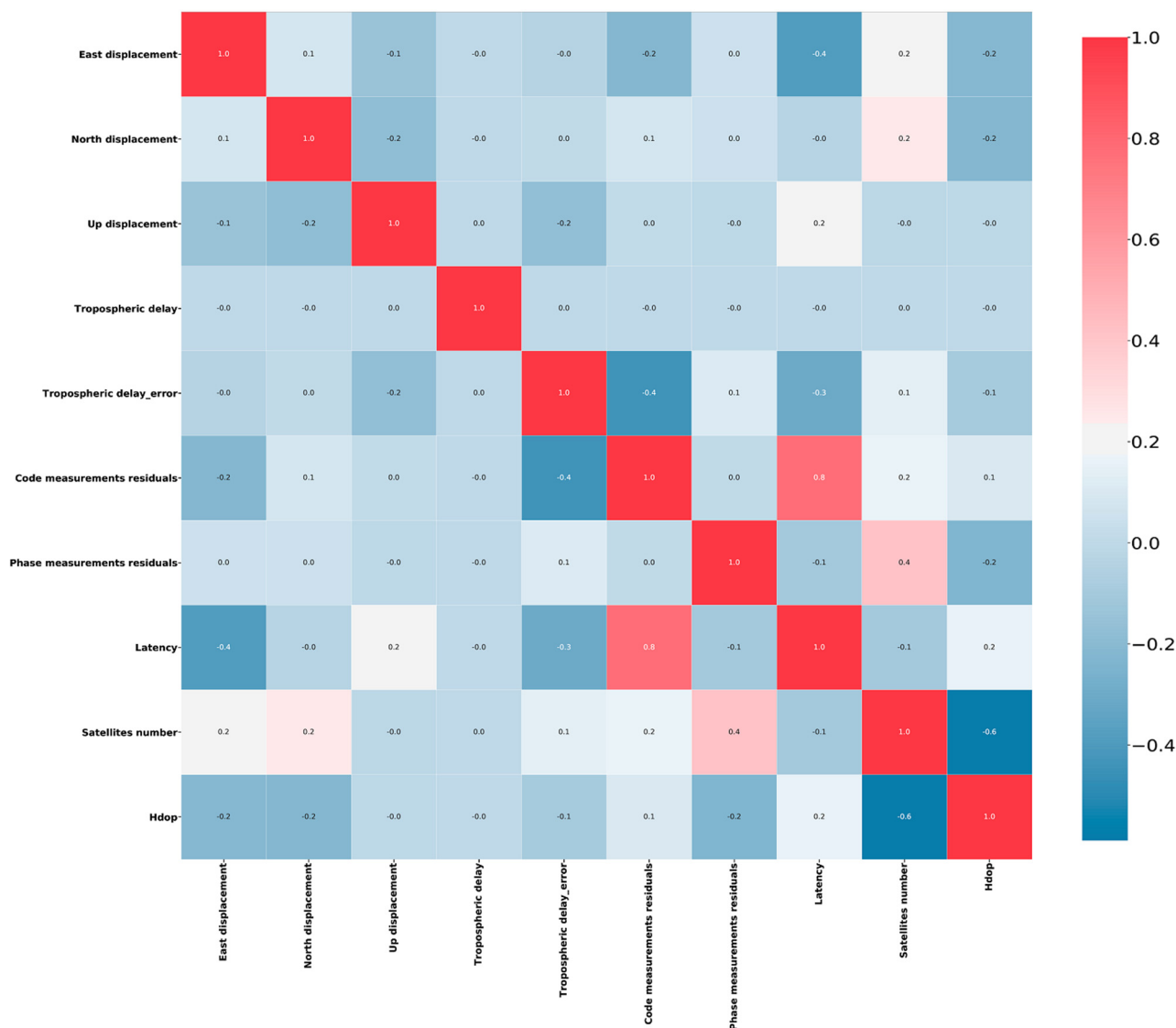


Figure 6: Features correlations matrix.

### References

BARKER, R., LAPUCHA, D., and WOOD, T., 2002. The Impact of High Performance GPS on the Offshore Marine Survey, Navigation and Positioning Industry. Offshore Technology Conference. Houston, Texas: *Offshore Technology Conference*. DOI: 10.4043/14195-MS

BLEWITT, G., HAMMOND, W. C., KREEMER, C., PLAG, H. P., STEIN, S., and OKAL, E., 2009. GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems. *Journal of Geodesy*, **83**(3–4), pp. 335–343. DOI: 10.1007/s00190-008-0262-5

ENGE, P., and MISRA, P., 2011. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance - Revised Second Edition (2011). *International Journal of Wireless Information Networks*, **2**.

GPS.GOV. 2020. Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Available: <https://www.gps.gov/systems/gnss/> [5/2, 2020].

INTERNATIONAL GNSS SERVICE. 2013. RTS Products – International GNSS Service (igs.org). Available: <http://www.igs.org/rts/products> [12/16, 2019].

JÄGER, R., KÄLBER, S., OSWALD, M., and BERTGES, M., 2005. GNSS/GPS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA)-Mathematical models and technical realisation of a system for natural and geotechnical deformation monitoring and analysis. In *Proceedings of the 2005 Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, IAG Symposium*. Jaén, Spain, March, pp. 17-19.

JOHNSTON, G., RIDDELL, A., and HAUSLER, G., 2017. The International GNSS Service. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, pp. 967–982. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1\_33

- MARTÍN, A., HADAS, T., DIMAS, A., and ANQUELA, A. B., 2013. Influence of real-time products latency on kinematic ppp results. *5th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme*. Braunschweig, Germany.
- MATPLOTLIP. 2012. Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.1.2 documentation. Available: <https://matplotlib.org/> [1/15, 2020].
- NOVATEL INC. 2015. An Introduction to GNSS GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems NovAtel. An Introduction to GNSS Book | NovAtel. Available: <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss> [1/15, 2020].
- QAFISHEH, M. W. A., MARTÍN, A., and TORRES-SOSPEDRA, J., 2020. Support vector regression machine learning tool to predict GNSS clock corrections in real-time PPP technique. *CEUR Workshop Proceedings*, 2626.
- RIZOS, C., JANSSEN, V., ROBERTS, C., and GRINTER, T., 2012. *Precise Point Positioning: Is the era of differential GNSS positioning drawing to an end?*
- ROBERTS, G., DODSON, A., and ASHKENAZI, V., 1999. Global Positioning System aided autonomous construction plant control and guidance. *Automation in Construction*, **8**(5), pp. 589–595. DOI: 10.1016/S0926-5805(99)00008-4
- SCIKIT-LEARN. 2016. scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 0.22.1 documentation. Available: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> [1/15, 2020].
- STONE, W., 2006. The evolution of the National Geodetic Survey's continuously operating reference station network and online positioning user service. In *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006*, pp. 653–663.
- WEBER, G., and MERVART, L., 2007. The BKG Ntrip Client (BNC). In *Report on EUREF symposium*.
- ZUMBERGE, J. F., HEFLIN, M. B., JEFFERSON, D. C., WATKINS, M. M., and WEBB, F. H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, **102**(B3), pp. 5005-5017.



## TOWARDS A PRECISE MODELLING OF THE EL SALVADOR FAULT ZONE USING GEODETIC TECHNIQUES

### HACIA UN MODELADO PRECISO DE LA ZONA DE FALLA DE EL SALVADOR UTILIZANDO TÉCNICAS GEODÉSICAS

Juan J. Portela-Fernández<sup>a,\*</sup>, Alejandra Staller<sup>a</sup>, Marta Béjar-Pizarro<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. [jj.portela@upm.es](mailto:jj.portela@upm.es); [a.staller@upm.es](mailto:a.staller@upm.es)

<sup>b</sup> Geohazards InSAR Laboratory and Modeling Group (InSARlab), Geoscience Research Department, Geological Survey of Spain (IGME), Alenza 1, 28003 Madrid, Spain. [m.bejar@igme.es](mailto:m.bejar@igme.es)

#### Abstract:

The El Salvador Fault Zone (ESFZ) comprises a set of a strike-slip faults, extending through the Central American Volcanic Arc within El Salvador, where the Cocos plate subducts under the Caribbean plate. These structures act as a boundary between the forearc sliver and the western margin of the Chortís block, accommodating the relative movement between them. The ESFZ has been responsible for several shallow, destructive earthquakes in El Salvador, thus posing a serious threat for millions of inhabitants. Understanding its seismic potential and the behaviour of its different segments results of great importance for the assessment and mitigation of seismic risk in the region. Geodetic techniques, such as GNSS and InSAR, are useful tools for measuring surface deformation related to tectonic activity. We are in the process of updating and densifying the existing GNSS velocity field in El Salvador, aiming to characterise the individual faults in the region by determining their slip rates and locking depth. Additionally, we will process InSAR data, trying to obtain a continuous measurement of the interseismic deformation. The combination of this information with other data (e.g. seismological and geological) through kinematic models will allow us to better understand the factors controlling the seismogenic behaviour of the ESFZ faults, evaluate their seismic potential and improve the seismic hazard assessment.

**Key words:** geodesy, active tectonics, kinematic modelling, GNSS, El Salvador

#### Resumen:

La Zona de Falla de El Salvador (ESFZ) comprende un conjunto de fallas de deslizamiento extendiéndose a través del Arco Volcánico Centroamericano en El Salvador, donde la placa de Coco subduce bajo la placa Caribe. Estas estructuras actúan como límite entre el antearco volcánico y el margen occidental del bloque Chortís, acomodando el movimiento relativo entre ambos. La ESFZ ha sido responsable de varios terremotos someros destructivos en El Salvador, lo que representa una seria amenaza para millones de habitantes. Comprender su potencial sísmico y el comportamiento de sus diferentes segmentos resulta de gran importancia para la evaluación y mitigación del riesgo sísmico en la región. Las técnicas geodésicas, como GNSS e InSAR, son herramientas útiles para medir la deformación de la superficie relacionada con la actividad tectónica. Actualmente estamos actualizando y densificando el campo de velocidad GNSS existente en El Salvador, con el objetivo de caracterizar las fallas individuales en la región, determinando sus tasas de deslizamiento y profundidad de bloqueo. Además, procesaremos datos InSAR, tratando de obtener una medición continua de la deformación intersísmica. La combinación de esta información con otros datos (por ejemplo, sísmológicos y geológicos) a través de modelos cinemáticos nos permitirá comprender mejor los factores que controlan el comportamiento sísmico de las fallas de ESFZ, evaluar su potencial sísmico y mejorar la evaluación de la amenaza sísmica.

**Palabras clave:** geodesia, tectónica activa, modelización cinemática, GNSS, El Salvador

### 1. Introduction

The country of El Salvador lies on a region with high seismic activity. On the past years, several destructive earthquakes have caused major damage to both its inhabitants and infrastructure, particularly those of January (Mw 7.7) and February (Mw 6.6) of 2001 (Martínez-Díaz *et al.* 2004a). Moreover, secondary effects triggered by earthquakes, primarily landslides, are common in the region (e.g. Jibson *et al.* 2004).

El Salvador is located on a convergent tectonic margin, where the Cocos plate subducts under the Caribbean plate. The subduction interface is thought to be loosely coupled and advancing orthogonally with respect to the trench (Alvarado *et al.* 2011). However, several studies identify a differential movement between the Chortís block, located to the north of the Central American Volcanic Arc (CAVA), and the volcanic forearc sliver (CAFA) to the south, which cannot be explained by the Cocos subduction (e.g. Alvarado *et al.* 2011; Álvarez-Gómez *et al.* 2019). The cause of the CAFA drift is not yet clear. While several studies suggest that the subduction

\* Corresponding Author: Juan J. Portela-Fernández, [jj.portela@upm.es](mailto:jj.portela@upm.es)

of the Cocos Ridge and the higher interface coupling off Costa Rica is responsible for pushing the forearc towards the northwest (Kobayashi *et al.* 2014; Lafemina *et al.* 2009), others point to the pinning of the forearc in Guatemala by the westward movement of the North American plate (Álvarez-Gómez *et al.* 2008; Rodríguez *et al.* 2009). A combined effect of both causes has also been proposed (Álvarez-Gómez *et al.* 2019).

In El Salvador, the forearc sliver escapes towards the northwest at a rate of approximately 12 mm/yr with respect to the Chortís block (Álvarez-Gómez *et al.* 2019). The differential movement between the two blocks is accommodated by the El Salvador Fault Zone (ESFZ), comprised by a set of right-lateral strike-slip faults extending through the volcanic arc with a E-W/NW direction (Martínez-Díaz *et al.* 2004b). Tectonic depressions lie between the fault traces, as in San Salvador (Garibaldi *et al.* 2016).

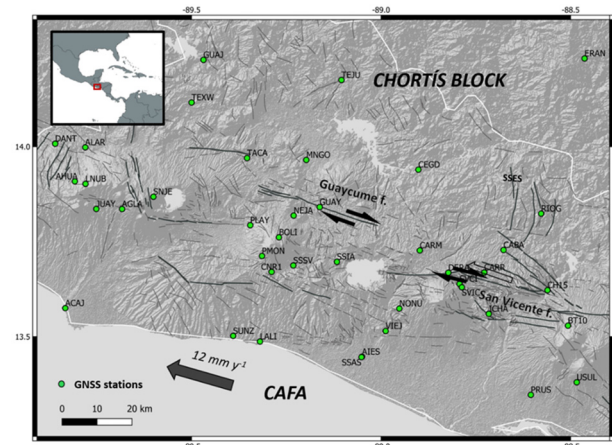
The earthquakes originated on faults within the volcanic arc pose a great danger to the population of El Salvador, due to their shallow depths, proximity to urban areas and frequency (Legrand *et al.* 2020). Understanding the kinematics and behaviour of the individual faults is key for assessing the seismic hazard in the country. Geodetic techniques, such as GNSS and InSAR, have become relevant tools for assessing surface deformation, thus providing valuable information for seismic hazard analysis (Elliott *et al.* 2016).

One simple way to characterise a fault is through its slip rate, i.e., the difference of velocity at which the two sides of the fault are moving (or the displacement deficit that the fault is accumulating if completely locked). This quantity can be obtained from geodetic measurements of the movement of the ground (in which case we speak of short-term slip rates) or geological/geomorphological observations (long-term slip rates).

Several tectonic studies have been carried out in El Salvador (e.g. Alonso-Henar *et al.* 2015; Canora *et al.* 2012), many incorporating GNSS observations (e.g. Alvarado *et al.* 2011; Ellis *et al.* 2018; Legrand *et al.* 2020; Staller *et al.* 2016). Although most of these studies have a regional scale, covering broader areas in Central America (Alvarado *et al.* 2011; Correa-Mora *et al.* 2009; Ellis *et al.* 2018; Ellis *et al.* 2019; Lyon-Caen *et al.* 2006; Rodríguez *et al.* 2009), some focus on the ZFES (Canora *et al.* 2014; Garibaldi *et al.* 2016; Staller *et al.* 2016), or specific segments (Legrand *et al.* 2020). In contrast to the relative abundance of GNSS studies, InSAR studies on the area are very limited in number, consisting mostly of regional-scale volcanic studies (e.g. Ebmeier *et al.* 2013; Reath *et al.* 2019) or local studies (Chavez Hernandez *et al.* 2020). New GNSS observations within the area, supported by an increasing number of available SAR images, may shed light on the kinematics of the individual faults within the ESFZ.

The Guaycume fault (Fig. 1), located roughly 10 km from San Salvador, is one of the main dextral strike-slip features within the ESFZ, presenting a clear geomorphological expression (Martínez-Díaz *et al.*, 2021). It has been proposed as a possible source for the destructive Mw 6.4 1917 El Salvador earthquake (Alonso-Henar *et al.* 2018). However, its precise behaviour is far from being known. The slip rates assigned in past studies vary significantly: Staller *et al.* (2016) estimate a slip rate

of 8 mm/yr, while Legrand *et al.* (2020) suggest that most of the deformation is accumulating further south.



**Figure 1:** Context of the study area. Green dots represent the GNSS stations used in this study. Dark grey lines show the main faults within the ESFZ, while light grey lines represent minor structures (Martínez-Díaz *et al.* 2021). Double black arrows show the dextral behaviour of the main faults. The bigger grey arrow shows the approximate relative movement of the CAFA (Central American Volcanic Forearc) with respect to the Chortís block.

New GNSS stations installed on the area (Fig. 1) will help to improve the knowledge of the regional kinematics. Here we present the preliminary results on the characterisation of the Guaycume fault, with a methodology that we aim to extend to the entire El Salvador.

## 2. Data

We are processing GNSS observations from 2003 to 2021 in all available stations throughout El Salvador. We are also processing permanent GNSS stations located in North, Central and South America, as well as in the Caribbean, in order to link our solutions to the global reference frame ITRF2014 (Altamimi *et al.* 2014). Our primary sources are listed below:

- 1) ZFESNet (Staller *et al.* 2008; Staller *et al.* 2016) continuous and campaign sites.
- 2) UNAVCO permanent stations (UNAVCO 2020).
- 3) UNAVCO old campaigns in El Salvador and Honduras (DeMets 2004; DeMets 2007a; DeMets 2007b; DeMets 2008a; DeMets 2008b; DeMets 2009; DeMets 2011a; DeMets 2011b; DeMets and Tikoff 2015a; DeMets and Tikoff 2015b; DeMets and Tikoff 2015c; DeMets and Tikoff 2015d; DeMets and Tikoff 2015e).
- 4) IGS permanent stations (International GNSS service 2020)
- 5) CORS permanent stations (National Geodetic Survey 2017).

We take advantage of the densification of the ZFESNet over the last years and the conversion of some of the campaign sites to permanent stations. We are also including old GNSS campaigns in El Salvador and Honduras available at UNAVCO, in order to make our solutions more consistent and extend the area covered by GNSS measurements.

In a preliminary stage, aiming to characterise the Guaycume fault, we have collected seismic data since 1915 from the International Seismological Centre (ISC 2021), filtering to shallow seismicity, i.e., with depths under 30 km. We have obtained more than 8600 events up to Mw 7.1.

Other data, such as geomorphological and geological data, will be incorporated in the future.

### 3. Methodology

We process the GNSS (GPS + GLONASS) observations using Bernese 5.2 (Dach *et al.* 2015) in static, relative mode, obtaining a daily positioning solution for each station, referred to ITRF2014. We then correct the position time series of the campaign stations from the coseismic offsets attributable to the 2009 Mw 7.3 Swan Island, 2012 Mw 7.3 El Salvador and 2012 Mw 7.4 Champerico earthquakes, applying the values estimated by Ellis *et al.* (2018). We compute the linear velocity for each station and its uncertainty using the software SARI (Santamaría-Gómez 2019), identifying instrumental and coseismic offsets, removing the seasonal, annual signal and estimating noise levels in the continuous time series. Finally, we compute the velocities with respect to a fixed Caribbean plate, regarding the NNR-MORVEL56 pole (Argus *et al.* 2011).

Since we are focusing at first on the Guaycume fault, we project the horizontal GNSS velocities -and their uncertainties- in a profile of the fault (with an azimuth of 110°), obtaining the fault-parallel and fault-orthogonal velocities. We then fit a simple dislocation model for a strike slip fault to the fault-parallel velocities, following Savage and Burford (1973), as in Eq. (1):

$$v = \frac{f}{\pi} \operatorname{atan} \left( \frac{x}{d} \right) \quad (1)$$

Where:

$v$  = Fault-parallel velocity

$f$  = Far-field velocity

$x$  = Distance to fault

$d$  = Locking depth

The fault-parallel velocity and the distance to the fault correspond to our pairs of observations, while the far-field velocity is usually related to the slip rate of the fault. The locking depth is assumed as shallow, as it is likely in volcanic arcs (Canora 2011; Correa-Mora *et al.* 2009).

We tried to fit (with a least square adjustment) three different models:

- 1) Setting the Guaycume fault as the only structure accumulating deformation.
- 2) Defining a single fault accumulating the deformation, but with unconstrained position, and setting the locking depth to a probable value of 9 km.
- 3) Defining two main features accumulating deformation at the northern and southern borders of the San Salvador graben (respectively, the Guaycume fault and a non-constrained structure to the south).

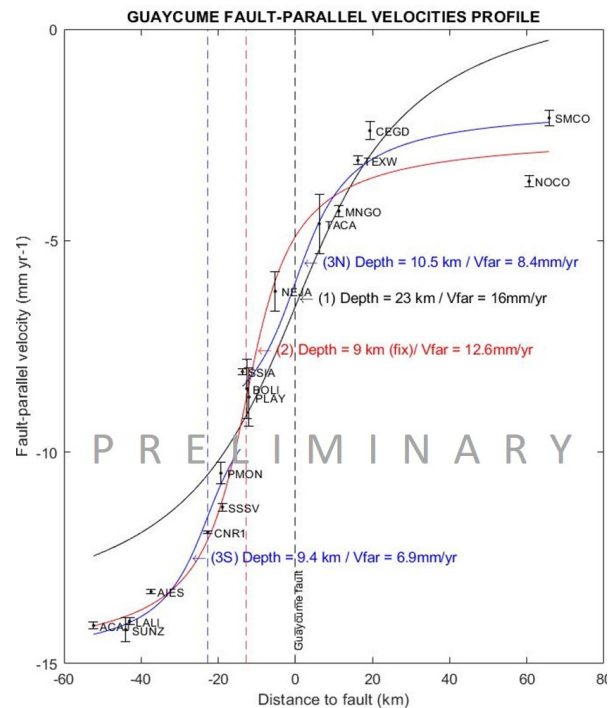
### 4. Preliminary results

The Guaycume fault lies on an aseismic area, regarding the ISC catalogue. This could be due to either a strong locking of the fault or an aseismic behaviour. The cortical seismicity is clustered mainly in the San Salvador graben.

The obtained velocity field on the area is consistent with the previously published velocities (e.g. Ellis *et al.* 2018; Staller *et al.* 2016). Approximately 12 mm/yr of accumulated deformation are detected between the north (Southern Honduras) and south (the Pacific coast) of the study area, coherently with the relative forearc movement estimated by Álvarez-Gómez *et al.* (2019).

The three models that we fit to the fault-parallel velocity profile (Fig. 2) show different performances:

- 1) The model assuming that the Guaycume fault is the only structure accommodating the movement of the forearc does not fit to the observations. The model does not converge properly, and the uncertainties obtained are not realistic.
- 2) The single fault model with unconstrained position locates this structure some 15 km south of the actual Guaycume fault. This model presents the lowest uncertainties among the three.
- 3) The two-fault-model shows a good performance in the northern branch (corresponding to the Guaycume fault), but we obtain very high uncertainties on the computed values for the southern fault (that is located by the model ~20 km south of Guaycume fault, coinciding with the southern border of the San Salvador graben).



**Figure 2:** Guaycume fault-parallel velocity profile, showing the projected velocities as black dots (and their uncertainties as error bars) with respect to their distance to the Guaycume fault. The three simple dislocation models that we fit are shown as black 1), red 2) and blue 3) continuous lines. Dashed lines represent the central fault of each model (with their respective colours). Note that the model 3N is centred on the black dashed line (the Guaycume fault).



## 5. Discussion and conclusions

The lack of seismicity detected on the Guaycume fault surroundings may imply that the fault is heavily locked or presents an aseismic behaviour. Our data is not yet determinant to solve this question.

Following the same numbering as before, the models fitted to the fault-parallel velocity profile (Fig. 2) seem to indicate that:

- 1) The Guaycume fault does not seem to be the only structure accumulating the relative movement of the volcanic forearc, since this model does not even converge.
- 2) A single fault model (going through the San Salvador graben) fits the observations; however, this may be representing the complete movement of the forearc and not a single fault.
- 3) The two features model seems to be a feasible option, although the southern block is not well constrained (due to scarce observations). Additionally, it does not seem to explain the high velocity gradient within the San Salvador graben.

The behaviour of the Guaycume fault remains unclear, but it seems that it is not the only structure accumulating the forearc sliver migration. Furthermore, our data suggests that its slip rate is probably lower than the 8 mm/yr estimated by Staller *et al.* (2016). This is consistent with the recent results of Legrand *et al.* (2020) on the San Salvador graben, which proposes that most of the deformation is accumulated further south from the Guaycume fault.

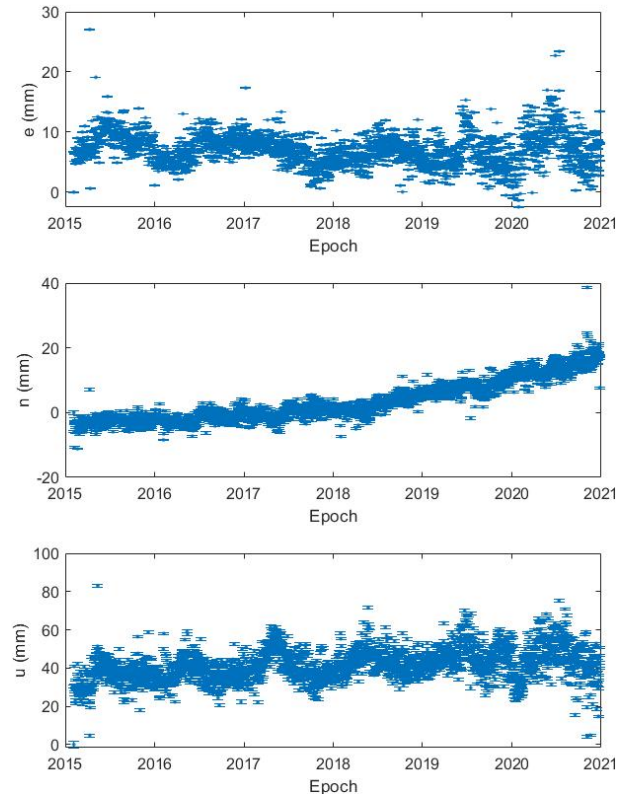
The lack of linearity and high dispersion on the GNSS time series of the stations located within San Salvador further complicates their tectonic interpretation. This can be clearly seen in Figure 3, where the north component accelerates since 2018. Volcano-tectonic interaction in the area is another key aspect that we must contemplate.

We will incorporate InSAR processing in the near future, focussing on L-Band ALOS data ( $\lambda = 23.6$  cm), which are more appropriate to deal with the forested areas of El Salvador. InSAR data, once properly corrected from atmospheric noise, will help us to better constrain the different deformation sources within the ESFZ, obtaining a continuous measurement of the ground deformation.

InSAR data and new GNSS observations will help us to close some of these gaps. In the future, we will extend this study to the remaining segments of the ESFZ, aiming to better determine the seismic hazard in El Salvador.

## References

- ALONSO-HENAR, J., BENITO, B., STALLER, A., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J.A., MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J. and CANORA, C., 2018. Large-magnitude crustal seismic sources in El Salvador and deterministic hazard scenarios. *Engineering Geology*, **243**, pp. 70-83. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.06.015.
- ALONSO-HENAR, J., SCHREURS, G., MARTINEZ-DIAZ, J., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J. and VILLAMOR, P., 2015. Neotectonic development of the El Salvador Fault Zone and implications for deformation in the Central America Volcanic Arc: Insights from 4-D analog modeling experiments. *Tectonics*, **34**. DOI: 10.1002/2014TC003723.
- ALTAMIMI, Z., REBISCHUNG, P., MÉTIVIER, L. and COLLILIEUX, X., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**(8), pp. 6109-6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.



**Figure 3:** GNSS station “CNR1” e,n,u positioning time series for the period 2015-2020. Daily positions for each component are represented as blue dots with their standard deviations as error bars.

## Acknowledgements

This work was supported by the Spanish Ministerio de Universidades (through the *Formación del Profesorado Universitario* program) under Grant FPU19/03929; and the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación under Grant CGL2017-83931-C3-3-P (GeoActiva project).

We thank the Salvadoran *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, especially Douglas Hernández, for providing data for this project.

We would also like to thank José Antonio Álvarez-Gómez, from the Universidad Complutense de Madrid, for his help with the seismic analysis and tectonic interpretation. We are grateful to the anonymous reviewers, who helped to improve the original article.



- ALVARADO, D., DEMETS, C., TIKOFF, B., HERNÁNDEZ, D., WAWRZYNIEC, T.F., PULLINGER, C., MATTIOLI, G., TURNER, H.L., RODRIGUEZ, M. and CORREA-MORA, F., 2011. Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observations. *Lithosphere*, **3**(1), pp. 3-21. DOI: 10.1130/L108.1.
- ÁLVAREZ-GÓMEZ, J.A., MEIJER, P.T., MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J. and CAPOTE, R., 2008. Constraints from finite element modeling on the active tectonics of northern Central America and the Middle America Trench. *Tectonics*, **27**(1). DOI: 10.1029/2007TC002162.
- ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., STALLER, A., MARTÍNEZ-DÍAZ, J., CANORA, C., ALONSO-HENAR, J., INSUA-ARÉVALO, J. and BEJAR, M., 2019. Push-pull driving of the Central America Forearc in the context of the Cocos-Caribbean-North America triple junction. *Scientific Reports*, **9**. DOI: 10.1038/s41598-019-47617-3.
- ARGUS, D.F., GORDON, R.G. and DEMETS, C., 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(11). DOI: 10.1029/2011GC003751.
- CANORA, C., 2011. *Análisis sismotectónico, neotectónico y paleosísmico de la zona de falla de El Salvador, Centro América*. PhD thesis. Universidad Complutense de Madrid.
- CANORA, C., MARTINEZ-DIAZ, J., VILLAMOR, P., STALLER, A., BERRYMAN, K., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., CAPOTE, R. and DIAZ, M., 2014. Structural evolution of the El Salvador Fault Zone: An evolving fault system within a volcanic arc. *Journal of Iberian Geology*, **40**, pp. 471-488. DOI: 10.5209/rev\_JIGE.2014.v40.n3.43559.
- CANORA, C., VILLAMOR, P., MARTINEZ-DIAZ, J., BERRYMAN, K., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., CAPOTE, R. and HERNÁNDEZ, W., 2012. Paleoseismic analysis of the San Vicente segment of the El Salvador Fault Zone, El Salvador, Central America. *Geologica Acta*, **10**, pp. 103-123 DOI: 10.1344/105.000001700.
- CHAVEZ HERNANDEZ, J.A., LAZECKÝ, M., ŠEBESTA, J. and BAKOŇ, M., 2020. Relation between surface dynamics and remote sensor InSAR results over the Metropolitan Area of San Salvador. *Natural Hazards*, **103**(3), pp. 3661-3682. DOI: 10.1007/s11069-020-04150-1.
- CORREA-MORA, F., DEMETS, C., ALVARADO, D., TURNER, H.L., MATTIOLI, G., HERNANDEZ, D., PULLINGER, C., RODRIGUEZ, M. and TENORIO, C., 2009. GPS-derived coupling estimates for the Central America subduction zone and volcanic arc faults: El Salvador, Honduras and Nicaragua. *Geophysical Journal International*, **179**(3), pp. 1279-1291. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04371.x.
- DACH, R., ANDRITSCH, F., ARNOLD, D., BERTONE, S., FRIDEZ, P., JÄGGI, A., JEAN, Y., MAIER, A., MERVART, L., MEYER, U., ORLIAC, E., GEIST, E., PRANGE, L., SCARAMUZZA, S., SCHAER, S., SIDOROV, D., SUSNIK, A., VILLIGER, A., WALSER, P. and THALLER, D., 2015. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. ISBN 978-3-906813-05-9. DOI: 10.7892/boris.72297.
- DEMETS, C., 2004. Central America 2003/2004, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5MG7MKZ
- DEMETS, C., 2007a. Central America 2006 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5T151RS
- DEMETS, C., 2007b. Central America 2006 - Honduras, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5P8491G
- DEMETS, C., 2008a. Central America 2007 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5NC5Z91
- DEMETS, C., 2008b. Central America 2007 - Honduras, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5HM56KP
- DEMETS, C., 2009. Central America 2008 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5CV4FVZ
- DEMETS, C., 2011a. Honduras 2008, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5GM85F9
- DEMETS, C., 2011b. Honduras 2010, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5736P0K
- DEMETS, C. and TIKOFF, B., 2015a. Central America 2009 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T58P5XT1
- DEMETS, C. and TIKOFF, B., 2015b. Central America 2010 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T54X5633
- DEMETS, C. and TIKOFF, B., 2015c. Central America 2012 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T56Q1VHC
- DEMETS, C. and TIKOFF, B., 2015d. Central America 2013 - El Salvador, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5Z60MCZ
- DEMETS, C. and TIKOFF, B., 2015e. Central America 2013 - Honduras, UNAVCO, GPS/GNSS Observations Dataset. DOI: 10.7283/T5PR7T97

- EBMEIER, S.K., BIGGS, J., MATHER, T.A. and AMELUNG, F., 2013. On the lack of InSAR observations of magmatic deformation at Central American volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(5), pp. 2571-2585. DOI: 10.1002/jgrb.50195
- ELLIOTT, J.R., WALTERS, R.J. and WRIGHT, T.J., 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications*, **7**(1), pp. 13844. Available from: <https://doi.org/10.1038/ncomms13844> ISSN 2041-1723. DOI: 10.1038/ncomms13844
- ELLIS, A., DEMETS, C., BRIOLE, P., COSENZA, B., FLORES, O., GRAHAM, S.E., GUZMÁN-SPEZIALE, M., HERNÁNDEZ, D., KOSTOGLODOV, V., LAFEMINA, P., LORD, N., LASSERRE, C., LYON-CAEN, H., RODRIGUEZ MARADIAGA, M., MCCAFFREY, R., MOLINA, E., RIVERA, J., ROGERS, R. and STALLER, A., 2018. GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 – Time-dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, **214**(3), pp. 2177-2194. DOI: 10.1093/gji/ggy249
- ELLIS, A., DEMETS, C., MCCAFFREY, R., BRIOLE, P., COSENZA MURALLES, B., FLORES, O., GUZMÁN-SPEZIALE, M., HERNÁNDEZ, D., KOSTOGLODOV, V., LAFEMINA, P., LORD, N., LASSERRE, C., LYON-CAEN, H., RODRIGUEZ MARADIAGA, M., MOLINA, E., RIVERA, J., ROGERS, R., STALLER, A. and TIKOFF, B., 2019. GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 2: Block rotations and fault slip rates, fault locking and distributed deformation. *Geophysical Journal International*, **218**(2), pp. 729-754. DOI:10.1093/gji/ggz173
- GARIBALDI, N., TIKOFF, B. and HERNÁNDEZ, W., 2016. Neotectonic deformation within an extensional stepover in El Salvador magmatic arc, Central America: Implication for the interaction of arc magmatism and deformation. *Tectonophysics*, **693**, pp. 327-339. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.05.015
- INTERNATIONAL GNSS SERVICE, 2020. Network – International GNSS Service (igs.org). Available: <https://www.igs.org/network/> [7/12, 2021].
- INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTRE, 2021. ISC GEM Earthquake Catalogue. DOI: 10.31905/d.808.b.825
- JIBSON, R., CRONE, A., HARP, E., BAUM, R., MAJOR, J., PULLINGER, C., ESCOBAR, C., MARTÍNEZ, M. and SMITH, M., 2004. Landslides triggered by the 13 January and 13 February 2001 earthquakes in El Salvador. In: *Natural Hazards in El Salvador*, William I. Rose, Julian J. Bommer, Dina L. López, Michael J. Carr, Jon J. Major, pp. 69-88 ISBN 0-8137-2375-2. DOI: 10.1130/0-8137-2375-2.69
- KOBAYASHI, D., LAFEMINA, P., GEIRSSON, H., CHICHACO, E., ABREGO, A.A., MORA, H. and CAMACHO, E., 2014. Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **15**(5), pp. 1671-1683. DOI: 10.1002/2014GC005234
- LAFEMINA, P., DIXON, T.H., GOVERS, R., NORABUENA, E., TURNER, H., SABALLOS, A., MATTIOLI, G., PROTTI, M. and STRAUCH, W., 2009. Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10**(5). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GC002181>
- LEGRAND, D., MARROQUÍN, G., DEMETS, C., MIXCO, L., GARCÍA, A., VILLALOBOS, M., FERRÉS, D., GUTIÉRREZ, E., ESCOBAR, D., TORRES, R. and HERNÁNDEZ, D., 2020. Active deformation in the San Salvador extensional stepover, El Salvador from an analysis of the April–May 2017 earthquake sequence and GPS data. *Journal of South American Earth Sciences*, **104**, pp. 102854 DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102854
- LYON-CAEN, H., BARRIER, E., LASSERRE, C., FRANCO, A., ARZU, I., CHIQUIN, L., CHIQUIN, M., DUQUESNOY, T., FLORES, O., GALICIA, O., LUNA, J., MOLINA, E., PORRAS, O., REQUENA, J., ROBLES, V., ROMERO, J. and WOLF, R., 2006. Kinematics of the North American–Caribbean–Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic–Motagua fault system. *Geophysical Research Letters*, **33**(19). DOI:10.1029/2006GL027694
- MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J.A., STALLER, A., ALONSO-HENAR, J., CANORA, C., INSÚA-ARÉVALO, J.M., TSIGE, M., VILLAMOR, P., HERRERO-BARBERO, P., HERNÁNDEZ-MORENO, C., HERNÁNDEZ, W., HERNÁNDEZ, D., MARROQUÍN, G. and MIXCO, L., 2021. Active faults of El Salvador. *Journal of South American Earth Sciences*, **105**, pp. 103038. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.103038
- MARTINEZ-DIAZ, J., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., BENITO, B. and HERNANDEZ, D., 2004a. Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, **32**, pp. 65-68 DOI: 10.1130/G20089.1
- MARTINEZ-DIAZ, J., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., BENITO, B. and HERNANDEZ, D., 2004b. Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, **32**, pp. 65-68 DOI: 10.1130/G20089.1
- NATIONAL GEODETIC SURVEY 2017. National Geodetic Survey - National Geodetic Survey (noaa.gov). Available: <https://geodesy.noaa.gov/CORS/> [7/12, 2021].
- REATH, K., PRITCHARD, M., POLAND, M., DELGADO, F., CARN, S., COPPOLA, D., ANDREWS, B., EBMEIER, S.K., RUMPF, E., HENDERSON, S., BAKER, S., LUNDGREN, P., WRIGHT, R., BIGGS, J., LOPEZ, T., WAUTHIER, C., MORUZZI, S., ALCOTT, A., WESSELS, R., GRISWOLD, J., OGBURN, S., LOUGHLIN, S., MEYER, F., VAUGHAN, G. and BAGNARDI, M., 2019. Thermal, Deformation, and Degassing Remote Sensing Time Series (CE 2000–2017)

- at the 47 most Active Volcanoes in Latin America: Implications for Volcanic Systems. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124**(1), pp. 195-218. DOI: 10.1029/2018JB016199
- RODRÍGUEZ, M., DEMETS, C., ROGERS, R., TENORIO, C. and HERNANDEZ, D., 2009. A GPS and modelling study of deformation in northern Central America. *Geophysical Journal International*, **178**(3), pp. 1733-1754. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04251.x
- SANTAMARÍA-GÓMEZ, A., 2019. SARI: interactive GNSS position time series analysis software. *GPS Solutions*, **23**(2), pp. 52. DOI: 10.1007/s10291-019-0846-y
- SAVAGE, J.C. and BURFORD, R.O., 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, **78**(5), pp. 832-845. DOI: 10.1029/JB078i005p00832
- STALLER, A., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J., MARTINEZ-DIAZ, J. and BENITO, B., 2016. Present day kinematics of El Salvador Fault Zone.
- STALLER, A., MARTINEZ-DIAZ, J., BENITO, B., HERNANDEZ, D., DÍAZ, M., PULLINGER, C., DEMETS, C., CANORA, C., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J. and BEJAR, M., 2008. Red GPS "ZFESNET" para el estudio de la evolución del ciclo sísmico de deformaciones y esfuerzos asociado a la Zona de Falla de El Salvador.
- UNAVCO, 2020. UNAVCO. Available: <https://www.unavco.org/> [7/12, 2021].

# ***CIGeo***

**Earth observation,  
Cartography, and  
Environmental applications**  
*Observación de la Tierra,  
Cartografía y Aplicaciones  
Medioambientales*



## DETECTANDO LOS DESEQUILIBRIOS DOTACIONALES COMO GENERADORES DE PROBLEMAS EN LA MOVILIDAD DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

### DETECTING ENDOWMENT IMBALANCES AS GENERATORS OF PROBLEMS IN THE MOBILITY OF THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO

Susana Astudillo-Ortega<sup>a,b,\*</sup>, Antonio Vázquez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España.  
tatiana.astudillo.ortega@alumnos.upm.es; antonio.vazquez.hoehne@upm.es

<sup>b</sup> Observatorio de la Movilidad Metropolitana, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.

#### Abstract:

In metropolitan areas, daily mobility for work reasons, study, daily procedures, leisure and free time acquires great importance. This research aims to build a methodology for the analysis of daily mobility based on the use of intelligent systems that allow research the way to find the origin of congestion problems in urban mobility generated by imbalances in the spatial distribution of services, especially those that can be avoided with an adequate focus on the management of the provisioned location. This article addresses the analysis of the educational variable from the stages of compulsory education, in order to analyze the territorial distribution of these educational services, determine if there are areas with imbalances and define whether the provision of school units is related to the demand of the school-age population. Based on the algorithms used, it was obtained as a result that of the 1,269 neighborhoods / sectors that make up the Metropolitan District of Quito, 43% could reach an educational endowment balance, 46% tend to present a greater demand (south of the District and areas peri-urban), and the remaining 11% a greater offer (hypercenter of the city). In the article, concepts such as "forced mobility" and a partial redistribution simulation procedure (in which the terms "targeted demand", "targeted supply" and "targeted balance" are coined) are presented as inputs.

**Key words:** mobility, GIS, intelligent systems, imbalances, space distribution, displacements

#### Resumen:

En las áreas metropolitanas la movilidad cotidiana por motivos laborales, de estudio, trámites cotidianos, ocio y tiempo libre adquiere una importancia crucial. En esta investigación se pretende construir una metodología de análisis de movilidad cotidiana basada en la utilización de sistemas inteligentes que permitan investigar la forma de encontrar el origen de los problemas de congestión en la movilidad urbana generados por desequilibrios de distribución espacial de los servicios, especialmente aquellos que pueden ser evitados con una adecuada focalización en la gestión de la ubicación dotacional. El presente artículo aborda el análisis de la variable educativa a partir de las etapas de enseñanza obligatoria, con la finalidad de analizar la distribución territorial de estos servicios educativos, determinar si existen áreas con desequilibrios y definir si la dotación de unidades escolares está relacionada con la demanda de la población en edad escolar. En función de los algoritmos empleados se obtuvo como resultado que de los 1269 barrios-sectores que conforman el Distrito Metropolitano de Quito, el 43% podrían alcanzar un equilibrio dotacional educativo, el 46% tienden a presentar una mayor demanda (sur del Distrito y áreas periurbanas), y el 11% restante una mayor oferta (hipercentro de la ciudad). En el artículo se presentan como aportaciones conceptos como el de "movilidad forzada" y un procedimiento de simulación de redistribución parcial, en donde se acuñan los términos de "demanda dirigida", "oferta dirigida" y "balance dirigido".

**Palabras clave:** movilidad, SIG, sistemas inteligentes, desequilibrios, distribución espacial, desplazamientos

### 1. Introducción

La intensa movilidad es una característica determinante de la modernidad. La movilidad representa una variable cuantitativa que mide la cantidad de desplazamientos que las personas realizan en un determinado ámbito geográfico en un intervalo de tiempo determinado (p. ej.: número de viajes/día, pasajeros/km/día, tiempo medio de

viaje, etc.) y puede ser analizada mediante patrones espacio-temporales (Lizarraga 2012).

En América Latina los diferentes problemas de movilidad están asociados con la accidentalidad vial, la congestión vehicular, la contaminación ambiental y la inseguridad, los cuales están relacionados con el progresivo incremento del uso del transporte privado y el correspondiente decremento del colectivo (Lizarraga

\* Corresponding Author: Susana Astudillo-Ortega, [tatiana.astudillo.ortega@alumnos.upm.es](mailto:tatiana.astudillo.ortega@alumnos.upm.es)

2012). Alcántara (2010) considera que estos problemas enfrentados por la población están vinculados con la inequidad en el acceso físico y económico al espacio urbano, a los servicios e infraestructura, a la seguridad, a la calidad ambiental, a la comodidad y a la conveniencia.

La situación social del Ecuador, sobre todo de las grandes ciudades como el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), es en parte común con la de otros territorios latinoamericanos donde es evidente la falta de espacios públicos, la inseguridad, la no inclusión social y el desorden territorial (Jardon and Gierhake 2020). El DMQ tiene una estructura urbana altamente condicionada por las limitaciones de la geografía y vulnerable ante las amenazas naturales, por lo que los problemas cotidianos y las perturbaciones episódicas de la movilidad urbana dificultan el funcionamiento de la ciudad y pueden llegar a limitar su desarrollo (Demoraes 2015).

Los estudios que han analizado la movilidad cotidiana de las personas y los problemas que conlleva, lo han realizado en base a datos censales y/o encuestas de origen-destino para determinar el motivo de desplazamiento y el tiempo de empleo en el mismo (Henry and Hubert 2000; Demoraes 2015; Duriez 2019; Vallejo 2017).

En la actualidad, Ecuador no cuenta con información estadística sobre movilidad espacial entre diversas zonas de poblamiento, lo que impide conocer las relaciones que se producen entre ellas (Fernández 2017).

El objetivo principal del artículo es desarrollar una metodología de análisis de movilidad cotidiana basada en la utilización de sistemas inteligentes que permitan investigar la forma de encontrar el origen de los problemas de congestión en la movilidad urbana desarrollados por desequilibrios de distribución espacial de los servicios, especialmente los que pueden ser evitados con una adecuada focalización en la gestión de la ubicación dotacional.

Todo un conjunto de factores puede contribuir a los problemas de movilidad, como son los laborales, los sanitarios, los de ocio y esparcimiento, los deportivos, religiosos, etc. Cuando en cualquiera de ellos se genera una movilidad que no se tendría que producir si hubiese una dotación espacialmente equilibrada, entonces cabría considerarlos como “desplazamientos forzados”, inducidos por el desequilibrio y, en teoría, soslayables. La cuestión es compleja, pues cuanto más especializados sean, también serán menos evitables, más necesarios: es el caso, por ejemplo, de las distintas especialidades de enseñanzas universitarias respecto a la enseñanza primaria.

El ensayo consta de seis secciones, la primera aborda el aspecto introductorio del estudio, la segunda se centra en la problemática de la movilidad cotidiana en el DMQ y el sistema de transporte en el cual se funda, la tercera realiza una descripción de la zona de estudio, la cuarta presenta la metodología establecida para el análisis de la variable de educación, la misma que puede ser replicada para el análisis de otras variables, en la quinta sección se presentan los resultados obtenidos y en el último apartado se realiza observaciones de la investigación en conjunto, a modo de conclusiones.

## 2. Problemas en la movilidad cotidiana del DMQ

Ruiz (2013) menciona que uno de los problemas más urgentes por tratar dentro de la movilidad urbana, consiste en entender la dinámica de los desplazamientos y poder gestionarlos con la finalidad de satisfacer las necesidades de la demanda.

Dentro del Plan Maestro de Movilidad del DMQ (2009) se aborda la problemática del sistema de movilidad a partir de cinco componentes: transporte, gestión de tráfico, vialidad-infraestructura, gestión participativa del sistema de movilidad y el marco regulatorio. En cuanto a la componente transporte, se indica que el total de viajes que se producen diariamente en el DMQ es de 1,6 millones en transporte privado y 2,9 millones en transporte público; los viajes en transporte público están disminuyendo en una proporción promedio del 1,44% anual. Se proyecta que de mantenerse estas condiciones al año 2025, el 59% de los viajes se realizarían en transporte privado y el 41% en transporte público.

El hipercentro de la ciudad es la zona que concentra la mayor cantidad de viajes, siendo origen y destino del 50% de los que se realizan en transporte público, donde el 64% proviene de fuera de los límites de su ámbito geográfico, y el 36% dentro de dichos límites. Esto se debe a la gran cantidad de equipamientos urbanos y de servicios que se ubican en esta área (Vallejo 2017).

En cuanto a la variable transporte, la distribución territorial de los equipamientos de educación y la falta de una regulación sobre la asignación poblacional para su uso, genera una gran demanda de viajes que ha propiciado el incremento de la flota del transporte escolar, cuyo número es similar al de la flota del transporte público.

El componente gestión de tráfico registra altos niveles de saturación de congestión vehicular dentro del DMQ, los mismos que han superado la capacidad física de las vías en varios tramos, especialmente al interior del hipercentro y en sus vías de acceso. La situación se agrava debido a la presencia de equipamientos urbanos que incrementan el número de viajes y dan lugar a que se produzcan fricciones en los flujos vehiculares, como estacionamientos, paradas inapropiadas de buses, cruce aleatorio de peatones, dispositivos de control de tráfico deficientes, entre otros. Los efectos colaterales que trae consigo este problema son: contaminación, inseguridad vial y ruido.

Dentro del componente viabilidad tenemos que la movilidad registra deficiencias con la conectividad y capacidad necesaria para la estructuración y desarrollo adecuado de los desplazamientos de las personas, esta situación incide en el descenso del nivel de servicio de la red vial principal, la cual se encuentra saturada en un 32% (MDMQ 2009). Además, el inadecuado uso del suelo que se encuentra aledaño a los principales ejes viales ha incidido en la disminución de la capacidad vial.

A lo largo de los años el componente de gestión participativa ha originado una dispersión de responsabilidad relacionada con la movilidad al interior del DMQ, lo que ha dificultado la toma de decisiones adecuadas en la ejecución de planes, programas y proyectos. Además, no se ha socializado con la ciudadanía dichos proyectos, especialmente los que

tienen que ver con la ubicación de obras relacionadas con la dotación de infraestructura y equipamiento.

En relación al marco regulatorio, el principal problema es que no se han elaborado proyectos de ordenanzas concisas y concretas donde se analicen y formulen lineamientos de política general en cuanto a la movilidad, viabilidad, tránsito y transporte público y privado en el DMQ.

En forma general dentro del DMQ son pocos los estudios que se han realizado sobre la dotación y ubicación de los equipamientos e infraestructuras dentro de la ciudad,

además, la falta de calidad de los servicios hace que la población necesite desplazarse a otros barrios y/o sectores para satisfacer sus necesidades.

### 3. Zona de estudio

El DMQ se localiza en la provincia de Pichincha, ocupa una superficie de 4.235 km<sup>2</sup> y alberga al 15,5% de la población nacional (Fig. 1). Se compone de 32 parroquias urbanas y 33 parroquias rurales y suburbanas (Pinto 2013).

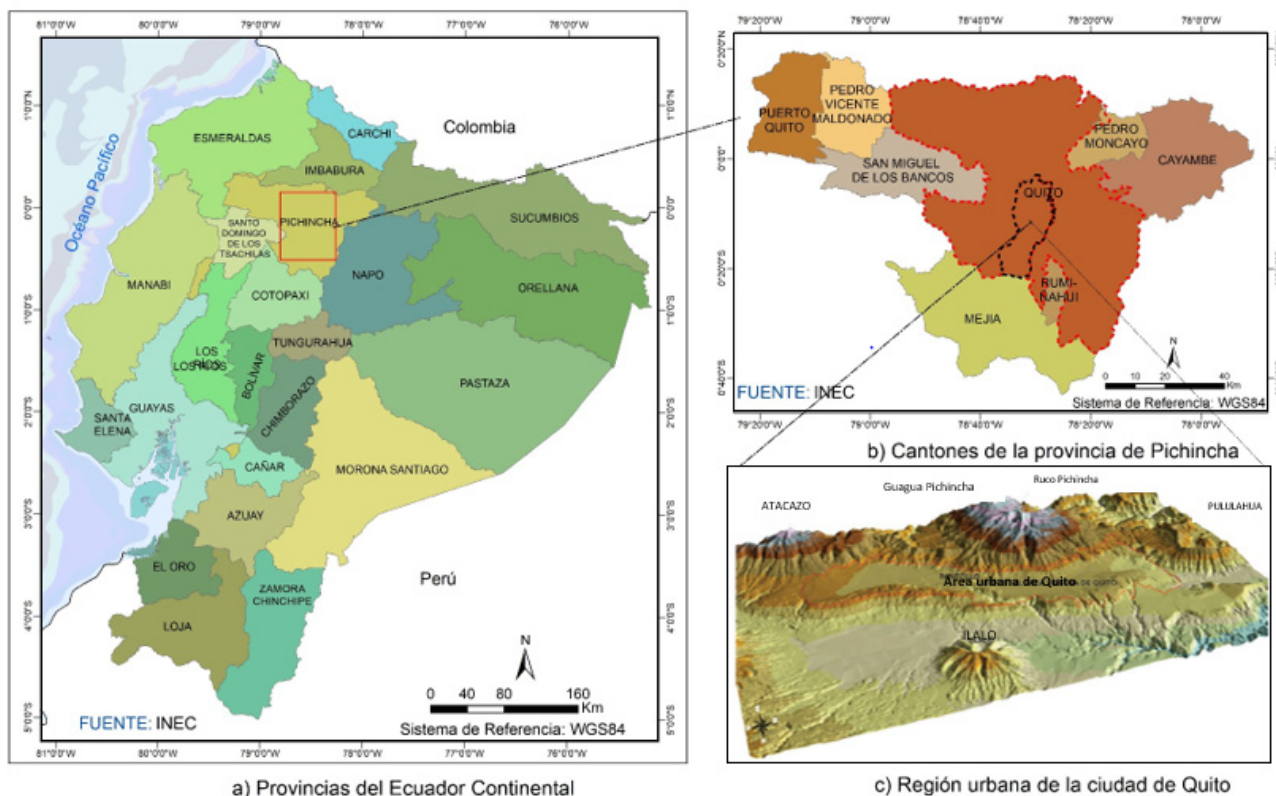


Figura 1: Mapa de localización del área de estudio. Fuente cartográfica: (INEC 2010).

Su estructura territorial está fuertemente condicionada por su geología y geomorfología, que han incidido históricamente en la conformación de la ciudad. La urbe quiteña se asienta sobre una grada intermedia en torno a los 2800 m de altitud originada por el tectonismo entre la Cordillera Occidental y la Cuenca de Tumbaco, con fallas meridianas visibles en el trayecto Quito-Tumbaco. Esta grada, colgada, presenta a la base pendientes fuertes y abruptas, con cobertura vegetal muy discontinua y un desnivel que varía entre 400 a 500 m, actualmente estas zonas se encuentran en proceso de urbanización generando que los afloramientos superficiales sean escasos. (Winckell *et al.* 1997).

Territorialmente la ciudad de Quito y sus áreas conurbadas forman el centro de una red urbana que estructura un conjunto diverso y heterogéneo de zonas económicas y productivas (industriales, minera, forestales y agropecuarias).

De acuerdo a los datos obtenidos el DMQ está formado por 1269 barrio-sectores, de los cuales 517 se encuentran ubicados dentro del área urbana de Quito y 752 barrios se ubican en la parte rural.

El sistema educativo dentro del área de estudio presenta un total de 1109 centros, de los cuales, el 54% son de tipo particular, 39% fiscal, 5% fiscomisional, y el 2% restante son de tipo municipal. En la Figura 2 puede observarse con claridad la clasificación de las unidades educativas a nivel urbano y rural distribuidas por su tipo de sostenimiento.

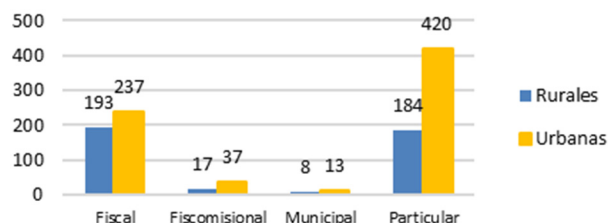


Figura 2: Unidades educativas a nivel urbano y rural clasificadas por el tipo de sostenibilidad.

### 4. Material y métodos

Para tratar la variable educación se empleó información bibliográfica, sobre todo artículos científicos y libros

basados en movilidad urbana, calidad urbana y mecanismos de desplazamientos en el DMQ (Tabla 1). De igual forma se compilaron datos e información geográfica de diferentes instituciones gubernamentales y/u organismos para tratar la variable en análisis. En la Tabla 1 se presenta los insumos utilizados.

**Tabla 1:** Fuentes cartográficas utilizadas en el análisis de la variable educación.

<i>Material</i>	<i>Formato</i>	<i>Fuente</i>
Límites administrativos del DMQ	*shp	Gobierno Abierto del DMQ
Sectores Censales	*shp	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)
Barrio-Sector	*shp	Gobierno Abierto del DMQ
Archivo Maestro de Instituciones Educativas Periodo 2018 - 2019	*xlsx	Ministerio de Educación del Ecuador
Instituciones educativas del DMQ	*shp	Gobierno Abierto del DMQ

La metodología empleada consta de dos fases, la primera corresponde al tratamiento de la información y la segunda consiste en la utilización de algoritmos que permitió el análisis espacial de los datos, su conversión y correlación de variables, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La idea de poder realizar un balance entre la disponibilidad de plazas escolares y la necesidad de escolarización de la población cuenta con el problema inicial de que la información de las dotaciones disponibles se encuentra agrupada por los llamados barrio-sectores, mientras que la información sobre la población en edad escolar se dispone en unidades censales, normalmente de menor superficie y no siempre coincidentes.

De manera específica, en la primera fase se relacionó la distribución de la población con la distribución de los servicios de educación existentes dentro del DMQ; esta comparación espacial fue realizada en las unidades denominadas barrio-sector, para esto fue necesario una discriminación entre educación básica (5 a 12 años) y secundaria (12 a 18 años) de otro tipo de información con la finalidad de determinar si existen áreas con desequilibrio y definir si la dotación de unidades escolares está adecuadamente adaptada a la demanda de la población en edad escolar existente y, por ende, genera una serie de movimientos “forzados” que serían evitables con una óptima distribución espacial. Además, se dotó de coordenadas a las unidades educativas debido a la inexistencia de las mismas en determinadas instituciones. Con la finalidad de determinar si existen áreas con desequilibrio y definir si la dotación de unidades escolares está adecuadamente adaptada a la demanda de la población en edad escolar existente y, por ende, genera una serie de movimientos “forzados” que serían evitables con una óptima distribución espacial.

Cabe mencionar que, para dicha comparación se adaptó el censo de población en lo referente a edad educativa, para esto se partió de la estructura de unidades censales las cuales fueron convertidas a unidades por barrio-sector.

Las unidades censales son generalmente menores a los barrios-sectores, por lo que se incluyeron en los barrios-sectores cuantas unidades censales correspondían espacialmente. Para evitar duplicidades se asignó cada unidad censal a un único barrio-sector, basado en la correspondencia por mayor superficie. Así se pudo obtener el dato de la población escolarizada en cada barrio-sector y poderlo comparar con el número de estudiantes.

Como inconveniente puntual del sistema resultó que aquellos casos excepcionales de barrios-sectores muy pequeños se quedaron sin información sobre población escolarizada. Para estos casos se integraron las dotaciones al barrio-sector de mayor área. En definitiva, el problema se solventó disminuyendo parcialmente la granularidad.

Finalmente teniendo en cuenta que se trata de un problema de cantidad de tráfico extra generado, se optó como mejor indicador de desequilibrio la diferencia entre población escolarizada y dotaciones de plazas ocupadas, mas no el porcentaje.

La consideración se podría haber terminado en un simple balance entre demanda y oferta de plazas en cada unidad espacial, pero en un continuo urbano la viabilidad de trasladarse de un barrio-sector al vecino con plazas disponibles no genera problemas especiales de movilidad. Para no computar los desplazamientos de vecindad como problemas de movilidad se convino en no considerar como generadores de tráfico los casos en los que las necesidades de escolarización se pueden ver satisfechas en el barrio-sector vecino. Esto nos lleva a una situación compleja en que las disponibilidades de un barrio-sector se ven condicionados por las demandas y las ofertas más o menos satisfechas de sus vecinos: esto es, se llega a una situación de mutua dependencia.

Esto se ha resuelto mediante una aproximación de progresivos ajustes programada en Phyton donde se han considerado los siguientes pasos que simulan por reiteraciones sucesivas lo que puede ocurrir en la realidad. Cabe señalar que todo esto se realizó en la segunda fase del análisis.

1. Demanda repartida para con las unidades limítrofes: determinación de la “demanda dirigida”. El primer planteamiento es que el exceso de demanda que existe en un barrio-sector se ve satisfecha con las unidades del entorno que presentan oferta. Como el proceso es reiterativo y autorregulado, en principio se ha planteado que el exceso de demanda inicial hacia cada una de las unidades colindantes es una porción simple, alícuota según el número de unidades limítrofes a la unidad con oferta. Esto se ha denominado (exceso de) “demanda dirigida” a cada una de las unidades del entorno. Así la demanda total del barrio-sector se divide entre el número de polígonos limítrofes con oferta, quedando así  $n$  “demandas dirigidas”, cada una con un valor  $\text{total}/n$ .
2. Oferta repartida para con las unidades limítrofes: determinación de la “oferta dirigida”. Por otra parte, en los barrio-sectores con exceso de oferta, se plantea una distribución de esa oferta en función de la presión que ejerce cada una de las unidades limítrofes con exceso de demanda, expresada como la demanda dirigida calculada anteriormente. El procedimiento consiste en calcular la suma de todas



las demandas dirigidas desde los polígonos limítrofes y respecto a esta suma determinar el valor porcentual que representa cada una y aplicarlo a la oferta total. Así para cada una de las unidades con demanda limítrofe se determinará una oferta dirigida, que a diferencia del caso anterior no será alcuota, sino proporcional.

De esta forma obtenemos para cada par de unidades limítrofes con exceso de demanda y de oferta, un valor de demanda y otro de oferta dirigidos, que desembocan en un balance “dirigido”.

- Determinación del “balance dirigido”. Se calcula el balance entre la demanda dirigida y la oferta dirigida de cada par de situaciones de contacto limítrofe de oferta y demanda obteniéndose un doble “balance dirigido”, como “balance dirigido de oferta” y “balance dirigido de demanda”.

Este balance dirigido tendrá en el caso favorable (bien de oferta o de demanda) valor positivo y en el otro será igual a cero, originando los siguientes escenarios:

- Si la demanda es mayor: quedará un resto no satisfecho de demanda, que se imputa de vuelta como “balance dirigido de demanda” a la unidad demandante, para una posible compensación posterior. Mientras, para la ofertante, se ha consumido la oferta planteada, con lo que el valor será cero.
- Si la oferta es mayor: quedará un resto sobrante de oferta que no ha sido necesario utilizar en la compensación y que vuelve como “balance dirigido de oferta” para una posible utilización posterior. Mientras para la demandante, se ha satisfecho la demanda planteada, con lo que el valor será cero.
- Cuando sean iguales ambos valores de oferta y demanda, tendrán ambos valores cero.

- Iteraciones hasta finalización del procedimiento. Para cada unidad de demanda se obtiene la suma de todos los “balances dirigidos de demanda” limítrofes. Igualmente, para cada unidad de oferta se obtendrá la suma de todos los “balances dirigidos de oferta” de las unidades limítrofes. Como resultado se obtendrá un mapa con nuevos valores, que pueden ser de tres tipos:

- Valores donde sigue habiendo demanda.
- Valores donde sigue habiendo oferta.
- Valores con la demanda o la oferta en cero.

Se repite todo el proceso hasta que ya no haya “ofertas dirigidas” ni “demandas dirigidas”, obteniendo de esta manera el mapa definitivo de zonas con exceso de oferta, exceso de demanda y zonas con equilibrio.

## 5. Resultado y discusión

De acuerdo al análisis realizado en una primera aproximación se obtiene que dentro del DMQ 698 barrios no poseen una unidad educativa de enseñanza primaria y secundaria, lo que hace que los estudiantes tengan que desplazarse a otros barrios aledaños o alejados de su

residencia para poder acceder a este servicio, lo que implica en muchos casos la utilización del transporte público o privado.

En base al indicador de desequilibrio obtenido al realizar la comparación en la unidad espacial del barrio-sector, desde la educación y desde la población resulta que 881 barrios a nivel del DMQ y 349 barrios que se encuentran en el área urbana son consideradas áreas críticas donde existe mayor demanda de la población escolarizada y no existe la suficiente oferta de unidades educativas que satisfagan las necesidades de los estudiantes. En la Figura 3 se pueden visualizar las áreas críticas a nivel del DMQ y en la Figura 4 a nivel del área urbana de Quito. Estado previo sin compensaciones de barrios limítrofes.

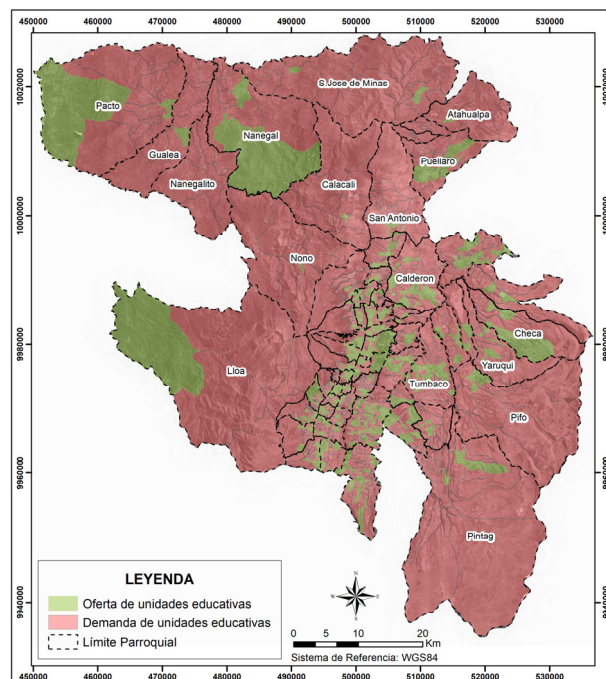


Figura 3: Mapa de los barrios que presentan oferta y demanda de unidades educativas a nivel de la población (Estado previo sin compensaciones de barrios limítrofes).

Adviértase la profusión de áreas con necesidades (en rojo) resultado de una consideración simple de oferta y demanda de plazas escolares por unidad espacial, por barrio-sector. Tal profusión atenaza, de hecho, la posibilidad de actuaciones eficaces.

Al aplicar el algoritmo elaborado (que implica la posibilidad de traslado de los estudiantes de un barrio-sector al vecino sin considerarlo como problema adicional de movilidad) se obtuvieron unos resultados mucho más refinados, que describen mejor el problema y que sitúan en unos 582 los barrios con demanda no satisfecha (y 215 si nos restringimos al área urbana del DMQ) según se expresa en la Tabla 2.

Con la metodología aplicada se evidencia la existencia de barrios que pueden alcanzar un equilibrio dotacional educativo y de esta manera la población vinculada a la edad escolar no tendría que desplazarse largas distancias para acceder a una institución educativa, basta con desplazarse a barrios aledaños o próximos para acceder a este servicio.

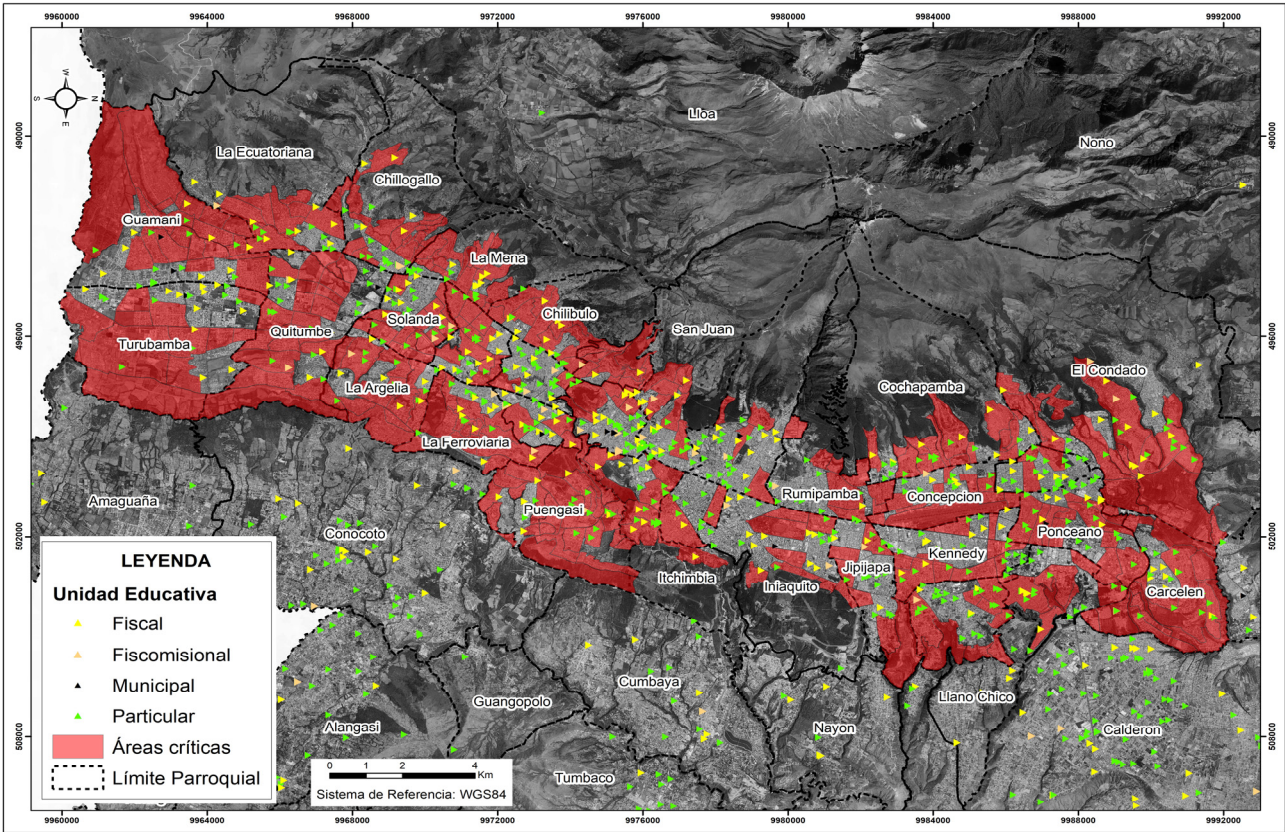


Figura 4: Mapa de los barrios que son considerados críticos a nivel del área urbana de Quito (Estado previo sin compensaciones de barrios limítrofes).

Tabla 2: Resultados obtenidos tras las iteraciones realizadas.

Descripción	DMQ	Área Urbana del DMQ
Compensados	555	226
Barrios que siguen teniendo demanda	582	215
Barrios que siguen teniendo oferta	132	77
Total de Barrios	1269	518

En la Figura 5 se puede observar que a nivel del DMQ los barrios que siguen teniendo demanda de unidades educativas son aquellos que se encuentran principalmente dentro de las parroquias rurales y zonas periurbanas de la ciudad. En la Figura 6 se identifica de mejor manera que a nivel urbano del DMQ los barrios ubicados especialmente en el sur de Quito (Guamani, La Ecuatoriana, Chillotallo, La Argelia, La Mená, Solanda, Nueva Aurora, Lucha de los Pobres, Pueblo Unido, La Ferroviaria Alta, Turubamba de Monjas, etc) y los barrios ubicados en áreas periurbanas de la ciudad (Chiribulo, Libertad, San Fernando, Alma Lojana, San Juan, Puengasí, Atucucho, Santa Rosa Singuna, Pisulí, La Josefina, Carcelén, El Condado, Comité del Pueblo, Jaime Roldós, Cochapamba Sur, entre otros) son aquellos que siguen teniendo demanda de unidades educativas, donde es necesario el planteamiento de acciones por parte del gobierno para la dotación de estos servicios debido a que así se reduciría el desplazamiento de las personas que buscan estos servicios en otros barrios, que inclusive en muchos de los casos se

desplazan a polos opuestos para satisfacer sus necesidades. Finalmente, los barrios ubicados en el hipercentro de la ciudad de Quito todavía poseen una alta oferta de instituciones educativas, por lo que es necesario su regulación y control.

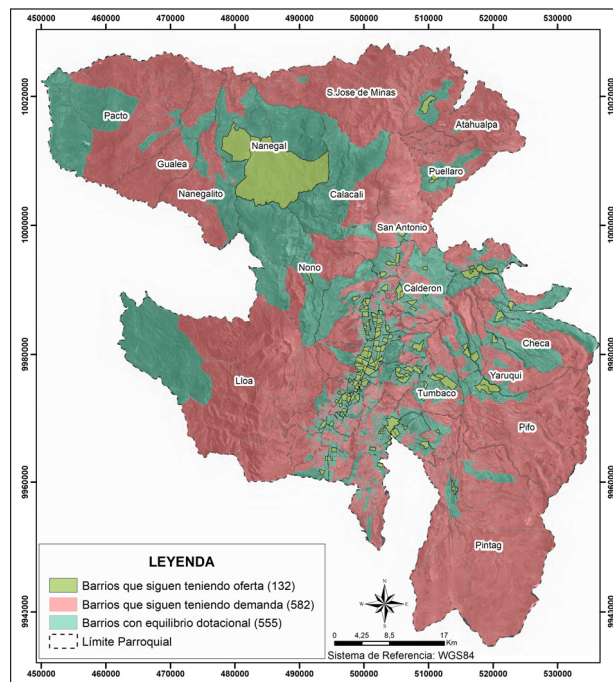


Figura 5: Mapa que contiene el resultado final, del proceso aplicado para su compensación a nivel del DMQ.



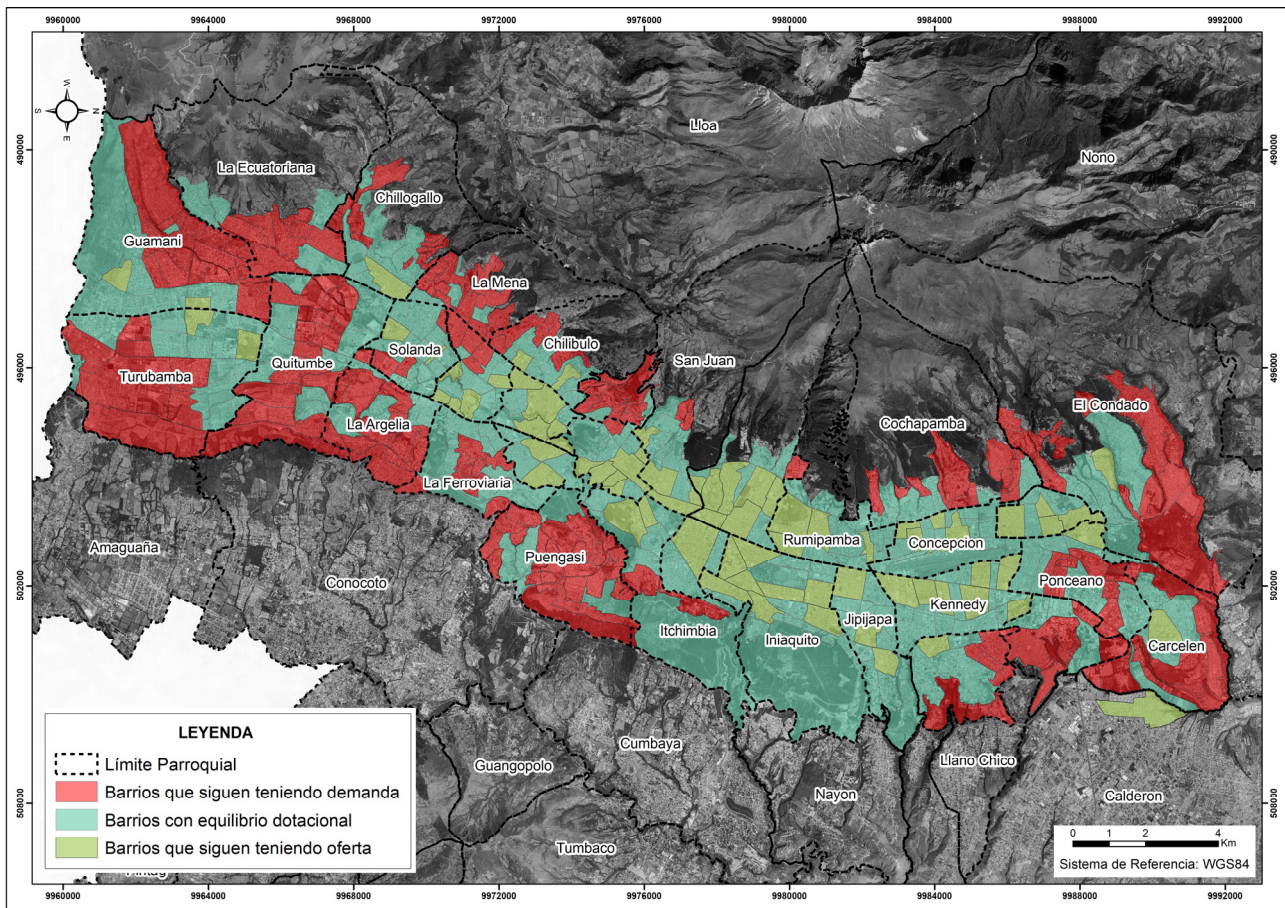


Figura 6: Mapa que contiene el resultado final del proceso aplicado para su compensación a nivel del área urbana de Quito.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Un problema complejo como es la relación entre unas desigualdades de demanda multifocales y de oferta multifocales se puede resolver mediante una simulación programada en diversas reiteraciones.

Los nuevos conceptos como son desplazamiento forzado, demanda dirigida, oferta dirigida balance dirigido han permitido abordar el problema de la investigación.

En función al análisis realizado de la variable educación se obtuvo como resultado que de los 1269 barrios-sectores que conforman el Distrito Metropolitano de Quito, el 43% podría alcanzar un cierto equilibrio dotacional educativo entre oferta y demanda, el 46% tiende a presentar una mayor demanda (sur del Distrito y áreas periurbanas), y el 11% restante una mayor oferta (hipercentro de la ciudad).

Con ello se puede concluir y localizar un desequilibrio dotacional que actúa como generador de problemas en la movilidad del DMQ, por lo que es necesario el planteamiento de acciones para reducir el impacto dentro de la ciudad.

Para verificar los resultados obtenidos se podría realizar una encuesta origen-destino a los estudiantes o a la población ubicada en los barrios-sectores donde existe mayor oferta y mayor demanda de instituciones educativas, con el fin de analizar tiempo de desplazamiento y tipo de servicio que emplea para trasladarse a la institución educativa.

Sin embargo, Ecuador no cuenta actualmente con información estadística adecuada sobre movilidad espacial, es decir, no existen censos o encuestas origen-destino acerca de la movilidad entre los núcleos de población, impide conocer las relaciones que se producen entre ellos. Por ende, es necesario incorporar dentro del censo de población y vivienda, que está por desarrollarse en Ecuador, preguntas a la población como la distancia recorrida, el tiempo y dinero gastado en ellos, el medio empleado, el horario utilizado, el motivo de desplazamiento, etc., datos relevantes para este tipo de estudios.

La metodología planteada para el análisis de la variable educación puede ser replicada en otra ciudad del Ecuador o de América Latina, debido a su alta similitud y así se podrá determinar si actúa como un desequilibrio dotacional y por ende puede ser considerado como generador de problemas en la movilidad de la ciudad.

Dentro del artículo se da a conocer parte de la investigación que se está desarrollando, posteriormente se analizarán otras variables que inciden en la movilidad del DMQ como generadores de problemas y, de igual forma, se plantearán estrategias, acciones y/o políticas de intervención y gestión a corto, mediano y a largo plazo que aporten a la seguridad y al derecho de la población a desplazarse dentro de la ciudad.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Observatorio de la Movilidad Metropolitana - Centro de Investigación del Transporte TRANSyT la beca otorgada para la ejecución del doctorado a partir del 01/06/2021. A las instituciones gubernamentales: Municipio del DMQ, INEC y al

Ministerio de Educación del Ecuador, por facilitar la información que se encuentra bajo su custodia. A D. Ricardo Puente por el apoyo recibido en la construcción del algoritmo en Python. Al Doctorando Francisco Cabrera por las aportaciones y comentarios realizadas al texto.

## References

- ALCÁNTARA, E., 2010. Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad. Bogotá-Colombia: Corporación Andina de Fomento (CAF).
- DEMORAES, F., 2015. Movilidad, elementos esenciales y riesgos en el distrito metropolitano de Quito. Quito-Ecuador: Institut français d'études andines.
- DURIEZ, T., 2019. Intra-urban forced displacement: A residential form of mobility induced by controversial constraints. *Territorios*, **40**, pp.245-72.
- FERNÁNDEZ, M., 2017. Ground public transport and accessibility, instruments for the functional analysis of the settlements system: the case of Ecuador. *Estoa.*, **6**(11), pp. 83-97.
- HENRY, E. and HUBERT, J., 2000. Contrastes de la motorización y de la movilidad en las megápolis. *CODATU IX (Coopération pour le Développement et l'Amélioration des Transports Urbains et périurbains)*, México, DF, abril 2000.
- INEC. 2010. Instituto Nacional De Estadística y Censos. Datos Censales del Distrito Metropolitano de Quito.
- JARDON, C.M. and GIERHAKE, K., 2020. Social innovation and territory in municipalities: The Distrito Metropolitano de Quito case. *Perfiles Latinoamericanos*, **28**(55), pp. 301-324.
- LIZARRAGA, C., 2012. Metropolitan expansion and mobility: The case of Caracas. *Eure*, **38**(113), pp. 99-125.
- MDMQ, 2009. Plan Maestro de Movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito 2009-2025. Quito-Ecuador.
- PINTO, P., 2013. Las parroquias rurales de Quito y sus interrelaciones con el espacio urbano (Estudios sobre el Distrito Metropolitano de Quito). *Revista del Instituto de la Ciudad*, **2**(2), pp. 71-119.
- RUIZ, E., 2013. *Metodología para la determinación de la movilidad en ciudades de tamaño medio: El caso de Mérida*, Universidad de Extremadura - España.
- VALLEJO, P., 2017. *La Movilidad Urbana en Ciudades Intermedias del Ecuador. Alternativas Viables hacia la Sostenibilidad. El caso de Pujilí*. Universidad de Extremadura - España.
- WINCKELL, A., ZEBROWSKI, C. and SOURDAT, M., 1997. *Los Paisajes Naturales del Ecuador*. Quito-Ecuador.



## MODELO DE PLANEACIÓN DE RUTAS PARA LOS USUARIOS DE BOGOTÁ

### ROUTE PLANNING MODEL FOR USERS IN BOGOTA

Wilson Vargas<sup>a,b,c,\*</sup>, Carmen Femenia<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Distrito Capital, Colombia. [wvargas@udistrital.edu.co](mailto:wvargas@udistrital.edu.co)

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [wevarvar@upv.edu.es](mailto:wevarvar@upv.edu.es); [cfemenia@cgf.upv.es](mailto:cfemenia@cgf.upv.es)

<sup>c</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Distrito Capital, Colombia. [wevargas@unal.edu.co](mailto:wevargas@unal.edu.co)

#### Abstract:

Bogotá, the capital of Colombia, is the first most congested city in the world after Bucharest and New York. In Bogotá there are several applications (Apps) that allow the user to plan their trip in each of the different existing modes of transport, which are based on maps and georeferenced data of the cartographic part as well as traffic variables such as congestion, walking times and mode to use for the trip. In recent years for users the variable that determines their planning is not travel time, but additional factors that applications do not take into account such as: occupation of means of transport, stops and portals, infrastructure operation, environmental conditions, citizen security among others. The objective of the research work is to establish a model that allows the different road actors to plan the routes according to their needs and based on the real travel time. The needs of the users will be determined by means of field surveys to obtain the additional travel times of each of the variables found. The project intends to improve travel planning for each of the road users (drivers, passengers, pedestrians and bi-users) that allow for more real travel times, that allow improving the mobility of a city as congested as Bogotá.

**Key words:** mobility, route planning, app, cartography

#### Resumen:

Bogotá, la capital de Colombia, es la primera ciudad más congestionada del mundo después de Bucarest y Nueva York. En Bogotá existen varias aplicaciones (Apps) que le permiten al usuario planear su viaje en cada uno de los diferentes modos de transporte existentes, las cuales se basan en mapas y datos georreferenciados de la parte cartográfica como de variables de tránsito como congestión, tiempos de caminata y modo a utilizar para el viaje. En los últimos años para los usuarios la variable que determina su planeación no es el tiempo de viaje, sino factores adicionales que las aplicaciones no tienen en cuenta como: ocupación de los medios de transporte, paraderos y portales, operación de la infraestructura, condiciones ambientales, seguridad ciudadana entre otros. El objetivo del trabajo de investigación es establecer un modelo que permita a los diferentes actores viales realizar la planeación de las rutas de acuerdo a sus necesidades y en función del tiempo real de viaje. Las necesidades de los usuarios se determinarán por medio de encuestas en campo para obtener los tiempos adicionales de viaje de cada una de las variables encontradas. Con el proyecto se pretende mejorar la planeación de los viajes de cada uno de los usuarios viales (conductores, pasajeros, peatones y bicisuarios) que permita tener tiempos de viaje más reales, que permita mejorar la movilidad de una ciudad tan congestionada como es Bogotá.

**Palabras clave:** movilidad, planeación rutas, app, cartografía

### 1. Antecedentes

Bogotá, la capital colombiana, no es ajena al problema de movilidad, ya que según la consultora Inrix (2020) en un estudio realizado en más de 200 ciudades en 38 países, es la primera ciudad más congestionada del mundo después de Bucarest y Nueva York. Según Carlos César Parrado, en la Columna del Tiempo, plantea que existen seis claves fundamentales para mejorar la movilidad en Bogotá: Mejorar el uso del suelo reduciendo la necesidad de desplazamiento de las personas, Mejorar la coordinación e infraestructura del transporte público y los diferentes estamentos encargados del tema, Continuar la

mejora de la infraestructura actual que se dispone para los peatones y los usuarios de la bicicleta, prioridad para el transporte público y el desarrollo de la intermodalidad, continuación del mejoramiento técnico de los vehículos y sus combustibles y Uso racional del carro privado (Parrado 2001).

Un estudio realizado por INRIX Global Traffic Scorecard de 2020 indicó que los bogotanos pierden 133 horas al año, más de 11 días en congestiones (atascos) y embotellamientos. Este factor afecta directamente la salud mental de los ciudadanos y su principal riesgo es el estrés, que según el Observatorio Europeo de Riesgos

\* Corresponding Author: Wilson Vargas , [wvargas@udistrital.edu.co](mailto:wvargas@udistrital.edu.co)

equivale a entre el 50% y 60% de los días de trabajo perdidos por una persona. (Quessep-Alcové 2019).

Por lo anterior el futuro de la planeación según el parlamento europeo (ISER 2010) es lograr que los sistemas de transporte tengan un enfoque específico a la hora de abordar la movilidad social que les permita adaptarse a circunstancias y estilos de vida, así como introducir las opciones de transporte adecuadas para el consumidor.

La movilidad durante y después del confinamiento generado en el mundo por el COVID-19, ha cambiado, ya que los objetivos y necesidad de movilidad de los actores viales cambiaron, según el documento movilidad y bienestar durante el confinamiento por covid-19 en la comunitat valenciana (Ruiz-Sánchez *et al.* 2020), los encuestados que declaran desplazarse durante el confinamiento lo hacen mayoritariamente a pie (59.8%). En segundo lugar, en orden de importancia se sitúa el uso del coche (33,8%). El resto de modos de transporte son utilizados en mucha menor medida: transporte público colectivo (2,7%), bicicleta (1,5%), Moto (1,0%) y otros (1,1%).

De igual manera en Colombia, la Universidad Nacional realizó el Primer Encuentro Virtual de Secretarios y Autoridades de Territorio y Movilidad, en el cual una de las primeras conclusiones fue que las necesidades y hábitos de viaje de las personas antes y después de la cuarentena han hecho que la movilidad se perciba desde otro punto de vista, la reinención y la implementación de nuevas alternativas de transporte sostenible, al igual se planteó que dentro de los cambios a los que van a apostar la mayoría de ciudades, está la implementación de la movilidad sostenible, que se refiere a desplazamiento tanto en bicicletas, patinetas eléctricas y caminatas.

Como un apoyo para mejorar esta movilidad, se ha planteado la utilización de la tecnología y el avance de la misma, en el desarrollo de aplicaciones para teléfonos inteligentes (Apps), con las cuales ayudan a conductores, pasajeros, bici usuarios y peatones a poder planear sus viajes en los diferentes sistemas de transporte colectivo e individual que tiene cada una de las ciudades del mundo, muchos autores como (Sabino *et al.* 2020) presentan en sus artículos destacar el potencial de aplicación de estos datos para la gestión y la planeación de la movilidad urbana y para las políticas públicas.

Para cada uno de los usuarios, se disponen de varias opciones para planear su ruta, la pregunta, es si este tiempo estimado es parecido al tiempo real.

Todo esto está estructurado con base en cartografía y datos georreferenciados que se extraen de Información de datos abiertos y de geo información que los mismos usuarios ingresan a las plataformas, pero no se consideran algunas variables que afectan la movilidad y que los demás usuarios podrían necesitar para tomar la mejor decisión para planear su viaje.

En las aplicaciones (Apps) hay que revisar cuales variables son consideradas para ajustar estos tiempos como congestión, tiempos de caminata y modo a utilizar para el viaje, entre otros. En los últimos años para los usuarios la variable que determina su planeación no es el tiempo de viaje, si no hay factores adicionales que las aplicaciones no tienen en cuenta como ocupación de los

medios de transporte, paraderos y portales, operación de la infraestructura, condiciones ambientales, seguridad ciudadana entre otros.

## 2. Sinestralidad vial de Bogotá

Bogotá cuenta con un repositorio de datos de siniestralidad vial robusto que permanentemente es actualizado, a través del convenio con la Policía de Tránsito. Esta entidad registra la información de los siniestros viales a través del Informe Policial de Accidentes de Tránsito (IPAT), la cual es codificada en el Sistema de Información Geográfico de Accidentes de Tránsito (SIGAT). El proceso de registro de la información de siniestralidad vial ha tenido importantes mejoras en los últimos años, generando información sistemática y cada vez más confiable, que es analizada por la Secretaría Distrital de Movilidad realizando un reporte de manera anual.

La Secretaría Distrital de Movilidad, presenta el Anuario de datos en siniestralidad vial (SIMUR 2021). Publicación seriada que presenta un análisis comprensivo de los principales indicadores de seguridad vial, los cuales son utilizados por la entidad como herramienta de toma de decisión en política pública. Desde la Administración Distrital se entiende que la siniestralidad vial es una problemática de salud pública, que supera en número otras enfermedades como el EPOC, el cáncer de cuello uterino, la diabetes y el cáncer de mama. Así mismo, supera el número de muertes por conflicto armado, suicidio y muertes accidentales en Bogotá.

Esta Información está disponible en el sistema de Información sobre la movilidad Urbana y Regional, en el Anuario de Sinestralidad en en la cual se presentan los anuarios y las bases de datos para los años 2017-2018 y 2019.

Según la base de datos para el 2019 se presentaron 34990 siniestros reportados, en la Tabla 1 se presenta la distribución por mes y por la gravedad de siniestro.

**Tabla 1:** Siniestros por mes y tipo de gravedad. Fuente: Secretaría de Movilidad (2019).

Mes	Con Heridos	Con Muertos	Solo Daños	Total
Enero	926	25	1540	2491
Febrero	999	38	1688	2725
Marzo	1199	44	1883	3126
Abril	1000	39	1785	2824
Mayo	1168	46	1993	3207
Junio	1062	40	1681	2783
Julio	1093	52	1826	2971
Agosto	1074	37	1971	3082
Septiembre	1048	42	1940	3030
Octubre	995	57	1911	2963
Noviembre	874	31	1860	2765
Diciembre	933	41	2049	3023
Total	12371	492	22127	34990

Se observa que los meses de mayo y diciembre son los meses con más accidentes con daños, meses que corresponden a meses de festivos y más viajes recreativos.

En la Tabla 2, se presenta el tipo de gravedad y el tipo de accidente, encontrando que el mayor tipo es el de choque simple, en menor medida incendio y volcamiento.

**Tabla 2:** Siniestros por Tipo de Choque y Tipo de Gravedad. Fuente: Secretaría de Movilidad (2019).

Tipo de Choque	Con Heridos	Con Muertos	Solo Daños	Total
Atropello	3325	237	8	3570
Caida de ocupante	852	7		859
Choque	7557	194	21976	29727
Incendio			10	10
Otro	163	2	23	188
Volcamiento	474	52	110	636
Total	12371	492	22127	34990

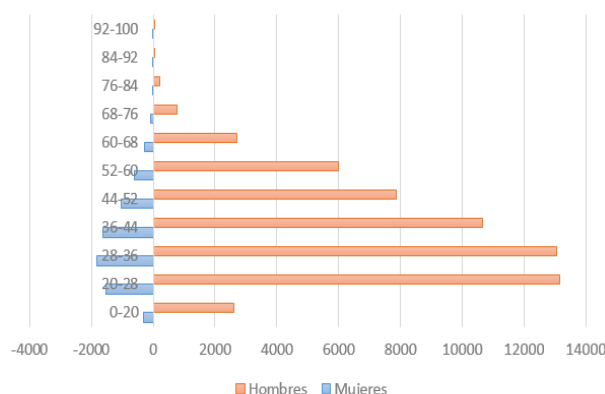
De los 34990 siniestros, el mayor tipo es del de choque con 29727, y el segundo es atropello. De los 492 siniestros reportados con muertos, el mayor tipo corresponde a Atropello con 237 siniestros, seguido por 194 por choque y 52 por volcamiento, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Siniestros por Localidad y Tipo de Gravedad. Fuente: Secretaría de Movilidad (2019).

Localidad	Con Heridos	Con Muertos	Solo Daños	Total
Antonio Nariño	287	5	322	614
Barrios Unidos	505	11	1253	1769
Bosa	865	37	939	1841
Candelaria	72	4	111	187
Chapinero	516	13	1573	2102
Ciudad Bolívar	708	32	718	1458
Engativa	1092	45	2229	3366
Fontibon	762	38	2198	2998
Kennedy	1687	53	2195	3935
Los Martires	429	12	702	1143
Puente Aranda	911	41	1633	2585
Rafael Uribe Uribe	475	27	433	935
San Cristobal	596	24	515	1135
Santa Fe	421	20	638	1079
Suba	940	41	1893	2874
Sumapaz		2		2
Teusaquillo	508	18	1284	1810
Tunjuelito	497	20	517	1034
Usaquen	771	26	2653	3450
Usme	329	23	321	673
Total	12371	492	22127	34990

Analizando los accidentes por localización la localidad con mayor cantidad de siniestros son la localidad de Kennedy y la de Usaquen, corresponde a localidades con varios generadores de tráfico, y que en este momento tienen los corredores más congestionados de Bogotá.

Para el año 2019, según la base de datos en los 34990 siniestros están involucrados 66179 conductores, de los cuales 7401 son mujeres 57801 son hombres y según la base 1697 no registran información, aplicando un análisis de histograma clasificándolos en 10 clases. Datos que se pueden observar en la Figura 1 por rango de edades.



**Figura 1:** Clasificación de Conductores por Sexo. Fuente: Secretaría de Movilidad (2019).

### 3. Metodología propuesta

La hipótesis de partida es que las aplicaciones utilizadas, en este momento no consideran los gustos o necesidades de los usuarios o actores viales, de igual manera no consideran todas las variables para determinar el tiempo real de viaje, como son las demoras por semaforización, por espera de rutas, tiempo de espera de los buses que alimentan el sistema, congestión y demás variables.

Los objetivos de la investigación son:

- Caracterizar cada una de las aplicaciones que son utilizadas por los usuarios de transporte en la ciudad de Bogotá, para conductores, pasajeros y bici usuarios.
- Realizar encuestas a cada uno de los usuarios, que permita caracterizar las necesidades de cada uno de ellos, ya que por causas de la pandemia cambiaron los objetivos que cada usuario busca.
- Realizar comparaciones entre la planeación del tiempo de viaje con las aplicaciones y con los tiempos de viaje real con toma de datos en campo con vehículo de prueba, que permita establecer las demoras relacionadas para cada uno de los usuarios.
- Plantear un modelo que permita a los actores viales, establecer la mejor planeación de ruta de acuerdo a sus necesidades.

Para lograr estos objetivos se plantea las siguientes actividades principales:

- En primer lugar, se validarán los tiempos de recorrido planeados con las aplicaciones (Apps) vs los tiempos reales tomados en campo para cada uno de los

usuarios, en el cual se puedan determinar las demoras y tiempos adicionales. Se contarán con apoyo de tesis de maestría, que permita realizar estudios para cada uno de los usuarios viales.

- En segundo lugar, se realizarán encuestas a cada uno de los usuarios para conocer las prioridades o necesidades que tienen cada uno de ellos para planear sus viajes, que permita conocer estas características antes y después de la pandemia. Para conductores y pasajeros se utilizarán los medios de distribución masivo de las Universidades Distrital y la Universidad Nacional de Colombia.
- En tercer lugar, establecer un modelo para que cada uno de los actores viales pueda planear sus viajes de acuerdo a sus necesidades y que pueda contar con información para estimar el tiempo real de viaje.

#### 4. Aplicaciones (Apps) utilizadas

En Colombia las principales aplicaciones (Apps) utilizadas para la planeación de rutas y navegación por los conductores son Google Maps y Waze, Google Maps es un servicio desarrollado por Google con el cual se puede encontrar la ubicación de ciudades, negocios, hoteles o atracciones en Internet o a través de aplicaciones en tu smartphone. Puedes considerar Google Maps como una búsqueda vertical de ubicaciones. Para la visualización se utilizan tanto datos de satélite como imágenes aéreas. Con Street View, que está integrado en Google Maps, también puedes ver carreteras y casas en determinadas regiones. La navegación y la planificación de rutas también son posibles con Google Maps (RYTE 2020)

Waze es una aplicación social de tránsito automotor en tiempo real y navegación asistida por GPS desarrollada por Waze Mobile. El 11 de junio de 2013, Google completó la adquisición de Waze. Esta aplicación proporciona direcciones en tiempo real que se ajustan sobre la marcha para tener en cuenta varios tipos de obstáculos potenciales con los aportes e informaciones dada por conductores que usan la aplicación llamados Wazers, como obras, actividades de la policía, accidentes en incluso también reporta estado de la superficie de pavimento como baches.

Según la encuesta de movilidad (Secretaría de Movilidad, 2019), la principal aplicación utilizada en Bogotá es Waze, la cual tiene una utilización por estratos socioeconómicos está entre el 32% y el 58.6%, según la Figura 2, esta aplicación permite compartir rutas de tránsito, dar a conocer eventualidades, como trancones o reducciones de velocidad y con esto hacer saber a otros conductores qué les puede ocurrir en la carretera que van a tomar.

Para otros conductores, principalmente en los estratos bajos utilizan Google Maps, es un servidor de aplicaciones de mapas en la web que pertenece a Alphabet Inc. Para los pasajeros de Servicio Público Individual existe una aplicación denominada Easy Taxi, ahora bajo el paraguas de Cabify. Con este tipo de aplicaciones se recibe la información de tu chófer y el número de placa. El conductor a su vez confirmará la identidad del pasajero para una mayor seguridad. De igual manera existen aplicaciones como Uber y beat que

son para prestar el servicio con vehículos particulares, el cual es este momento es ilegal.

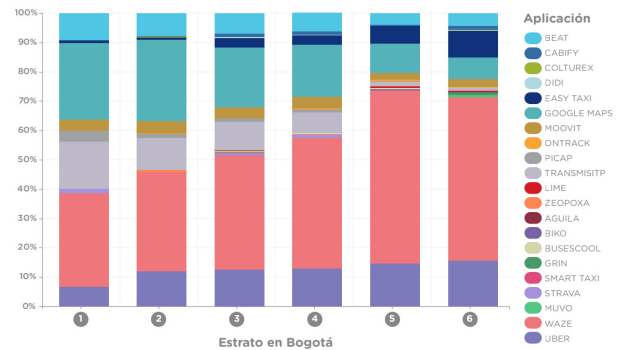


Figura 2: Distribución porcentual de viajes en los que se utilizó una aplicación móvil durante el viaje para planear o realizar el viaje. Fuente: Secretaría de Movilidad (2019).

Para los Bici usuarios, según la página de Bogotá, (<https://bogota.gov.co/>), se creó una nueva aplicación denominada Mapas de Bogotá Bici con la cual los usuarios pueden calcular la mejor ruta, estimar el tiempo, el trayecto a recorrer, la hora de llegada, información de interés sobre dónde parquear su bici, conocer las zonas seguras, compartir el recorrido por medio de otras aplicaciones y visualizar el estado del clima durante todo el trayecto.

Para los usuarios del transporte público está la aplicación Moovit, la cual es una app que tiene una alianza con el sistema de transporte de tipo BRT (Transmilenio) y permite elegir entre todos los servicios ofrecidos (Troncal, Alimentador, Urbano, Complementario, Especial), teniendo en cuenta las condiciones del tráfico en tiempo real generadas por informes de toda la comunidad. Y la aplicación TransmiSitp la cual busca la ruta con menos paradas para moverte entre dos estaciones del sistema, además accede a la información de cada una de las rutas, incluyendo estaciones, buses, horarios, alimentadores y mapas. De igual manera presenta las rutas del sistema integrado de transporte público bogotano (sitp), urbano, complementario y especial), visualiza mapas y tablas de rutas.

#### 5. Comparación de aplicaciones

Para cada uno de los usuarios, se disponen de varias opciones para planear su ruta, la pregunta, es si este tiempo estimado es parecido al tiempo real. A Grabowski (2018), se le ocurrió preguntarse cuál lo hacía mejor: Google Maps, Apple Maps o Waze (que también es de Google). Así que comparó 120 viajes hechos en San Francisco, California, donde le pidió a los tres sistemas que le calcularan una ruta y le estimaran una duración de las mismas (en promedio, de 26 minutos).

Después, comparó el tiempo estimado por cada servicio con el que finalmente le tomó recorrer esa distancia, en su estudio encontró con que Waze es el más entusiasta (el servicio que promete llegar a destino más rápido), pero también el más impreciso. Apple Maps, por el contrario, es el más precavido (calcula que llevará más tiempo el recorrido) y tiene una tasa de error relativamente alta. El que logró una mayor tasa de aciertos a la hora de calcular la duración de un trayecto



pedido por Grabowski es Google Maps. (Grabowski 2018).

Esta misma metodología se ha planteado para Bogotá – Colombia que seguirá de forma general la misma metodología, se realizará la planeación de la ruta en las dos aplicaciones más utilizadas, Waze y Google Maps, en la Figura 3 se muestra el ejemplo de planeación de la zona 113 Bavaria (Localidad de Kennedy) a la zona 108 Zona Industrial (Localidad de Punte Aranda).

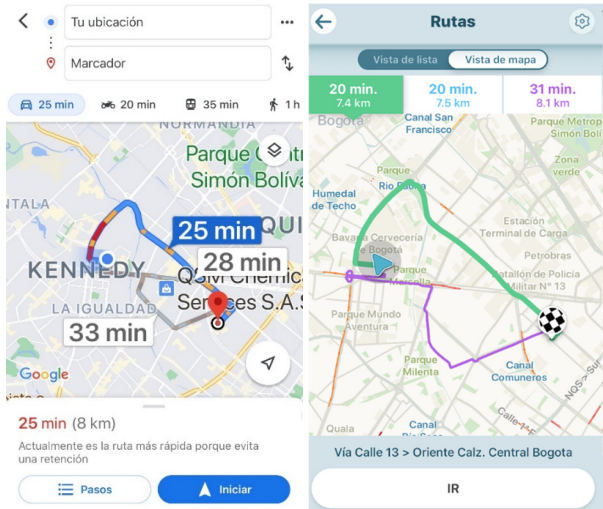


Figura 3: Planeación de Viaje en aplicaciones

Con vehículos de prueba se realizarán los recorridos para determinar el verdadero tiempo de viaje y con equipos audiovisuales adaptados al vehículo (Vargas *et al.* 2012), como se muestra en la Figura 4, se podrá analizar las demoras adicionales que tiene el recorrido siguiendo la metodología del vehículo en movimiento del Manual para la planeación del Tránsito de Santafé de Bogotá de la Secretaría de Movilidad de Bogotá. (Secretaría de Tránsito y Transporte 2015).



Figura 4: Vehículo de Prueba.

Con esta información se tendrá el tiempo de viaje real de viaje, y poder analizar las variaciones con el tiempo de planeación, poder establecer el tiempo de marcha, y los tiempos de demora en cada recorrido para determinar cuáles son los principales elementos que están afectando la movilidad de la ciudad, con base en los videos de las rutas (ver Figura 5).

## 6. Resultados

Debido a la pandemia el comportamiento de la movilidad es diferente, ya que, aunque en este momento en Bogotá se está activando la economía (Ramírez 2020), no se están presentando todos los viajes ya que todavía los estudiantes de Colegio y Universitarios siguen en clases virtuales, de igual manera la administración ha solicitado a los empresarios que las actividades que se puedan realizar de manera no presencial se sigan realizando apoyados con las TIC, por tal razón se han realizado algunas pruebas pero se espera tener información consolidada cuando ya se tenga la economía completamente activa y la movilidad de manera normal.



Figura 5: Vídeos de Recorrido.

De los primeros resultados obtenidos, realizados para validar la metodología, las aplicaciones presentan más o menos el mismo tiempo de viaje, presentan variaciones en la propuesta de rutas, pero la ruta principal es la misma. En la Tabla 4 se muestran los datos de recorridos.

Los tiempos de viaje reales vs los mismos tiempos de viaje planeados, tienen una variación de más o menos el 10%, dependen de la distancia del viaje y de las zonas de destino, ya que los centros históricos de la ciudad presentan más demoras.

Si se relacionan los tiempos de viaje planeados frente a los tiempos reales se tiene la siguiente correlación, ver Figuras 6 y 7.

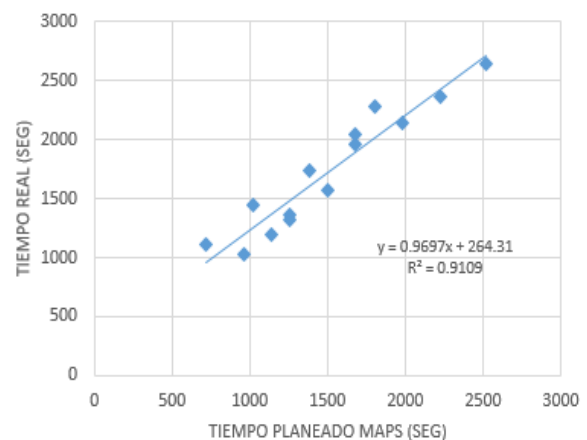
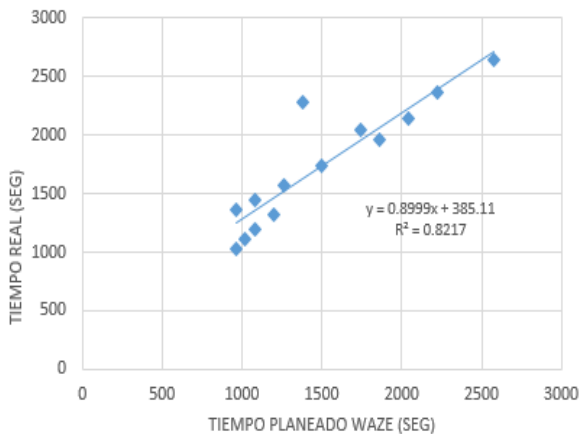


Figura 6: Comparación de tiempo real vs tiempo planeado con Waze.

**Tabla 4:** Datos de Recorridos.

Número	Planeación					Diferencia (min)	
	maps	waze	Inicio	Final	Real	maps	waze
1	0:33:00	0:34:00	11:35:16	12:10:53	0:35:37	2.6	1.6
2	0:37:00	0:37:00	11:02:27	11:41:48	0:39:21	2.3	2.3
3	0:23:00	0:25:00	16:07:32	16:36:29	0:28:57	6.0	4.0
4	0:21:00	0:16:00	10:20:29	10:43:16	0:22:47	1.8	6.8
5	0:42:00	0:43:00	10:00:12	10:44:19	0:44:07	2.1	1.1
6	0:25:00	0:21:00	10:40:58	11:07:09	0:26:11	1.2	5.2
7	0:30:00	0:23:00	17:37:39	18:15:36	0:37:57	8.0	15.0
8	0:21:00	0:20:00	11:04:53	11:26:54	0:22:01	1.0	2.0
9	0:28:00	0:31:00	10:47:34	11:20:13	0:32:39	4.7	1.7
10	0:28:00	0:29:00	14:38:14	15:12:16	0:34:02	6.0	5.0
11	0:16:00	0:16:00	9:50:19	10:07:20	0:17:01	1.0	1.0
12	0:12:00	0:17:00	11:56:36	12:15:04	0:18:28	6.5	1.5
13	0:17:00	0:18:00	11:46:04	12:10:05	0:24:01	7.0	6.0
14	0:19:00	0:18:00	12:11:05	12:30:57	0:19:52	0.9	1.9



**Figura 7:** Comparación de tiempo real vs tiempo planeado con Waze.

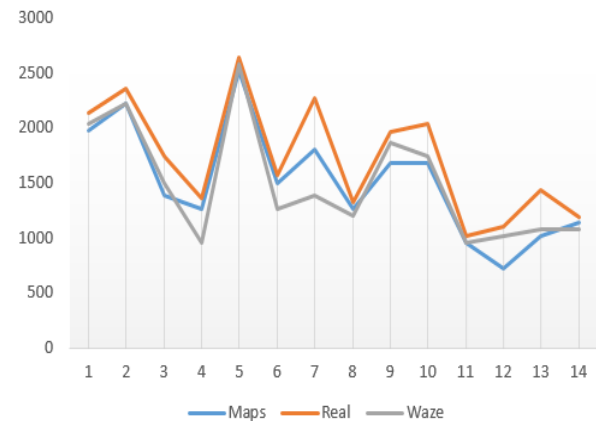
Las demoras principalmente encontradas que aumentan el tiempo de viaje son: Semáforos: ya que en algunas zonas no están programados, Congestión: por diferentes causas como semáforos, accidentes viales, y vehículos estacionados, Transporte Público: ya que no se utilizan de la mejor manera los paraderos establecidos.

Si se comparan los tiempos reales y los tiempos planeados por Maps y Waze, los tiempos reales son mayores, aunque tienen en mismo comportamiento, en la Figura 8 se presentan gráficamente estos 14 recorridos de prueba.

Los tiempos planeados, mantienen el mismo comportamiento, siempre por debajo del tiempo real, para algunos recorridos la diferencia es muy pequeña 1 a 2 minutos, y unos llegan hasta 15 minutos.

Se espera que al resetablecer las condiciones de movilidad después de la denominada nueva normalidad en Colombia, se tome la información con apoyo de los

usuarios viales, como taxis, estudiantes de la universidad que utilizan el transporte público y utilizan modos alternos como bicicletas.



**Figura 8:** Comparación de tiempo real vs tiempo planeado con Waze y Maps.

## 7. Conclusiones

La utilidad de la investigación es, caracterizar las aplicaciones que son utilizadas por cada uno de los actores viales que se mueven en la ciudad de Bogotá, y determinar las demoras asociadas al tiempo de viaje, que permitirá que estos actores puedan planear de mejor manera sus viajes y desplazamientos en la ciudad.

De igual manera conocer cuáles son las necesidades que tienen cada uno de estos actores, ya que el tiempo de viaje con las condiciones actuales de la pandemia en el mundo, pueden haber cambiado y se tienen otras prioridades.

Con el modelo planteado, los usuarios viales, podrán planear mejor sus viajes de acuerdo a sus necesidades y a las condiciones reales de operación de cada medio de

transporte, con lo que se podrá mejorar la movilidad de la ciudad, ya que los usuarios tendrán información más acertada de los tiempos de viaje a utilizar en sus viajes.

En los últimos años para los usuarios la variable que determina su planeación no es el tiempo de viaje, si no hay factores adicionales que las aplicaciones no tienen en cuenta como ocupación de los medios de transporte, paraderos y portales, operación de la infraestructura, condiciones ambientales, seguridad ciudadana entre otros.

Otro objetivo para trabajos futuros será establecer un modelo que le permita a los diferentes actores viales realizar la planeación de las rutas de acuerdo a sus necesidades y en función del tiempo real de viaje. De igual manera caracterizar las necesidades de los usuarios se determinarán por medio de encuestas en campo (Mora-Navarro *et al.* 2018), y por medio de mediciones de campo obtener los tiempos adicionales de viaje de cada una de las variables encontradas.

## References

- GRABOWSKI, A., 2018. Waze, Google Maps o Apple Maps, ¿cuál es mejor? - La Opinión (laopinion.com). Available: <https://laopinion.com/2018/02/21/waze-google-maps-o-apple-maps-cual-es-mejor/> [7/24, 2021].
- INRIX. 2020. Global Traffic Scorecard. INRIX Research. Available: <https://inrix.com/scorecard/> [7/24, 2021].
- ISER. 2010. Institute for Social-Ecological Research, Frankfurt am Main, Germany. El futuro de la movilidad en la UE - Think Tank (europa.eu), Bruselas, © Parlamento Europeo. Available: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document.html?reference=IPOL-TRAN\\_NT\(2010\)431581](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document.html?reference=IPOL-TRAN_NT(2010)431581) [7/24, 2021].
- MORA-NAVARRO, G., FEMENIA-RIBERA, C., MARTINEZ-LLARIO, J., and ANTEQUERA-TERROSO, E., 2018. Optimising urban routes as a factor to favour sustainable school transport. *Journal of Transport Geography*, **72**.
- PARRADO, C.C., 2001. Como mejorar la Movilidad de la Ciudad. Redacción El Tiempo. Available: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-523761> [7/24, 2021].
- QUESSEP-ALCOVÉ, A. K., 2019. Problemas en movilidad, un freno para el desarrollo - De la idea a la acción | Blogs Portafolio. Available: <https://blogs.portafolio.co/de-la-idea-a-la-accion/2019/07/23/problemas-movilidad-freno-desarrollo/> [7/24, 2021].
- RAMÍREZ, J. M., 2020. Bogotá presentó medidas económicas para empresas después de covid-19. Revista Dinero.
- RUIZ-SÁNCHEZ, T., MARS-AICART, L., and ARROYO-LÓPEZ, R., 2020. Movilidad Y Bienestar Durante El Confinamiento Por Covid-19 En La Comunitat Valenciana. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- RYTE. 2020. ¿Qué es Google Maps? - Ryte Digital Marketing Wiki. Available: [https://es.ryte.com/wiki/Google\\_Maps](https://es.ryte.com/wiki/Google_Maps) [7/24, 2021].
- SABINO, A. B., REIS-MARTINS, P., and CARRANZA-INFANTE, M. (2020). Experiencias y retos del uso de datos de aplicaciones móviles para la movilidad urbana. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, **22**(1), pp. 82-93.
- SECRETARÍA DE MOVILIDAD. 2019. Secretaría Distrital de Movilidad. Caracterización de la movilidad –Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019. 1-23.
- SECRETARÍA DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE, 2015. Primer Encuentro Virtual de Secretarios y Autoridades de Territorio y Movilidad. Available: (<https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/noticias/item/427-i-encuentro-virtual-de-secretarios-y-autoridades-de-territorio-y-movilidad.html>) [7/24, 2021].
- SIMUR. 2021. Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana regional. Anuario de Sinestralidad. Available: <https://www.simur.gov.co/portal-simur/datos-del-sector/documentos/anuario-de-siniestralidad/> [7/24, 2021].
- VARGAS, W., RINCÓN, M. A., and GONZÁLEZ, C. J., 2012. *Ingeniería de tránsito Conceptos Básicos*. Colombia.

## APLICACIÓN DE LA GEOMÁTICA AL ANÁLISIS DE RECURSOS MARINOS PESQUEROS EN LA COSTA DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

### APPLICATION OF GEOMATICS TO THE ANALYSIS OF MARINE FISHERIES RESOURCES ON THE COAST OF THE VALENCIAN COMMUNITY

Pablo Pascual-Yarritu\*, Gaspar Mora-Navarro, Carmen Femenia-Ribera

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [jospasya@alumni.upv.es](mailto:jospasya@alumni.upv.es); [joamona@cgf.upv.es](mailto:joamona@cgf.upv.es); [cfemenia@cgf.upv.es](mailto:cfemenia@cgf.upv.es)

#### Abstract:

Fishing production is one of the most important economic activities in the world. It is also important at the national level as Spain ranks as one of the 25 main producing countries of marine capture fisheries (FAO 2020). Due to its importance, its impact on the volume of resources and the performance offered by current technological development, it has extended a generalized concern about the implications that overexploitation of fishery resources could have on the marine environment and on the sustainable development of species. This concern highlights the need to know the situation of marine resources, the issue that has led to the development of this research. This study seeks to understand the life cycle of a specific species, the *Octopus vulgaris* (octopus), by locating the areas and times of greatest and least production. For this, the data recorded about the catches of this species in the Marina Alta region, located in the north of the province of Alicante (Spain), are analyzed. On the other hand, discovering suitable areas for octopus breeding is also desired. There are already some areas dedicated to it located by the Institut de Recerca Oceanogràfica de Xàbia (IROX) and what is intended is, based on them, to analyze their marine context to find others with similar characteristics and that, therefore, could potentially be suitable for the reproduction of the species. Its finding would be a great advance in anticipating situations that compromise the sustainable development of the species. The results of the study are transferred to a geoportal where the examined variables are graphically represented. Its function is to facilitate the interpretation of the collected data and to constitute in itself a tool that allows the visualization of the movements of octopus populations over time.

**Key words:** geomatics, geoportal, sustainable development, fishing, Octopus, marine cadastre

#### Resumen:

La producción pesquera es una de las actividades económicas con más trascendencia a nivel mundial. También lo es en el ámbito nacional y es que España se sitúa como uno de los 25 principales países productores de pesca de captura marina (FAO 2020). Debido a su importancia, a su impacto sobre el volumen de los recursos y al rendimiento que ofrece el desarrollo tecnológico actual, se ha extendido una preocupación generalizada sobre las implicaciones que podría tener una sobreexplotación de los recursos pesqueros en el medio marino y en el desarrollo sostenible de las especies. Esta inquietud pone de manifiesto la necesidad de conocer la situación en la que se encuentran los recursos marinos, cuestión que ha propiciado el desarrollo de esta investigación. Este estudio busca comprender el ciclo vital de una especie en concreto, el *Octopus vulgaris* (pulpo), mediante la localización de las zonas y las épocas de mayor y menor producción. Para ello, se analizan los datos registrados sobre las capturas de esta especie en la comarca de la Marina Alta, situada en el norte de la provincia de Alicante (España). Por otro lado, también se quiere descubrir zonas aptas para la puesta/cría del pulpo. Ya existen unas zonas dedicadas a ello localizadas por el Institut de Recerca Oceanogràfica de Xàbia (IROX) y lo que se pretende es, a partir de ellas, analizar su contexto marino para hallar otras con características similares y que, por tanto, puedan ser potencialmente adecuadas para la reproducción de la especie. Su hallazgo supondría un gran avance para prever situaciones que comprometan el desarrollo sostenible de la especie. Los resultados del estudio se vuelcan en un geoportal donde se representan gráficamente las variables examinadas. Su función es facilitar la interpretación de los datos recopilados y constituir en sí mismo una herramienta que permita visualizar los movimientos de las poblaciones de pulpo a lo largo del tiempo.

**Palabras clave:** geomática, geoportal, desarrollo sostenible, pesca, Octopus, catastro marino

### 1. Introducción

El origen de este estudio es consecuencia directa de un proyecto iniciado por el Institut de Recerca Oceanogràfica de Xàbia (IROX 2015), una asociación que vive por y para

el estudio científico del mar y del litoral, su protección y la divulgación de su conocimiento. Con el fin de conseguir la preservación, protección y recuperación de la biodiversidad de la Marina Alta, esta asociación ha puesto su atención en una especie con gran relevancia

\* Corresponding Author: [jospasya@alumni.upv.es](mailto:jospasya@alumni.upv.es), [jospasya@alumni.upv.es](mailto:jospasya@alumni.upv.es)



en la Comunidad Valenciana: el pulpo (*Octopus Vulgaris*).

El propósito del IROX es conocer cuál es la situación actual del pulpo en las costas de la Marina Alta. Su intención es tener un control aproximado de la especie para poder adoptar medidas ajustadas a la realidad y que fomenten la sostenibilidad de la especie y ayuden a conseguir una gestión pesquera más eficiente (Arcas-Sen 2019). Para ello, cuenta con la implicación de la flota tradicional del Pòsit de La Marina en la recopilación de datos sobre las capturas.

A partir del conocimiento de la existencia de este proyecto y de esos datos y de visualizar el gran potencial que la Geomática podría aportar a la consecución del objetivo del IROX, se produce el primer contacto y acaba surgiendo esta investigación.

Así pues, el empeño de este estudio pasa por aprovechar los datos que el IROX recopila sobre las capturas de pulpo para tratarlos y representarlos en una herramienta útil que facilite su accesibilidad y visualización: un geoportal.

## 2. Justificación

El proyecto del IROX tiene su base en la recopilación de los datos sobre las capturas de pulpo. Esta recopilación se traduce en un conjunto de datos que aumenta progresivamente. Los datos y su tratamiento son vitales para la consecución de sus objetivos. Los integrantes de la asociación tienen competencias en biología, pesca, buceo y otros ámbitos relacionados con el mundo marino, sin embargo, actualmente no disponen de un miembro con competencias en el tratamiento y la explotación de los datos. Por tanto, este es uno de los temas que se está cubriendo con esta investigación. De esta forma, el proyecto en sí se aborda tanto desde el aspecto técnico como desde el biológico.

Por otra parte, tras una primera revisión de los datos sobre las capturas de pulpo y tras consultar otras fuentes capaces de complementar estos datos con información geográfica, se comprendió que aplicar un enfoque cartográfico al proyecto podía contribuir en gran medida a conseguir un conocimiento más real de la situación de la especie en las costas de la Marina Alta. Saber dónde, cuándo y cuánto se ha pescado supone un gran impulso para lograr una gestión pesquera más eficaz (Calderón-Gil 2018).

Otro aspecto que quiere cubrir este estudio es la accesibilidad a los datos analizados. Se desea que todo usuario al que le atraiga esta materia, sea un miembro del propio IROX o cualquier otra persona con interés en el tema, pueda tener acceso directo a la información desde una herramienta web. Asimismo, los datos son representados mediante gráficas y mapas con el fin de hacer más fácil y rápida su interpretación por parte del usuario.

## 3. Objetivos

El principal objetivo de esta investigación es conseguir proporcionar el mayor valor añadido posible al proyecto del IROX a partir del conjunto de datos que esta asociación provee. Con esto, una vez se han analizado las posibilidades de la información suministrada y de

otras que pueden ser de utilidad, se han definido tres objetivos específicos:

- Disponer de un control de las capturas de pulpo.
- Descubrir zonas aptas para la puesta de pulpo.
- Conocer cuál es la evolución espacio-temporal del pulpo.

Estos tres propósitos se encuadran dentro del marco geográfico que definen los datos de partida, que actualmente comprende la costa de la Marina Alta.

El primero de los puntos que se han señalado como objetivos consiste en tener un control de las capturas a modo de cuadro de mando o *dashboard*. El propósito de esto es tener una herramienta de gestión pesquera que facilite la toma de decisiones y que recoja un conjunto de indicadores que proporcionen a los usuarios una visión comprensible del estado de la pesca del pulpo en la zona analizada (Fernández-González 2009).

El siguiente objetivo en la lista trata de encontrar zonas aptas para la cría del pulpo. Desde el IROX se ha trasladado que, por su parte, se han hallado varias zonas aptas para la puesta del pulpo. La intención aquí es analizar cuáles son las características de esas zonas y, atendiendo a esto, descubrir otras con características similares que puedan ser también potencialmente aptas para la cría de la especie.

Por último, conocer cuál es la evolución espacio-temporal de las capturas del pulpo sería un gran avance para tener una visión más ajustada a la realidad sobre el movimiento de esta especie. El componente temporal está registrado en el histórico de capturas de pulpo que recopila el IROX. Sin embargo, el componente espacial está mucho menos determinado, más allá de saber a qué puerto pertenece cada embarcación pesquera.

Existen fuentes de información que proporcionan datos y servicios de localización de embarcaciones tanto en tiempo real como en series históricas. Algunas gratuitas y otras de pago.

Al enlazar esta información junto con los históricos del IROX, se daría respuesta a dónde, cuándo y cuánto se ha pescado. Esto daría un gran impulso hacia la consecución de una gestión pesquera más eficiente.

## 4. Metodología

### 4.1. Descripción general

El punto de partida de esta investigación tiene lugar a partir del conocimiento del proyecto sobre el estudio del pulpo del IROX y concretamente a partir de la revisión del conjunto de datos sobre capturas que esta organización ha ido recopilando en los últimos años. Tras el primer reconocimiento, se observa que es necesario ordenar el contenido de los datos y parametrizarlos de forma que más adelante puedan ser importados en una base de datos.

Los datos iniciales son una serie de hojas de cálculo con información sobre las capturas de pulpo, tales como la fecha, la embarcación, el puerto de origen, el volumen de pesca o el precio de mercado en ese momento, entre otros. El primer archivo proporcionado por el IROX

contiene datos desde 2013 a 2016, aunque se han ido incorporando progresivamente los datos hasta 2021.

Como uno de los propósitos es proporcionar una herramienta web que dé accesibilidad a la información sobre capturas de pulpo, se hace esencial la creación de una base de datos. Para ello, primero se ha diseñado la estructura de la misma y más tarde se han importado los datos contenidos en las hojas de cálculo. Esto último es un proceso que se repite cada vez que se dispone de más información.

Una vez los datos han sido almacenados y están listos para ser consultados, se ha dado comienzo a la creación de la herramienta web. Esta a su vez se divide en las siguientes partes:

- Web de inicio o presentación de la investigación.
- Geoportal.
- Servicio API REST.

La web de inicio tiene el papel de introducir al usuario en la investigación. La intención es que el usuario, al navegar por ella, tenga claro cuál es el contexto global de este estudio. Para ello se han incluido varias secciones que detallan cuáles son los objetivos, el equipo de trabajo, los colaboradores o el contacto para cualquier consulta.

El geoportal, por su parte, es la parte de la herramienta web que muestra al usuario los datos sobre las capturas de pulpo. Para facilitar su interpretación, la información analizada se muestra mediante representaciones visuales como gráficos, diagramas, series, etc. Asimismo, se está desarrollando un visor cartográfico donde se incorporan diferentes capas de información geográfica con la intención de indicar cuáles son las zonas que se han seleccionado como posibles zonas aptas para la puesta de pulpo. Por último, aunque aún sin comenzar, se pretende incluir un servicio de descarga de datos.

El otro elemento de la herramienta web es el servicio API REST. Es una capa de abstracción entre el portal y la base de datos. Cuenta con varios *endpoints* documentados con los que poder consultar y filtrar la información sobre las capturas de pulpo registradas.

Creada ya la base de datos e implementada toda la herramienta web, queda un paso importante para conseguir que la aplicación sea accesible: su puesta en marcha. Para ello, se ha habilitado un servidor virtual donde se aloja toda la infraestructura necesaria para que la herramienta web funcione correctamente. Por otra parte, se ha elegido un dominio gratuito para evitar que los usuarios tengan que acceder a la web mediante una IP.

Todo el desarrollo web se ha añadido a un repositorio remoto con control de versiones. De esta forma, se mejora el control sobre el trabajo realizado y se minimiza la posibilidad de pérdida de trabajo en el caso de que el servidor se restaurara.

A la vez que se ha ido desarrollando toda la infraestructura digital, se ha realizado una labor constante de búsqueda de información en diferentes fuentes con el afán de complementar los datos de las capturas proporcionados por el IROX.

Una de las fuentes que se han consultado continuamente ha sido el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), desde donde ha sido posible acceder a datos con información geográfica sobre puertos, límites marítimos, línea de costa, etc. Todos ellos producidos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Otra fuente muy consultada ha sido el Instituto Español de Oceanografía (IEO), que proporciona información muy útil del entorno marino, como la batimetría, isóbatas, naturaleza del fondo marino, arrecifes, caladeros y otros límites marítimos que no se han encontrado en otras fuentes, como la zona de Mar Territorial y la Zona Contigua.

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación también cuenta con información geográfica relevante para este estudio, ya que desde su catálogo se puede acceder a las eco-cartografías por provincias. Entre su conjunto de datos destacan los usos del suelo, la morfología del fondo, la calidad de aguas y las comunidades marinas.

En cuanto a las fuentes sobre localización de embarcaciones, se han consultado varios servicios como MarineTraffic o VesselFinder que, aunque sí disponen de la información necesaria, su acceso es de pago. Existen alternativas gratuitas como AISHub, aunque no monitoriza todos los puertos deseados.

## 4.2. Especificaciones técnicas

Los tres elementos de la herramienta web, la página de inicio, el geoportal y el servicio API REST, tienen un elemento en común y es que todos ellos se han desarrollado bajo un mismo framework: Django. No obstante, para implementar el API REST se ha utilizado la librería específica Django REST Framework.

La web de inicio y el geoportal, por su lado, incluyen también implementaciones en JavaScript, aunque mucho más extensas en la parte del portal. En él, se ha empleado la librería ChartJS para la visualización de los datos en forma de gráficos y diagramas, y la librería OpenLayers para la representación de la información geográfica relacionada en forma de, por el momento, un visor cartográfico.

Las capas de información espacial incluidas en el visor se visualizan en forma de vector, a partir de datos en formato GeoJSON; o en forma de teselas o tiles a partir de WMS y WMTS.

Durante el transcurso de esta investigación, algunos servicios de información geoespacial han estado en mantenimiento, provocando un corte temporal en su servicio. Por este motivo, se ha contactado con las instituciones correspondientes para la obtención de información en ficheros SHP, especialmente de aquella que se preve estable, como las isóbatas, límites administrativos marinos, naturaleza del fondo marino, arrecifes, caladeros, etc. Posteriormente, estos archivos se han convertido a GeoJSON y se han representado como capas vectoriales en el visor cartográfico.

Por otro lado, se consumen servicios externos como el servicio de ARCGIS online de ESRI, para obtener, mediante WMTS, el mapa base *World Ocean Base* y sus referencias; el tileado XYZ de Open Street Maps, para

agregar también el mapa base *World OSM* y algunos WMS de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), en cuyo catálogo existen capas con información interesante sobre límites administrativos marinos en el Mediterráneo. Sin embargo, esta última fuente de información también sufre cortes temporales en su servicio y posiblemente se deje de utilizar en el futuro.

También se ha creado información geográfica propia a partir de la obtenida desde los servicios de información geoespacial consultados. Un ejemplo son los puertos de la Comunidad Valenciana, que se encontraban dentro del conjunto de datos sobre redes de transporte del CNIG. Utilizando QGIS, se ha editado la capa y se han mantenido únicamente los puertos pesqueros, dejando fuera todos aquellos dedicados a actividades deportivas.

Otro ejemplo de creación de información geográfica son las zonas de pesca. Ante la problemática de obtener un acceso gratuito a la posición de las embarcaciones pesqueras cuando éstas ejercen su labor, se ha realizado una aproximación sobre dónde pesca cada barco un tanto grosera. Para ello, se han delimitado unas zonas de pesca atendiendo a la ubicación geográfica de los puertos de origen, a los límites de profundidad propios de cada arte de pesca (Gómez 2017) y a la línea administrativa que marca el fin de lo que se denomina Mar territorial. Asimismo se estima que, con la intención de ahorrar combustible, los barcos pescan en frente del puerto de descarga. Suposición que se considera bastante acertada según la Figura 1.

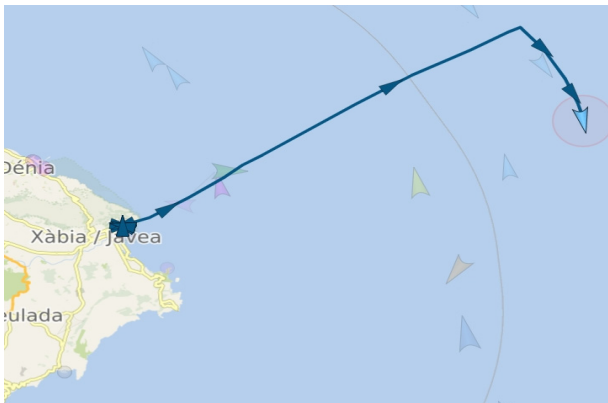


Figura 1: visualización del itinerario recorrido por uno de los barcos pesqueros desde la app VesselFinder.

Con QGIS y utilizando las capas de información geográfica relativa a los puertos, las isóbatas y la línea de Mar territorial, y tras haber corregido los errores propios de topología, se han generado ocho polígonos o zonas de pesca (Fig. 2).

Lo que se busca con estas zonas de pesca es simular, a grandes rasgos, lo que se podría conseguir teniendo la posición exacta de los barcos pesqueros y utilizando mapas de calor. Para identificar visualmente dónde y cuándo se ha pescado más o menos cantidad, se tienen que relacionar estas zonas de pesca con los registros de capturas. El puerto de origen de las embarcaciones y el arte de pesca de las mismas es el punto de unión.

Los datos de las capturas de pulpo están almacenados en una base de datos en PostgreSQL y sobre ella se ha añadido la extensión PostGIS. Para incluir las zonas de pesca dentro del modelo de datos se ha utilizado la

herramienta *shp2pgsql*, que permite convertir archivos SHP en tablas PostGIS. Tras la importación, se ha realizado la relación entre las capturas y las zonas de pesca (Fig. 3).

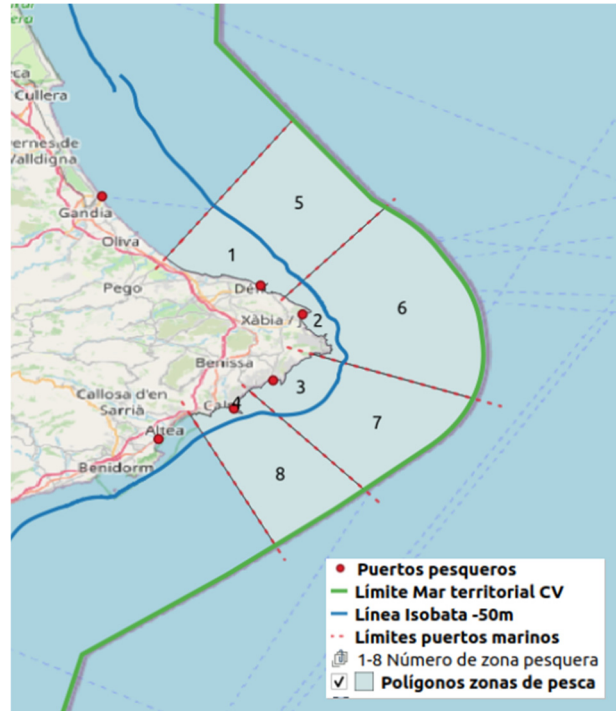


Figura 2: Delimitación de zonas pesqueras teniendo en cuenta el puerto de origen, el arte de pesca y la línea de Mar territorial.

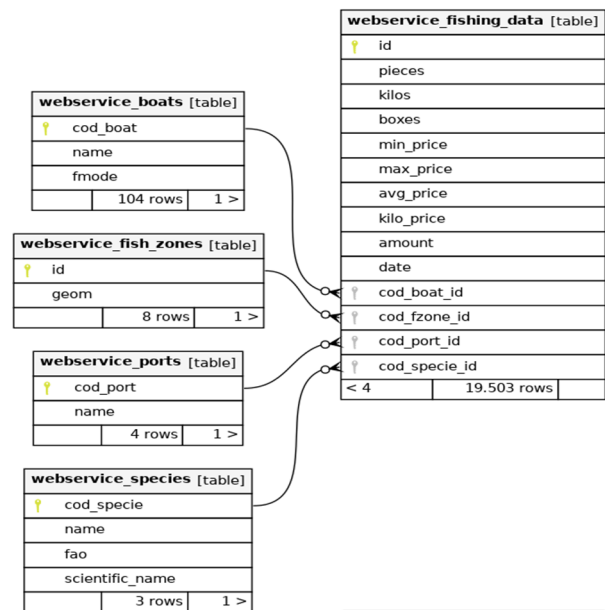


Figura 3: Diagrama entidad-relación (ERD) de los elementos principales de la base de datos.

Para la publicación de las zonas de pesca como capa de información geográfica accesible desde el visor se ha meditado utilizar GeoServer, pero finalmente se realiza desde uno de los endpoints del servicio API REST. En él simplemente se serializa el campo geometría del modelo, de forma que se convierte en un GeoJSON y queda listo para ser consumido desde OpenLayers. Las razones por la que se ha decidido publicar de esta forma y no con

GeoServer están relacionadas básicamente con el ahorro en recursos, configuraciones e instalaciones en el servidor. Sería conveniente realizar comparaciones de los tiempos de respuesta en los dos escenarios. Como el resto de endpoints del servicio API REST, las respuestas a las consultas se guardan en caché durante un tiempo determinado en una base de datos en Redis, configurada previamente en Django REST Framework.

Toda la infraestructura tecnológica de este proyecto funciona bajo un sistema operativo Debian y se aloja en un servidor virtual de OVH. Para evitar tener que utilizar la IP del servidor para acceder a la herramienta web, se ha registrado un dominio gratuito *datamar.tk*. Este tipo de dominios gratuitos tienen grandes desventajas, como la dificultad de conseguir un buen posicionamiento o SEO en los principales motores de búsqueda o un ancho de banda limitado, que se traduce en un límite de tráfico mensual. La idea es seguir desarrollando la investigación de esta forma, básicamente por el tema económico, y una vez acabada o si el IROX necesita publicar sus resultados, cambiar el dominio a uno de pago. Incluso se plantea migrar la solución al propio servidor del instituto de investigación.

## 5. Resultados

El resultado visible de esta investigación es accesible desde la siguiente URL: <https://www.datamar.tk/>. El primer contenido que se visualiza es la web de inicio, que hace una presentación global de la investigación: objetivos, equipo, colaboradores y contacto.

Existen dos formas de avanzar al geoportal desde la web de inicio, pulsando sobre la sección correspondiente en el menú de navegación superior o apretando el botón

*Acceso al Portal* situado sobre el video-resumen de la cabecera. Una vez dentro se muestran cuatro bloques, cada uno de ellos relacionado con un ámbito diferente dentro del contexto de la investigación (Fig. 4). Estos son:

- Impacto económico.
- Impacto ecosistema.
- Sostenibilidad.
- Datos abiertos.



Figura 4: Bloques de contenido del geoportal.

Los dos primeros bloques contienen información acerca de las capturas de pulpo desde dos perspectivas distintas. Ambos son cuadros de mando (Fig. 5) con una estructura similar, sin embargo, el primero muestra indicadores económicos mientras que el segundo ofrece indicadores sobre el volumen de recursos marinos capturados.

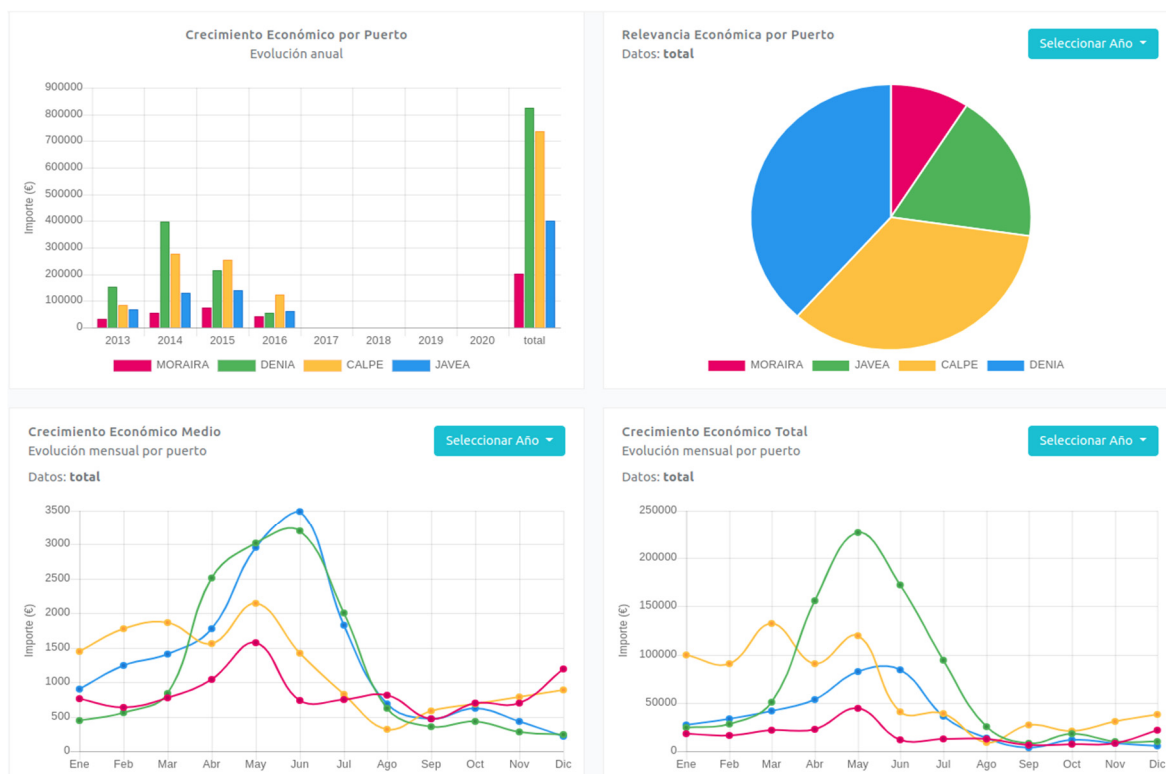


Figura 5: Fragmento de cuadro de mandos incluido dentro del bloque sobre impacto económico.



El contenido del primer bloque trata de estimar cuál ha sido el impacto económico que ha generado la pesca de pulpo en la comarca de la Marina Alta. Es importante destacar que, aunque este proyecto trata de hacer un seguimiento de las capturas de pulpo desde 2013 a la actualidad, el componente económico se pierde a partir de mitades de 2016. Esto es el resultado de no seguir un patrón uniforme o una plantilla común a la hora de recopilar los datos de las capturas en las hojas de cálculo. De todas formas, se está tratando de recuperar esta información para poder volcar datos económicos hasta la actualidad.

Así pues, actualmente el contenido del bloque sobre el impacto económico del pulpo muestra los indicadores

teniendo en cuenta las capturas realizadas entre enero de 2013 y junio de 2016. Con esto, el importe total obtenido por la pesca de pulpo durante este periodo y en los puertos de la Marina Alta es de 2.166.823,28 € con un precio medio de 5,48 €/Kg.

El cuadro de mandos dispone de varias series temporales, diagramas de barras y gráficos circulares que muestran la evolución del crecimiento económico, total y promedio, y permiten hacer una comparación por año, por puerto, o por arte de pesca. Asimismo, se han incorporado un conjunto de series temporales para controlar la fluctuación media de los precios y poder compararla también por año, por puerto o por arte de pesca (Fig. 6).

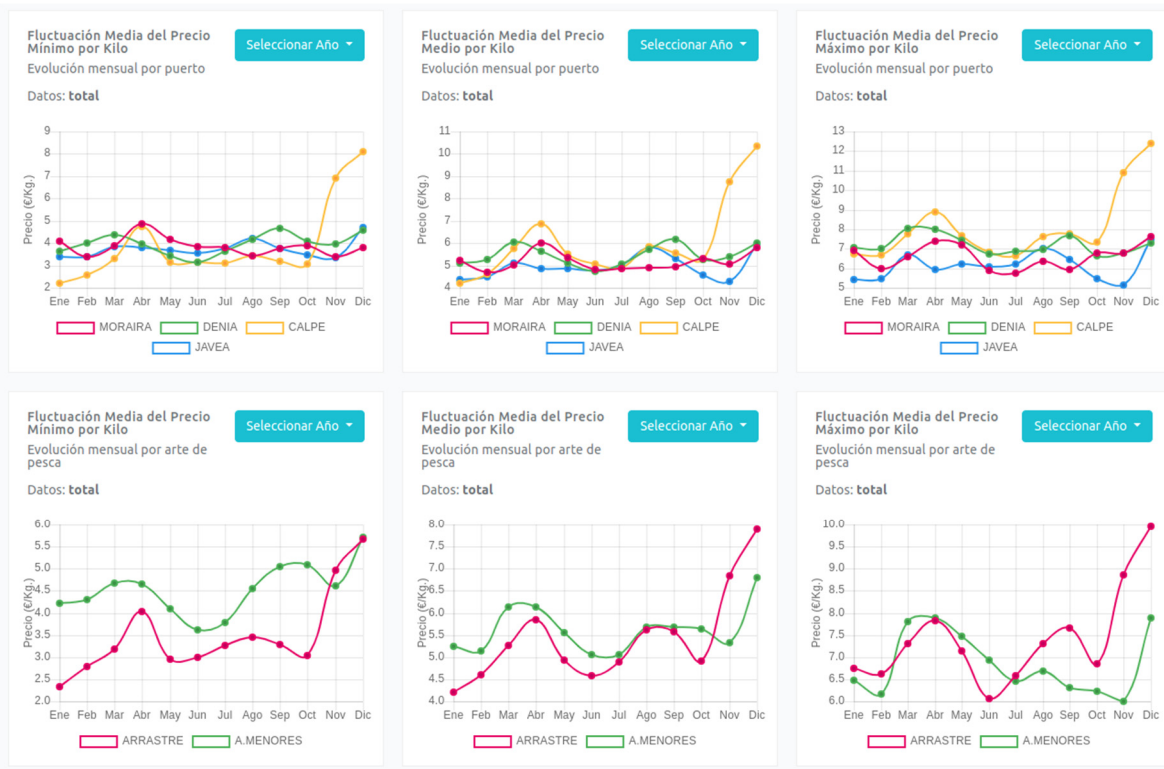


Figura 6: Control de la fluctuación media del precio por Kg. de pulpo.

Por otra parte, el contenido del segundo bloque trata de evaluar cuál ha sido el efecto de las capturas de pulpo en el ecosistema de las costas de la Marina Alta. En este caso sí que se dispone de datos de capturas desde 2013 hasta la actualidad excepto en algunos periodos en los que faltan registrar los datos de algún puerto. Esto último se está tratando de solucionar progresivamente. Así pues, el volumen de capturas total en la Marina Alta para el periodo descrito asciende a 719.779,61 Kg.

Del mismo modo que en el contenido sobre el impacto económico, los datos sobre el impacto en el ecosistema se presentan a modo de cuadro de mando mediante series temporales, diagramas de barras y gráficos circulares. Aunque esta vez en lugar de mostrar el crecimiento económico se muestra la evolución de las capturas, total y promedio. También se hace la comparación por año, por puerto y por arte de pesca.

El bloque de sostenibilidad está actualmente en desarrollo. Incluye un visor cartográfico con capas de información relacionadas con el entorno marino de las costas de la Marina Alta, como el tipo de fondo, la profundidad, arrecifes y caladeros y delimitaciones administrativas. También contiene la localización de las zonas que ya se consideran como aptas para la puesta del pulpo y se está tratando de descubrir otras nuevas para añadirlas junto a ellas en el visor. Asimismo, se han incorporado las zonas de pesca delimitadas, de forma que el usuario puede consultar el volumen de pesca en cada una de ellas para una fecha determinada (Fig. 7). También tiene la posibilidad de visualizarlo de forma secuencial mediante el botón de reproducir. El selector de capas, la información del feature seleccionado y la leyenda se encuentran en el panel lateral derecho.

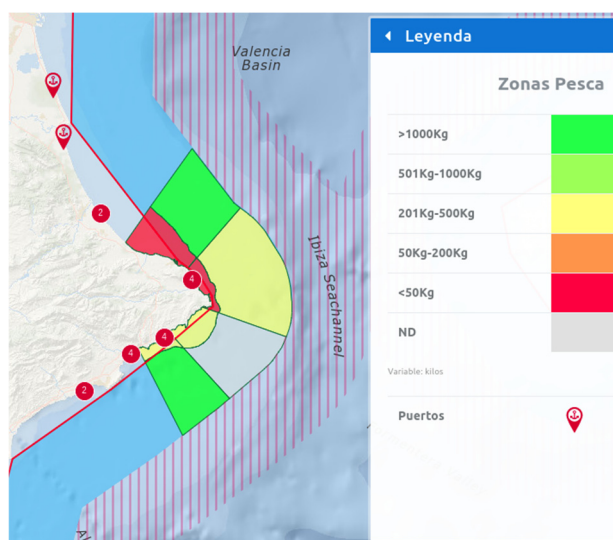


Figura 7: Volumen de capturas de pulpo por zona de pesca.

El bloque de datos abiertos no está disponible aún. La finalidad de esta sección es que los registros de capturas de pulpo de la Marina Alta puedan ser accesibles por parte de cualquier usuario interesado, siempre y cuando el IROX esté de acuerdo. De esta forma cualquier persona puede contribuir a la mejora de esta investigación e incluso puede aprovechar la información para utilizarla en futuros proyectos.

## 6. Conclusiones

Los tres objetivos planteados tanto en esta investigación como al propio IROX se encuentran en diferente situación. El punto más avanzado es el de disponer de un control de las capturas de pulpo. Actualmente ya existen dos cuadros de mandos para ello, aunque para que estos fueran más detallados se debería de completar todos los periodos en los que no se han registrado, por ejemplo, datos económicos o las capturas procedentes de puertos como Moraira o Denia.

Sin duda, el mayor problema encontrado es el de partir de unos registros de capturas con una estructura heterogénea. El primer conjunto de datos obtenido comprende desde 2013 a 2016 y en él se incluye información sobre las capturas y sus precios de mercado de los puertos de Calpe, Dénia, Moraira y Jávea. A partir de entonces, se obtienen progresivamente más registros de capturas, sin embargo, el dato económico deja de aparecer y existen periodos donde no hay información sobre capturas por parte de alguno de los puertos iniciales.

Para intentar evitar este problema en el futuro, se debe de seguir un mismo patrón en la recopilación de los datos. Actualmente el IROX los almacena en hojas de cálculo.

## References

- ARCAS-SEN, E., 2019. *Estudio de la pesquería de pulpo común (Octopus vulgaris) en la Comunidad Valenciana. Propuestas para mejorar su gestión*. Master Dissertation, Universidad de Alicante.
- CALDERÓN-GIL, C., 2018. *Análisis de la gestión socio-ambiental por parte de las cofradías de pescadores en la Comunidad Valenciana*. Master Dissertation, Universitat Politècnica de València.
- FAO. 2020. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. DOI: 10.4060/ca9229es.

Sería importante que se utilizara una plantilla predefinida para ello. Esto también agilizaría en gran medida la carga de datos en el geoportal, ya que se podría crear un módulo de importación de archivos en el mismo.

Por otra parte, el descubrimiento de nuevas zonas aptas para la puesta de pulpo está actualmente en desarrollo. Se ha implementado un visor cartográfico con capas de información relacionadas con el contexto marino. Desde el IROX se ha indicado que el pulpo suele localizarse en entornos marinos con características similares que tienen relación con el tipo de suelo, la profundidad y la temperatura. Se dispone de datos sobre las dos primeras variables en la Marina Alta, sin embargo, la temperatura en el fondo marino es muy variable en muy poco espacio. La institución de Puertos del Estado proporciona datos de sensores de temperatura en el Mediterráneo, pero ninguno de ellos se localiza en la zona estudiada. Así pues, se buscarán aquellas zonas con un tipo de suelo y una profundidad similar a las zonas ya consideradas como aptas para la puesta de pulpo y se representarán dentro del visor cartográfico.

En cuanto a conocer cuál es la evolución espacio-temporal del pulpo en la Marina Alta, se ha hecho una primera aproximación con los datos originales del IROX. En ellos, el único dato que se puede tomar como referencia geográfica es el puerto de origen de las embarcaciones. Si bien, aunque la mayoría de pescadores no se alejan demasiado del puerto debido al combustible, no es un dato preciso para poder comprender el movimiento del pulpo. Se han consultado diversas fuentes que disponen de registros de posicionamiento de embarcaciones tanto en tiempo real como en históricos. Sus servicios son principalmente de pago. Obtener acceso a ellos daría un gran impulso hacia la consecución de este objetivo.

El elemento clave es saber la ruta de los barcos cada día, para poder situar las capturas diarias. De esta forma se espera poder realizar un mapa de calor animado para ver cómo se mueve la población de pulpos, y aplicar análisis geoestadístico a las variables georeferenciadas que describen las características del medio (fondo marino, profundidad, arrecifes, caladeros, etc) en las zonas donde se aprecie mayor densidad de pulpo, según las capturas, para intentar encontrar zonas similares, y tratar de comprobar en dichas zonas que efectivamente hay más población de pulpo.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a los miembros del Institut de Recerca Oceanogràfica de Xàbia por impulsar este estudio y por su gran dedicación en la recogida de datos. Especialmente a Frederic Alemany porque sin su contribución no hubiese sido posible llevar a cabo este trabajo.

- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, A. M., 2009. *La pesquería artesanal de Santa Pola (SE de la Península Ibérica). Identificación de tácticas de pesca y estimación de índices de abundancia*. Doctoral Dissertation, Universidad de Alicante.
- GÓMEZ, A., 2017. *Realidad de la pesca de arrastre en el Mediterráneo: caso cofradía de pescadores San Pedro de Grao Castellón*. Cátedra Tierra Ciudadana, Universitat Politècnica de València.
- IROX, 2015. Institut de Recerca Oceanogràfica de Xàbia: Estudi per la recuperació de la població de polps a La Marina. Available: <http://irox.cat/recerca/biodiversitat/estudi-per-la-recuperacio-de-la-poblacio-de-polps-a-la-marina/> [09/05, 2019].

## ADAPTACIÓN DE ESTÁNDARES INTERNACIONALES A LAS DELIMITACIONES TERRITORIALES: LÍNEAS LÍMITE JURISDICCIONALES

### ADAPTATION OF INTERNATIONAL STANDARDS TO TERRITORIALS BOUNDARIS: LOCAL JURISDICTIONALS LINES BOUNDARY

Ramon Iborra-Fabra\*, Carmen Femenia-Ribera, Gaspar Mora-Navarro

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. raibfab@doctor.upv.es; cfemenia@cgf.upv.es; joamona@cgf.upv.es

#### Abstract:

Disagreements between public administrations and neighbors in areas near the territorial boundaries between municipalities have increased as the urban development of municipalities increases. Not surprisingly, in Spain, the cartographic representation of jurisdictional boundary lines, acting as territorial delimitations between municipalities, were made at the beginning of the 20th century and it is estimated that they are accurate, in some cases, up to 50 meters. These disagreements have been expressed in newspaper publications, in requests for demarcation to administrative bodies, or in court. Focusing on the geographical scope of the Valencian Community, the compilation of publications for the study can promote citizen empowerment and the strengthening of public administrations, in the sense of the Sustainable Development Goals and Targets (SDGs). The adaptation and application of international standards, such as the Land Administration Data Model (LADM) and the International Standard for the Measurement of Land and Land Rights (ILMS), which bring together a framework according to the purpose of the administration (FFP), of the property and of the territory itself, together with public - private partnership (PPP) can be a dynamic fact in the review and improvement of jurisdictional boundary lines.

**Key words:** territorial boundary, municipal boundary, boundarie, ILMS, LADM, PPP, ODS

#### Resumen:

Las desavenencias entre administraciones públicas y vecinos en las zonas próximas a las delimitaciones territoriales entre municipios han ido en aumento a medida que el desarrollo urbanístico de los municipios ha sido mayor. No en vano, en España, la representación cartográfica de las líneas límite jurisdiccionales, entendidas estas como delimitaciones territoriales entre municipios, fue realizada a principios del siglo XX y se estima que tienen una exactitud, en algunos casos de hasta de 50 metros. Estas desavenencias han sido manifiestas en publicaciones en periódicos, en peticiones de deslinde a los órganos administrativos o en sentencias judiciales. Centrándonos en el ámbito geográfico de la Comunidad Valenciana, la recopilación de las publicaciones para su estudio posterior puede promover la representación ciudadana y el fortalecimiento de las administraciones públicas, en el sentido de los objetivos y metas por el desarrollo sostenible (ODS). La adaptación y aplicación de estándares internacionales, como el modelo de datos de la administración del territorio (LADM) y el estándar internacional para la medición de la tierra y de sus derechos (ILMS), que aúnen un marco de trabajo acorde al propósito de la administración (FFP), de la propiedad y del propio territorio, junto con la asociación público - privada (PPP) pueden ser un hecho dinamizador en la revisión y mejora de las líneas límite jurisdiccionales.

**Palabras clave:** delimitación territorial, línea límite, linde, asociación público - privada (PPP), ILMS, LADM, ODS

### 1. Introducción

En España, las delimitaciones territoriales entre municipios fueron monumentadas a partir de hitos o mojones en los inicios del siglo XX mediante el Decreto del Ministerio de Gobernación de 23 de diciembre de 1870 publicado en la Gaceta de Madrid del 12 de febrero de 1871 (Fig. 1). Posteriormente, se realizaron las acciones de ratificación de los mojones y de las alineaciones que los unen, por las comisiones formadas por los representantes políticos y civiles de cada

municipio. Siendo el resultado de estas ratificaciones las «Actas de Deslinde» (Fig. 2).

Trabajos topográficos para la observación de los mojones y su representación en la primera edición del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 (MTN50) se realizaban con posterioridad a la ratificación de estos por los representantes de cada corporación municipal. Cabe indicar que, inicialmente se representaron a escala 1:25.000 junto con las principales vías de comunicación y de elementos hidrográficos en los Planos Geométricos de cada municipio, conocidos como las «Pañoletas», realizados por el Instituto Geográfico y Estadístico. Se

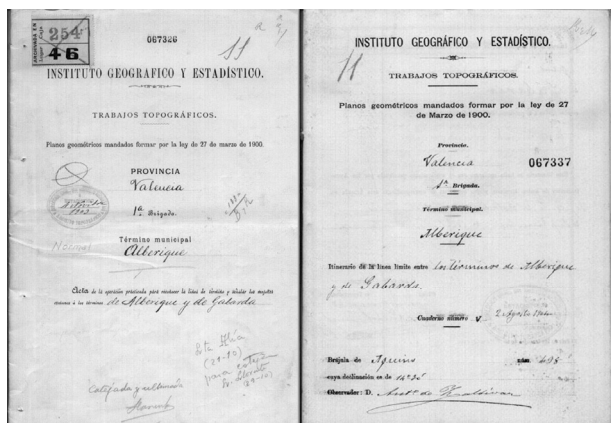
\* Corresponding Author: Ramon Iborra-Fabra, raibfab@doctor.upv.es



observaron y representaron de forma indistinta a si hubo o no ratificación de la delimitación territorial municipal. La exactitud con que se representaron es acorde a la escala de representación. La exactitud con que se representan los mojones en el MTN50 es de hasta 50 metros, así como de las alineaciones que los unen. Mediante las Actas de Deslinde y de los Cuadernos de Campo se trató de cubrir una finalidad administrativa, (Fig 2). Con el paso del tiempo, para las distintas ediciones del MTN50, se empleó el copiado y digitalización de la representación inicial.



**Figura 1:** Mojón M3 de la línea límite de Bugarra y Lliria. Fuente: propia.



**Figura 2:** Acta de Deslinde y Cuaderno de Campo de la línea límite de Alberic y Gavarda. Fuente: IGN.

De forma paralela, en la misma época, se empezaron a realizar los trabajos topográficos para la obtención de los Planos Topográficos para el Catastro Parcelario, por polígonos, de los municipios españoles. Estos planos fueron realizados por el Instituto Geográfico y Catastral a escala 1:2.000 y su finalidad fue fiscal pues se trató de representar y catalogar el aprovechamiento que cada ciudadano hacia del territorio. De entre los elementos que se representaron en los Planos citados, se haya la delimitación territorial municipal. Es por ello, que los elementos característicos de las delimitaciones territoriales como son los mojones fueron objeto de trabajos topográficos para finalidades, ya sea fiscal o jurisdiccional, y exactitudes distintas.

En la actualidad, aún se manifiestan las desavenencias entre municipios por reivindicaciones del territorio, siendo

la delimitación territorial entre ellos el motivo de la disputa. Disputas que se ven incrementadas por la planificación urbanística del territorio. La indeterminación de las delimitaciones territoriales municipales ya sea por la desatención de la conservación de los mojones, por errores u omisión en su representación o por la falta de acuerdo entre los municipios; no ayuda a solucionar el conflicto.

Por ello, la recopilación de las publicaciones de noticias, de peticiones de deslinde a los órganos administrativos o de sentencias judiciales para su estudio posterior puede promover la representación y el fortalecimiento de las administraciones públicas, en el sentido de los objetivos y metas por el desarrollo sostenible (ODS).

Un fortalecimiento que puede verse incrementado por la adaptación y aplicación de estándares internacionales, como el modelo de datos de la administración del territorio (LADM) y el estándar internacional para la medición de la tierra y de sus derechos (ILMS), que aúnen un marco de trabajo acorde al propósito de la administración (FFP), de la propiedad y del propio territorio, junto con la asociación público - privada (PPP) pueden ser un hecho dinamizador en la revisión y mejora de las líneas límite jurisdiccionales.

Mediante las asociaciones público – privadas se fomenta el emprendurismo profesional y la participación ciudadana en la Administración del Territorio, así como la optimización de los recursos económicos y la conclusión de proyectos en periodos concretos de tiempo. Para ello, es necesaria la homogenización de la información evaluada y generada que permita el control, revisión y posterior tratamiento de los datos. Por ello, la estandarización de procesos y de la información puede ayudar en la realización de proyectos complejos.

Siendo la Comunidad Valenciana el ámbito geográfico de aplicación de los estudios, el objetivo de este artículo es describir la recopilación documental de los convenios de la participación público - privada para la administración del territorio en España, de los estándares internacionales que son de aplicación, así como los procedimientos administrativos mediante los cuales se realizan los trabajos de recuperación y mejora geométrica de las líneas límite en la actualidad.

## 2. La Asociación Público-Privada en la Administración del Territorio en España

La Participación o Asociación Público – Privada (PPP), en inglés *Public - Private Partnerships*, según el Banco Mundial (BM) es «un contrato a largo plazo entre una empresa privada y un organismo para proveer un bien o un servicio público, en el cual la parte privada corre con los riesgos y responsabilidad de la gestión, y la remuneración está vinculada al rendimiento» (The World Bank Group 2021; World Bank 2014).

La aplicación de las PPP en la gestión del territorio ha sido evaluada en la Sesión 8ª de la Reunión Anual de la Comisión 7 de la *International Federation of Surveyors* (FIG) celebrada en octubre de 2020 (FIG 2021). La FIG en colaboración con el *Working Party on Land Administration* (WPLA) revisan los principios generales para el empleo de la PPP como mecanismo para mejorar

los servicios y la infraestructura de los organismos catastrales y registrales.

En este sentido, en España, cabe destacar el convenio de colaboración entre la Dirección General de Catastro (DGT) y el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía (COIGT) mediante la Resolución de 7 de febrero de 2019 el cual se enmarca en temas de la administración de la tierra (Velasco *et al.* 2021). Este convenio, es fruto de la aplicación del art. 4, del Texto Refundido de la Ley del Catastro Inmobiliario y el objeto del convenio es el intercambio de información gráfica y alfanumérica. Tiene una vigencia y renovación anual, con una Comisión de Seguimiento, Vigilancia y Control, así como planes de formación para los colegiados.

Con el Colegio de Registradores de la Propiedad y Mercantiles de España (CORPME), el COIGT tiene un convenio de colaboración desde el 9 de octubre de 2018.

El convenio con el CORPME presenta características distintas al de la DGC pues el objeto es lograr la interoperabilidad entre las plataformas del CORPME y del COIGT pues tiene una vigencia de cuatro años, planes de formación y se realiza al amparo de profesionales acreditados y del protocolo de visados según la Norma ISO 9001:2.015.

Los profesionales acreditados que, en España, en el contexto de la Administración del Territorio, el COIGT ha creado el Esquema de Certificación de Personas, basado en la Norma ISO 17.024 (ISO 2012), con perfil de Técnico Especialista en Catastro, Propiedad Inmobiliaria y Valoración.

El organismo de certificación, acreditado por la Agencia Española de Acreditación (ENAC), que realiza las pruebas es el Instituto de Graduados en Ingeniería e Ingenieros Técnicos de España (INGITE).

### 3. Estándares Internacionales, aplicados a la administración del territorio

Las delimitaciones territoriales españolas, en general, y las líneas límite jurisdiccionales, en particular, forman parte de equipamiento geográfico de referencia español, regulado por la ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras de datos y los servicios de información geográfica de España.

La legislación citada es la transposición al estado español de la legislación europea INSPIRE con el fin de definir a infraestructura de datos europea.

En España, es el Instituto Geográfico Nacional (IGN) el órgano que ha adaptado la casuística de las distintas Unidades Administrativas en España al modelo de datos propuesto por la Directiva INSPIRE.

Cabe destacar que, en mayor medida, los municipios están formados por un único territorio, pero también los hay con varios territorios e incluso territorios con jurisdicción compartida. Este hecho es relevante pues plantea el empleo de modelos de datos de administración del territorio (LADM) basados en la Norma UNE-EN ISO 19.152 (UNE 2021).

Sin embargo, en España, dado que ya existe un modelo de datos consolidado, la aplicación de la LADM no se está planteando con relación a grandes cambios estructurales.

La correcta estandarización de las fuentes de datos espaciales y su representación, geométrica y topológica; permitirá proporcionar una base extensible para el desarrollo de los sistemas de la administración de territorio, así como de permitir la comunicación entre los interesados involucrados.

Por otro lado, el desarrollo y adaptación de la norma *International Land Measurement Standard* (ILMS) (Coalición de las ILMS 2019) a cada país, desarrollado en su primera edición en mayo de 2019, puede ayudar a normalizar la obtención de datos espaciales y los Sistemas de Información Territorial (SIT).

Esta temática ha sido evaluada en la Sesión 9 de la Reunión Anual de la Comisión 7 de la *International Federation of Surveyors* (FIG 2021), la cual trata de la Administración del Territorio, de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, de los modelos de datos de la ISO 19.125 y del Modelo en el Dominio de la Tenencia Social (STDM), así como de las iniciativas con el enfoque adecuado al propósito, *fit-for-purpose*.

La formación específica de los profesionales acreditados en la Norma ISO 17.024, basada en esquemas de certificación de las personas con competencias profesionales concisas en materia técnico – jurídica es un aliciente para el éxito de la aplicación de los estándares internacionales relacionados con la Administración del Territorio aplicado a las delimitaciones territoriales.

### 4. La Recuperación y Mejora Geométrica de las Líneas Límite Jurisdiccionales, en la actualidad

En 2012, el IGN promovió en las entidades municipales la recuperación y mejora geométricas de las líneas límite. Entendida la recuperación, en aquellos casos en que los mojones o el trazado de esta por vías de comunicación o cursos fluviales había desaparecido; y la mejora geométrica, por la determinación de su posición por técnicas e instrumentación topográfica de mayor precisión que con las que fueron observadas a principios del siglo XX.

El objetivo no era otro que incentivar la recuperación y mejora geométrica de las líneas límite. Fruto de estas actuaciones es el procedimiento y pliego de condiciones técnicas para la recuperación y mejora geométrica de las líneas límite jurisdiccionales (Femenia-Ribera *et al.* 2014).

En el procedimiento y pliego descrito normalizó los distintos procedimientos que debían de seguir las entidades locales para la ratificación del Acta Adicional al Acta de Deslinde original de inicios del siglo XX.

De la misma manera, se establecieron los requisitos técnicos y jurídicos necesarios en caso de que las entidades locales requiriesen la participación público – privada de un técnico especialista en la materia (Iborra-Fabra *et al.* 2020) en cumplimiento de lo dispuesto en el Real Decreto 1690/1986, de 11 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Población y Demarcación de las Entidades Locales.

En la actualidad, el IGN está realizando los trabajos técnicos y asesorando en el referendo jurídico en los

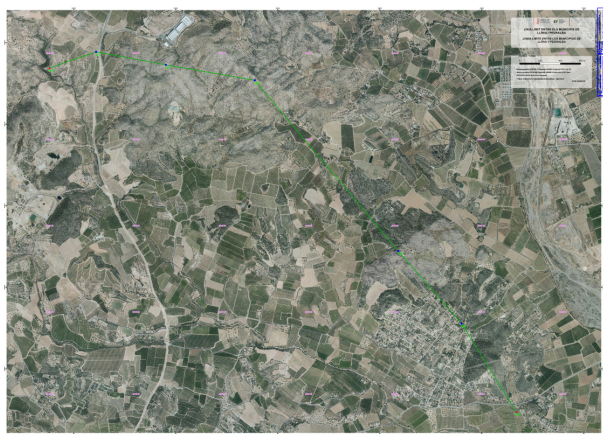
convenios de colaboración suscritos en las Comunidades Autónomas de Cantabria y de Castilla la Mancha.

#### 4.1. En la Comunidad Valenciana

El Instituto Cartográfico Valenciano (ICV), creado en 1997, es un organismo autónomo de la *Generalitat* y le corresponde, Ley 2/2020, de 2 de diciembre, de la *Generalitat*, de la información geográfica y del Instituto Cartográfico Valenciano; el ejercicio de las actividades geomáticas que sean necesarias para el ejercicio de cualquier competencia de la *Generalitat*.

En el año 2001, se creó el Consejo Técnico de Delimitación Territorial de la *Comunitat Valenciana*, mediante el Decreto 113/2001, de 19 de junio, siendo posible la participación expertos para el asesoramiento del consejo técnico.

En años recientes, el ICV ha fomentado la contratación pública de los trabajos técnicos para la recuperación y mejora de las líneas límite mediante licitaciones (Instituto Cartográfico Valenciano 2016) (Fig. 3). La contratación pública queda regulada por la Ley de Contratos del Sector Público y las empresas licitadoras tienen que estar inscritas en el Registro Oficial de Contratistas y Empresas Clasificadas de la Comunidad Valenciana (ROLECE). Mediante este registro administrativo a los licitadores se les evalúa su capacidad técnica y económico – financiera para realizar la contratación.



**Figura 3:** Mejora geométrica de la línea límite de Pedralba y Llíria. Fuente: propia en colaboración con el ICV.

Cabe destacar, que el ICV insta a que los licitadores tengan clasificación CPV, *Common Procurement Vocabulary*, basada en: 71351810 – Servicios Topográficos, 71353000 - Servicios de mediciones

topográficas de superficie y 71355200 – Servicio oficial de topografía catastral.

Con la aprobación de la Ley 2/2020, de 2 de diciembre, de la *Generalitat*, de la Información Geográfica y del *Institut Cartogràfic Valencià*, se aprueban los «actos de oficio» a la mejora geométrica de las líneas de término, dado que no supone ni una nueva delimitación ni una alteración, puesto que refleja fielmente el acta de delimitación original aprobada en su día por los ayuntamientos implicados.

Se crea también, mediante la nueva legislación, el Registro de Cartografía autonómico.

## 5. Conclusiones

Con el desarrollo de este estudio se ha desgranado singularidad del estado actual de las líneas límite jurisdiccionales. En el sistema cartográfico actual, conviven procedimientos de observación y de referendos jurídicos con distintas finalidades y precisiones técnicas sobre una misma realidad. Es por ello es determinante, la adaptación a las líneas límite jurisdiccionales de los estándares internacionales y en la implementación procedimientos internacionales de medición de la tierra.

La armonización y normalización de los procedimientos de obtención de los datos espaciales, así como de su interacción con los operadores jurídicos, administrativos y la propia ciudadanía permitirá homogenizar los resultados, así como lograr una eficiencia administrativa y económica óptima. Para ello, la participación de público - privada de técnicos especialistas acreditados en normas internacionales y con competencias profesionales en el ámbito de las delimitaciones territoriales, en general, y en las líneas límite municipales, en particular, es significativo. Participación que ha de permitir su aplicación en espacio concreto de tiempo y que cubra la totalidad del territorio.

Queda por abordar, la posibilidad de colaboración institucional con el IGN y el ICV, en este caso, entre organismos públicos para el caso concreto que nos atañe. El estudio de aquellos requisitos técnicos y jurídicos, formales y económico-financieros que sean acordes al vigente sistema de contratación pública, así como de la formación, evaluación y seguimiento de estos.

## Agradecimientos

Agradecemos la confianza mostrada en estos estudios a los técnicos y responsables del Instituto Geográfico Nacional y del Instituto Cartográfico Valenciano.

## References

- BENNETT, R., MASLI, E., POTEI, J., UNGER, E. M., LEMMEN, C. H. J., and DE ZEEUW, K., 2019. Cadastral Entrepreneurs Recognizing the Innovators of Sustainable Land Administration. In *FIG Working Week 2019: Geospatial Information for a Smarter Life and Environmental Resilience*.
- COALICIÓN DE LAS ILMS. 2019. Coalición de Normas Internacionales de Levantamientos de Tierra. Available: <https://ilmscoalition.files.wordpress.com/2020/08/ilms-spanish-final-web-upload.pdf> [7/15, 2021].
- FEMENIA-RIBERA, C., BENITEZ-AGUADO, E., MORA-NAVARRO, G., and MARTINEZ-LLARIO, J., 2014. Method os recovering mupial boundary lines in Province of Valencia (Spain) by means of histotical cadastral maps. *Survey Review*, **46**(337), pp. 255-266. DOI: 10.1179/1752270613Y.0000000081
- FEMENIA-RIBERA, C., MORA-NAVARRO, G., and MARTINEZ-LLARIO, J. C., 2021. Advances in the Coordination between the Cadastre and Land Registry. *Land*, **10**(1), 81. DOI: 10.3390/land10010081



- FIG. 2021. International Federation of Surveyors, IG Commission 7 - activities - events. Available: [https://www.fig.net/organisation/comm/7/activities/events/2020\\_annual\\_meeting.asp](https://www.fig.net/organisation/comm/7/activities/events/2020_annual_meeting.asp) [7/15, 2021].
- IBORRA-FABRA, R., FEMENIA-RIBERA, C., and MORA-NAVARRO, G., 2020. La participación público-privada en la recuperación y mejora geométrica de líneas límite municipales. Caso práctico de Alberic y Gavarda, Valencia (España). *Mapping*, **201**, pp. 16-21.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC VALENCIÀ. 2016. Delimitació municipal - Generalitat Valenciana (gva.es). Available: <https://icv.gva.es/va/delimitacio-municipal> [7/15, 2021].
- ISO. 2012. ISO/IEC 17024:2012(es), Available: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-iec:17024:ed-2:v1:es> [7/15, 2021].
- MAHONEY, R., MOSS, D., JACUBEIT, T., ARONSOHN, A., GONZALEZ, A., TIWARI, P., and SMITH, A., 2019. International Land Measurement Standard: Due Diligence for Land and Real Property Surveying.
- THE WORLD BANK GROUP. 2021. Home | PPP Knowledge Lab. Available: <https://pppknowledgelab.org> [7/15, 2021].
- UNE. 2021. Información geográfica. Modelo para el ámbito de la administración del territorio (LADM). (ISO 19152:2012).
- VELASCO MARTÍN-VARES, A., FEMENIA-RIBERA, C., GARCÍA BENITO, J., and OJEDA MANRIQUE, J., 2021. Finally, the model of collaboration between land surveyor engineer and the Spanish Directorate General for Cadastre is institutionalized. *Commission 7 FIG 2021*
- WORLD BANK DOCUMENT. 2014. Public-Private Partnerships. Reference Guide, Version 2.0. Available: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/600511468336720455/pdf/903840PPP0Refe0Box385311B000PUBLIC0.pdf> [7/15, 2021].



## ARQUITECTURA NEURONAL PARA PREDICCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN BASE A VARIABLES METEOROLÓGICAS

### NEURAL ARCHITECTURE FOR SOLAR RADIATION PREDICTION BASED ON METEOROLOGICAL VARIABLES

Llinet Benavides\*, Miguel Ángel Manso

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. [l.linnet.bcesar@upm.es](mailto:l.linnet.bcesar@upm.es); [m.manso@upm.es](mailto:m.manso@upm.es)

#### Abstract:

Solar forecasting is of great interest due to the growing use of renewable energies as an alternative to the global problems posed by current energy sources. In the last decade important advances have been achieved, thanks to the introduction of results from other areas of knowledge such as Artificial Intelligence. In particular, deep learning with the many variants of neural networks. In this paper, we propose a model that combines a convolutional layer with a GRU (Gated Recurrent Units) layer to a solution based on supervised classification. The classes were defined as intervals of solar radiation values. Objects are represented by ambient temperature, wind speed, atmospheric pressure, humidity and precipitation values. A dataset with thousands of records and a representativeness of two years is available, taken from meteorological stations distributed throughout Galicia. The evaluation was done using Macro-F1 measure because the classes are unbalanced.

**Key words:** supervised classification, recurrent neural networks, solar radiation

#### Resumen:

La predicción de la radiación solar presenta gran interés, debido al creciente uso de las energías renovables, como alternativa a los problemas globales que plantean las fuentes de energía actuales. En la última década se han logrado importantes avances, gracias a la introducción de resultados de otras áreas del conocimiento como la Inteligencia Artificial. En particular el aprendizaje profundo con las numerosas variantes de redes neuronales. Proponemos una solución basada en clasificación supervisada que combina en un modelo, una capa convolucional con una capa GRU (Gated Recurrent Units por sus siglas en inglés). Las clases se definen como intervalos de valores de radiación solar. Los objetos se representan a través de valores de temperatura ambiente, velocidad del viento, presión atmosférica y precipitación. Se dispone de un conjunto de datos de 112 estaciones con miles de registros de un período de dos años, tomados de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio de Galicia. Se ha empleado la métrica Macro-F1 para evaluar la bondad de la clasificación porque las clases están desbalanceadas.

**Palabras clave:** clasificación supervisada, redes neuronales recurrentes, radiación solar

### 1. Introducción

Para el año 2030 el gobierno de España prevé a partir del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), una generación eléctrica con potencia total instalada de 157 GW. De las cuales se espera que la solar fotovoltaica aporte 37 GW (BOE 2021). La predicción de radiación solar juega un papel muy importante, para mejorar la eficiencia de la entrega, de esta energía renovable de los productores a los consumidores. Al ser una fuente de energía que responde a los cambios en el clima y por tanto es variable, es importante estudiar cómo se comporta en base al histórico de medidas de las variables meteorológicas temperatura y presión atmosférica, entre otras. Este estudio se ha realizado con diferentes enfoques; modelos estadísticos ó modelos físicos, dentro de los métodos clásicos estadísticos de Aprendizaje Automatizado y variantes híbridas de estos métodos o con técnicas de Aprendizaje Profundo (Ahmad *et al.* 2020; Aslam *et al.* 2019; Shamshirband *et al.* 2019; Mellit

*et al.* 2020); Nosotros nos centraremos en los que utilizan el aprendizaje profundo.

Uno de los retos actuales es definir arquitecturas de redes de aprendizaje profundo, capaces de predecir la radiación solar en base a las observaciones registradas por estaciones meteorológicas, entrenando las redes con un largo y extenso histórico de datos de los últimos años. Para aprender cómo afectan los cambios que se producen en la climatología (temperatura, presión atmosférica, velocidad del viento y dirección del mismo) a corto y medio plazo, evaluando cómo será el comportamiento de la radiación solar.

El enfoque de clasificación supervisada utilizado es novedoso en relación a lo investigado y descrito en la literatura. La mayoría de las aproximaciones se basan en predecir el valor de la radiación solar para un instante de tiempo o para un intervalo de tiempo, del modo más exacto posible. Nuestro objetivo, en este caso, es determinar si el nivel de radiación se encuentra dentro de un intervalo de radiaciones dado. Con tal propósito

\* Corresponding Author: [Llinet Benavides, l.linnet.bcesar@upm.es](mailto:l.linnet.bcesar@upm.es)

proponemos transformar el conjunto de datos, de tal forma que los valores de salida sean un vector de clases, en el que cada clase se corresponda con un intervalo de radiaciones. La propuesta consiste en clasificar o estimar en qué intervalo se encontrará la radiación solar usando el rango de 0 a 1300  $\text{wm}^{-2}$  a intervalos de 50 y 100  $\text{wm}^{-2}$ .

Esta transformación de valores de radiación a un conjunto de clases, hace que el método de aprendizaje propuesto no se entrene para resolver un problema de regresión sino para uno de clasificación. La salida esperada del modelo es un vector que contenga las probabilidades de que el valor real que se desea predecir se encuentre en algunos de los intervalos seleccionados.

La parte restante del documento se organiza de la siguiente manera. Sección 1.1 que describe trabajos relacionados con la temática. Sección 2 en la que se describe la arquitectura empleada y el flujo de trabajo usado para obtener el resultado. La sección 3 es la presentación del conjunto de datos y el preprocesado realizado. Las secciones 4 y 5 muestran las medidas de evaluación y los experimentos, con un análisis crítico. Finaliza con la sección 6 con las conclusiones y el trabajo futuro.

### 1.1. Trabajos relacionados

Las técnicas de aprendizaje automatizado y en especial las de aprendizaje profundo dependen de un histórico de datos y predicen el comportamiento futuro sobre esa base. Para la predicción de radiación solar, el histórico de datos utilizado consta de variables observadas mediante estaciones meteorológicas desplegadas sobre un territorio o región (Carrera and Kim 2020; Kim *et al.* 2019), de imágenes de satélite (Babar *et al.* 2019; Ghimire *et al.* 2019), de imágenes del cielo (Pedro *et al.* 2019) (tomadas desde la superficie para analizar la claridad de la atmósfera) y modelos físicos (Yang *et al.* 2019). En las aproximaciones al problema se han usado las fuentes de datos de forma independiente o mezclando variables procedentes de las diferentes fuentes (Tao *et al.* 2021; Aguiar *et al.* 2016; Lotfi *et al.* 2020).

Recientemente en la predicción de radiación solar se han utilizado modelos de aprendizaje profundo que están establecidos en otros campos del conocimiento como el Procesamiento del Lenguaje Natural, la visión por computador y el tratamiento de imágenes médicas. En (Aslam *et al.* 2019) se realiza una revisión de los principales modelos usados, donde las redes recurrentes y las redes convolucionales tienen una gran representación. Esto se debe a su capacidad de trabajar con secuencias de datos, aprovechando al máximo esa configuración de dataset de entrenamiento, para extraer características esenciales que contribuyen a mejorar la capacidad de predicción del modelo.

## 2. Método propuesto

El uso de redes neuronales convolucionales (CNN) es muy común en el campo del procesamiento de imágenes. Con su introducción, se logró la automatización del proceso de aplicación de filtros, obteniendo resultados excelentes para dicha tarea (filtrar). Pero no es el único campo que se ha visto beneficiado con su aplicación. En el campo del procesamiento de señales es muy común aplicar varias operaciones de convolución a la señal que se esté procesando con el objetivo de reducir ruido,

suavizar la curva de la señal y extraer características significativas.

Las redes LSTM (Long–Short Term Memory por sus siglas en inglés) y GRU son redes neuronales recurrentes especialmente diseñadas para el análisis de secuencias de datos. Sin embargo, las redes GRU tienen una menor complejidad computacional que las LSTM, permitiendo completar los ciclos de entrenamiento en un menor tiempo. Por este motivo se escogió la red GRU para continuar con la investigación.

Sobre esta base se decidió implementar un modelo que combina una capa convolucional con una capa GRU. Con la estructura que se muestra en la Figura 1.

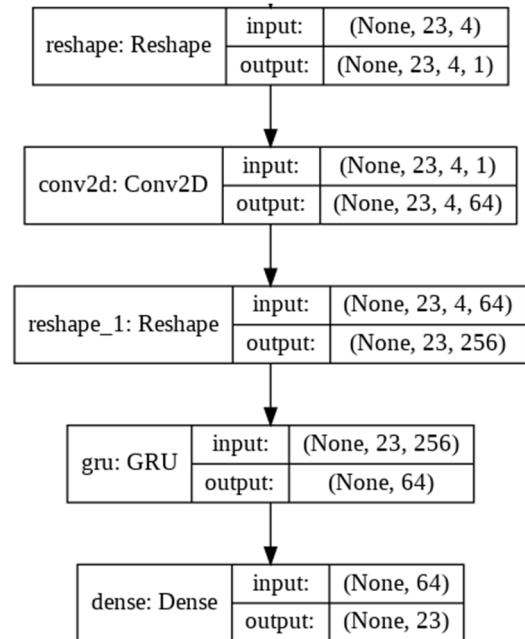


Figura 1: Arquitectura de la red.

La arquitectura comienza con la transformación de los datos en la estructura de entrada que espera la capa convolucional, para procesarlos con una red convolucional con un filtro de  $3 \times 1$ , se realiza una nueva transformación para la entrada de la capa GRU. La capa densa involucra un clasificador (o función de activación) softmax.

El modelo se entrena y valida a través de la iteración sobre el conjunto completo de datos. Usando un batch-size de 256 y num-epochs de 40. La tasa de aprendizaje es de 0.0001 y el optimizador empleado es Adam. Los parámetros se obtuvieron a través de validación cruzada.

Se crearon 2 juegos de datos por estación como se muestra en la Figura 2, donde los valores de salida fueran un vector de clases, cada clase corresponde a un intervalo de radiaciones. En este caso en particular se seleccionaron 13 y 23 intervalos para un rango de 0 a 1300  $\text{wm}^{-2}$ , los niveles de radiación posibles, con intervalos de 100 y de 50  $\text{wm}^{-2}$  respectivamente.

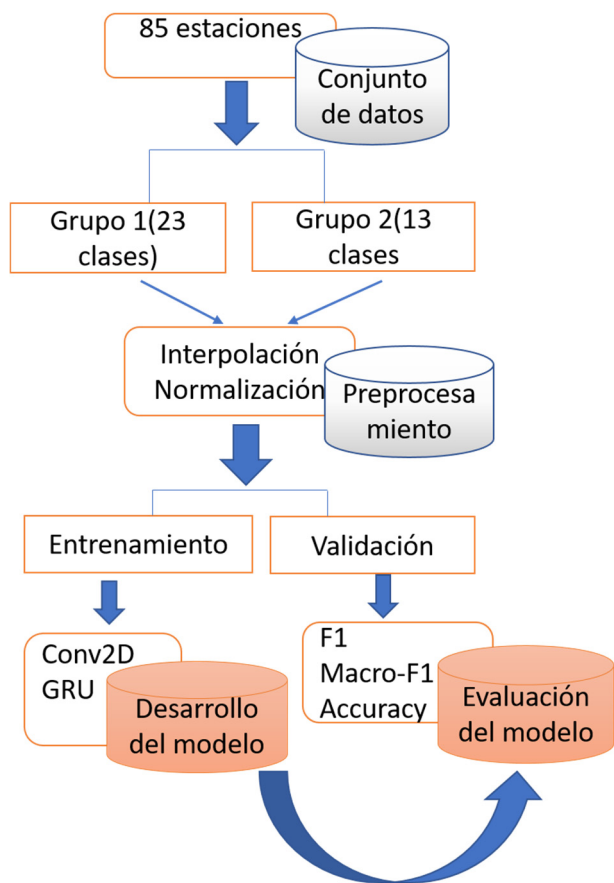


Figura 2: Flujo de trabajo.

Para cada uno de los juegos de datos se realizó un preprocesamiento de los datos, consistente en la normalización y una interpolación lineal. La normalización se estableció en un rango de (-1,1).

### 3. Descripción del conjunto de datos

El conjunto de datos recopilado para la realización de esta investigación está compuesto por los registros de 112 estaciones meteorológicas de Galicia, almacenados en un archivo con formato tabular .csv. Las variables observadas fueron: la temperatura, la presión atmosférica, la precipitación, la velocidad y dirección del viento y la irradiancia solar. En la Figura 3 se muestran las locaciones de las estaciones utilizadas. Además se cuenta con un identificador para cada una de las estaciones, así como sus coordenadas geográficas y su altura.

Sobre los datos se realizó una agrupación de los registros por estaciones, y se detectó que 27 estaciones no contenían información sobre la presión atmosférica. Este pre-procesamiento inicial provocó que el conjunto de datos contara con menos estaciones para el análisis. Los intervalos de tiempo de 10 minutos de cada una de las estaciones fueron utilizados para realizar la transformación de los datos y prepararlos para el entrenamiento de la red neuronal. Se utilizaron 85 estaciones para los experimentos. Con información de dos años, de febrero del 2017 a febrero del 2019.

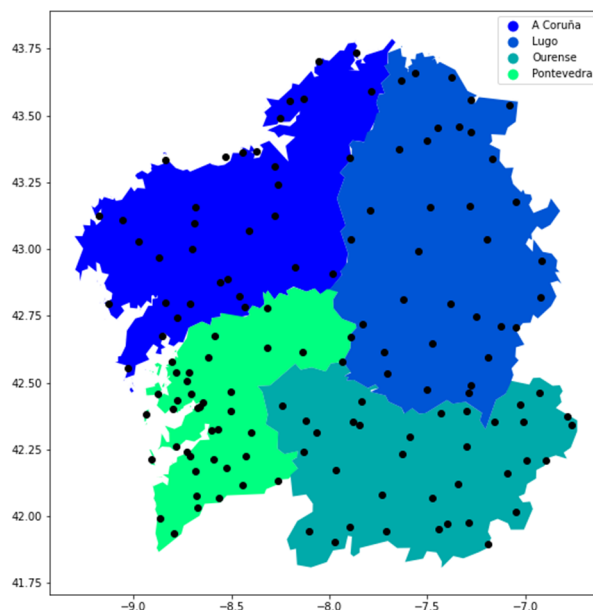


Figura 3: Representación espacial de las estaciones estudiadas.

### 4. Métrica para la evaluación

Para la evaluación de los resultados utilizamos la métrica Macro-F1 y la cantidad de aciertos de objetos clasificados correctamente, porque esta nos permite analizar la calidad de un problema de clasificación, en problemas con clases desbalanceadas Ec. (1):

$$Macro - F1 = \frac{\sum F1i}{n} \quad (1)$$

F1 se calcula haciendo la media armónica entre la precisión (precision) y la exhaustividad (recall) para cada una de las clases Ec. (2):

$$F1 = 2 * \frac{Presicion * Recall}{Presicion + Recall} \quad (2)$$

### 5. Experimentos y análisis de los resultados

Para la validación del modelo se dividió el conjunto de datos en 80% para el entrenamiento y 20% para la validación, para cada una de las estaciones en los grupos de datos y se evaluó utilizando las métricas mencionadas antes.

En la Figura 4 se muestra la evaluación del modelo por grupos de intervalos, Las líneas de color rojo representan los intervalos de 50  $wm^{-2}$  y las líneas de color azul representan los intervalos de 100  $wm^{-2}$ .

Las líneas continuas representan los valores de aciertos y las líneas discontinuas los valores de Macro-F1 para cada una de las estaciones. Los valores de las medidas se muestran normalizadas en una escala de 0 a 1, considerando el 1 como el 100% de calidad.

Como se puede apreciar en la Figura 4 para los valores de radiación agrupados en intervalos de 100  $wm^{-2}$  los niveles de acierto son más altos, entre un 0,6329 y 0,9107, y la media obtiene un 0,7466. No sucede lo mismo con los intervalos de 50  $wm^{-2}$  donde el acierto se encuentra entre 0,4660 y 0,8581 siendo la media un

0,5969. Existen varios factores que afectan; el desbalance de clases, siendo las clases de los valores de radiación más pequeños, las de mayor representación, además que los límites de decisión entre clases están muy cercanos, creando confusión en la clasificación de los objetos.

La medida Macro-F1 para los intervalos de 100 alcanza valores entre 0,3940 y 0,6544, con una media de 0,5127. En el caso de los intervalos de 50 son menores los valores entre 0,2356 y 0,5352, con una media de 0,3553. Esta medida se afecta principalmente por los errores en la clasificación para valores altos de radiación.

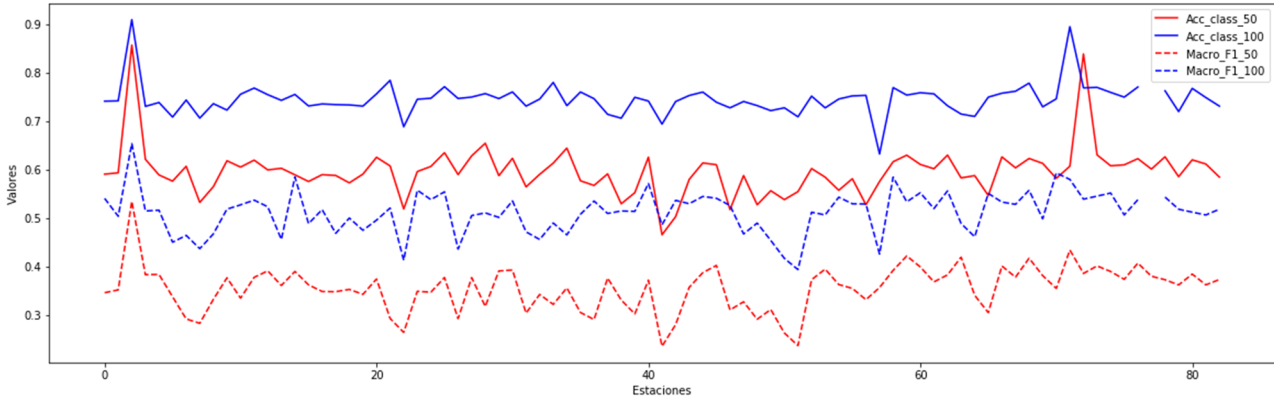


Figura 4: Comparación entre Aciertos y Macro-F1 en ambas tareas de clasificación.

## 6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se ha presentado un modelo de aprendizaje profundo para una tarea de clasificación supervisada, que combina una capa convolucional con una capa GRU. Los mejores resultados se han alcanzado para las clases de intervalos de 100  $\text{wm}^{-2}$ , aunque se observó mayor complejidad en la clasificación en los intervalos de mayor radiación, debido fundamentalmente a la baja representatividad de estas clases. La métrica Macro-F1 se ve afectada principalmente por la clasificación para valores altos de radiación.

Proyectamos evaluar modelos de regresión con el mismo juego de datos empleando fundamentalmente aproximaciones recurrentes y modelos de regresión propuestos en el estado del arte. Además, considerar la localización de las estaciones mediante el uso de sus coordenadas y su altitud, para realizar análisis de proximidad o que la red aprenda a identificar las similitudes entre estaciones relativas a las localizaciones con el fin último de estudiar la predicción por vecinos cercanos.

## Referencias

- AGUIAR, L. M., PEREIRA, B., LAURET, P., DÍAZ, F., and DAVID, M., 2016. Combining solar irradiance measurements, satellite-derived data and a numerical weather prediction model to improve intra-day solar forecasting. *Renewable Energy*, **97**, pp. 599-610.
- ASLAM, S., HERODOTOU, H., AYUB, N., and MOHSIN, S. M., 2019. Deep learning based techniques to enhance the performance of microgrids: a review. In *2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, pp. 116-1165. IEEE. DOI: 10.1109/FIT47737.2019.00031.
- AHMAD, T., ZHANG, H., and YAN, B., 2020. A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings. *Sustainable Cities and Society*, **55**, 102052.
- BABAR, B., LUPPINO, L. T., BOSTRÖM, T. and ANFINSEN, S. N., 2019. Random forest regression for improved mapping of solar irradiance at high latitudes. *Solar Energy*, **198**, pp. 81-92.
- CARRERA, B. and KIM, K., 2020. Comparison analysis of machine learning techniques for photovoltaic prediction using weather sensor data. *Sensors (Switzerland)*, **20**(11).
- GHIMIRE, S., DEO, R. C., RAJ, N. and MI, J., 2019. Deep Learning Neural Networks Trained with MODIS Satellite-Derived Predictors for Long-Term Global Solar Radiation Prediction. *Energies*, **12**(12).
- KIM, S. G., JUNG, J. Y. and SIM, M. K., 2019. A two-step approach to solar power generation prediction based on weather data using machine learning. *Sustain*, **11**(5).
- LOTFI, M., JAVADI, M., OSÓRIO, G. J., MONTEIRO, C., and CATALÃO, J. P., 2020. A novel ensemble algorithm for solar power forecasting based on kernel density estimation. *Energies*, **13**(1), 216.
- MELLIT, A., MASSI PAVAN, A., OGLIARI, E., LEVA, S., and LUGHI, V., 2020. Advanced methods for photovoltaic output power forecasting: A review. *Applied Sciences*, **10**(2), 487.



- BOE. 2021. BOE-A-2021-421 Resolución de 30 de diciembre de 2020, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula la declaración ambiental estratégica del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Available: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-421](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-421) [3/5, 2021].
- PEDRO, H. T. C., COIMBRA, C. F. M. and LAURET, P., 2019. Adaptive image features for intra-hour solar forecasts. *J. Renew. Sustain. Energy*, **11**(3), pp. 1-14.
- SHAMSHIRBAND, S., RABCZUK, T. and CHAU, K.-W., 2019. A Survey of Deep Learning Techniques: Application in Wind and Solar Energy Resources. *IEEE Access*, **7**, pp. 164650-164666.
- TAO, H., EWEEES, A. A., AL-SULTTANI, A. O., BEYAZTAS, U., HAMEED, M. M., SALIH, S. Q., ARMANUOS, A. M., AL-ANSARI, N., VOYANT, C., SHAHID, S., and YASEEN, Z. M., 2021. Global solar radiation prediction over North Dakota using air temperature: development of novel hybrid intelligence model. *Energy Reports*, **7**, pp. 136-157.
- YANG, D., WU, E. and KLEISSL, J., 2019. Operational solar forecasting for the real-time market. *Int. J. Forecast*, **35**(4), pp. 1499-1519.

## ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA PIEZOMETRÍA Y LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (ANDALUCÍA, ESPAÑA)

PIEZOMETRIC AND GROUND DEFORMATION RELATIONSHIP AT ALMONTE-MARISMAS AQUIFER (ANDALUCÍA, SPAIN)

Miguel González-Jiménez\*, Carolina Guardiola-Albert, Héctor Aguilera-Alonso, Marta Béjar-Pizarro, Gerardo Herrera, Pablo Ezquerro, Juan López-Vinielles, Natalia Fernández, Fernando Ruiz-Bermudo

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), C/ Alenza 1, 28003 Madrid, España. miguel.gonzalez@igme.es; c.guardiola@igme.es; h.aguilera@igme.es; m.bejar@igme.es; g.herrera@igme.es; p.ezquerro@igme.es; jlvinielles@gmail.com; n.fernandez@igme.es; f.ruiz@igme.es

### Abstract:

Groundwater is one of the most important hydric resources of the Spain territory. Nevertheless, heavy groundwater withdrawal generates severe consequences, being land subsidence one of them. The Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique have been recently exploited to detect and monitor aquifer related deformations. In the present work, relationship between piezometric levels drawdowns and land subsidence has been studied for the higher withdrawals areas within Almonte-Marismas aquifer system (which holds the Doñana Natural Space). Four datasets of radar satellite images, obtained from *Sentine-1* satellite, have been processed using the InSAR technique in the period 2014 - 2020. Results show that in some of these areas, like those surrounding El Rocío and Matalascañas villages, the correlation between these two variables is high.

**Key words:** remote sensing, geophysics, GIS, InSAR, hidrogeology, subsidence

### Resumen:

El agua subterránea es uno de los recursos hídricos más importantes en el territorio español. La gran cantidad de agua que se retira de ellos puede tener graves consecuencias, entre las que destaca, en algunos acuíferos, la subsidencia del terreno. La técnica de interferometría radar (InSAR), ha sido desarrollada en las últimas décadas para detectar y monitorear las deformaciones relacionadas con los acuíferos. En este trabajo se estudia la posible relación existente entre la variación de los niveles piezométricos y el movimiento del terreno en zonas con grandes extracciones del acuífero Almonte-Marismas (sobre el que se ubica el Espacio Natural de Doñana). Para ello, se han analizado los datos de deformación del terreno obtenidos del satélite *Sentine-1* en el periodo 2014-2020. Los resultados muestran que, en alguna de estas zonas, como las cercanas a las poblaciones de El Rocío y Matalascañas, la correlación entre ambas variables es alta.

**Palabras clave:** teledetección, geofísica, SIG, InSAR, hidrogeología, subsidencia

### 1. Introducción y objetivos

En las últimas tres décadas, la interferometría con radares de apertura sintética (InSAR) se ha convertido en una importante herramienta de sensor remoto para el estudio temporal y espacial de la deformación del terreno (Massonnet and Feigl 1998; Crosetto *et al.* 2016). Constituye un conjunto de técnicas eficaces y de bajo coste que permiten estudiar extensas zonas a partir de una alta cantidad de medidas (Tomás *et al.* 2014). Entre ellas, la técnica de los refractores persistentes (PSI) posibilita estudiar la evolución temporal de la deformación del terreno a partir de la comparación de múltiples imágenes procedentes de radares de apertura sintética (en inglés, SAR).

Una de las múltiples aplicaciones de las técnicas InSAR consiste en el estudio de las deformaciones del terreno

generadas por la extracción de agua subterránea. La disminución de la presión que experimentan los poros de la roca cuando el agua es extraída de ellos potencia la consolidación del terreno y, a consecuencia, puede provocar su subsidencia (Ezquerro *et al.* 2104). Los daños en las infraestructuras civiles son uno de los principales efectos asociados a este fenómeno (Tomás *et al.* 2005), por lo que la monitorización y el estudio de la deformación del terreno suponen medidas de prevención y mitigación de estos posibles daños (Terzaghi 1925; Ezquerro *et al.* 2014).

El análisis de la deformación del terreno respecto a las oscilaciones del nivel freático es objeto de estudio en muchas partes del mundo (Galloway *et al.* 1998; Ezquerro *et al.* 2014; Bozzano *et al.* 2015; Béjar-Pizarro *et al.* 2017; Herrera-García *et al.* 2021). El presente trabajo tiene la finalidad de desarrollar este tipo de

\* Corresponding Author: Miguel González-Jiménez, miguel.gonzalez@igme.es

estudios en la zona de Doñana, con el objetivo de analizar cómo las técnicas InSAR podrían mejorar la gestión del agua subterránea y prevenir los riesgos asociados a la subsidencia del terreno.

## 2. Zona de estudio

El acuífero de Almonte-Marismas alberga, en su parte meridional, el Espacio Natural de Doñana (END). El END presenta una extensión de 1030 km<sup>2</sup> (39% de la superficie del acuífero) y está constituido por un complejo de marismas y lagunas freáticas de gran valor ecológico (Fig. 1). Desde hace varias décadas las aguas subterráneas de Doñana sustentan la mayor parte de las actividades socioeconómicas de la zona, entre las que destacan principalmente la agricultura intensiva y el turismo.

Respecto al turismo, la mayor afluencia de turistas tiene lugar durante las vacaciones de verano e invierno, concentrándose los principales núcleos turísticos en las urbanizaciones de Matalascañas y Mazagón, en el borde suroccidental del acuífero. En el caso de Matalascañas, la alta proximidad (del orden de pocos kilómetros) del área de bombeo a varias lagunas temporales incluidas

dentro del END, genera un descenso continuado de los niveles freáticos, así como un fuerte impacto en su actividad ecológica (Serrano and Serrano 1996; Díaz-Paniagua and Aragonés 2015).

En cuanto a la agricultura intensiva, se trata de una práctica muy común realizada desde 1970 y generalizada en grandes zonas de la superficie del acuífero. Los principales tipos de cultivos son el arroz y los frutos rojos, aunque destacan en menor medida otros como los cítricos. La mayor parte de los arrozales se concentran en las inmediaciones de la localidad de Isla Mayor, situada al este del acuífero y sobre las arcillas de marismas; los cultivos de fresas se concentran en la cabecera de la cuenca del arroyo de La Rocina; mientras que los cítricos lo hacen en las cercanías de El Rocío y Los Hatos, al sur de Villamanrique de la Condesa (Custodio *et al.* 2009).

Estas actividades requieren de una alta cantidad de agua que, aunque en menor medida para el caso de los arrozales, es obtenida del acuífero de Almonte-Marismas (Custodio *et al.* 2009). Por esta razón, el estudio se ha focalizado en las zonas de Matalascañas, Isla Mayor, Los Hatos y El Rocío.

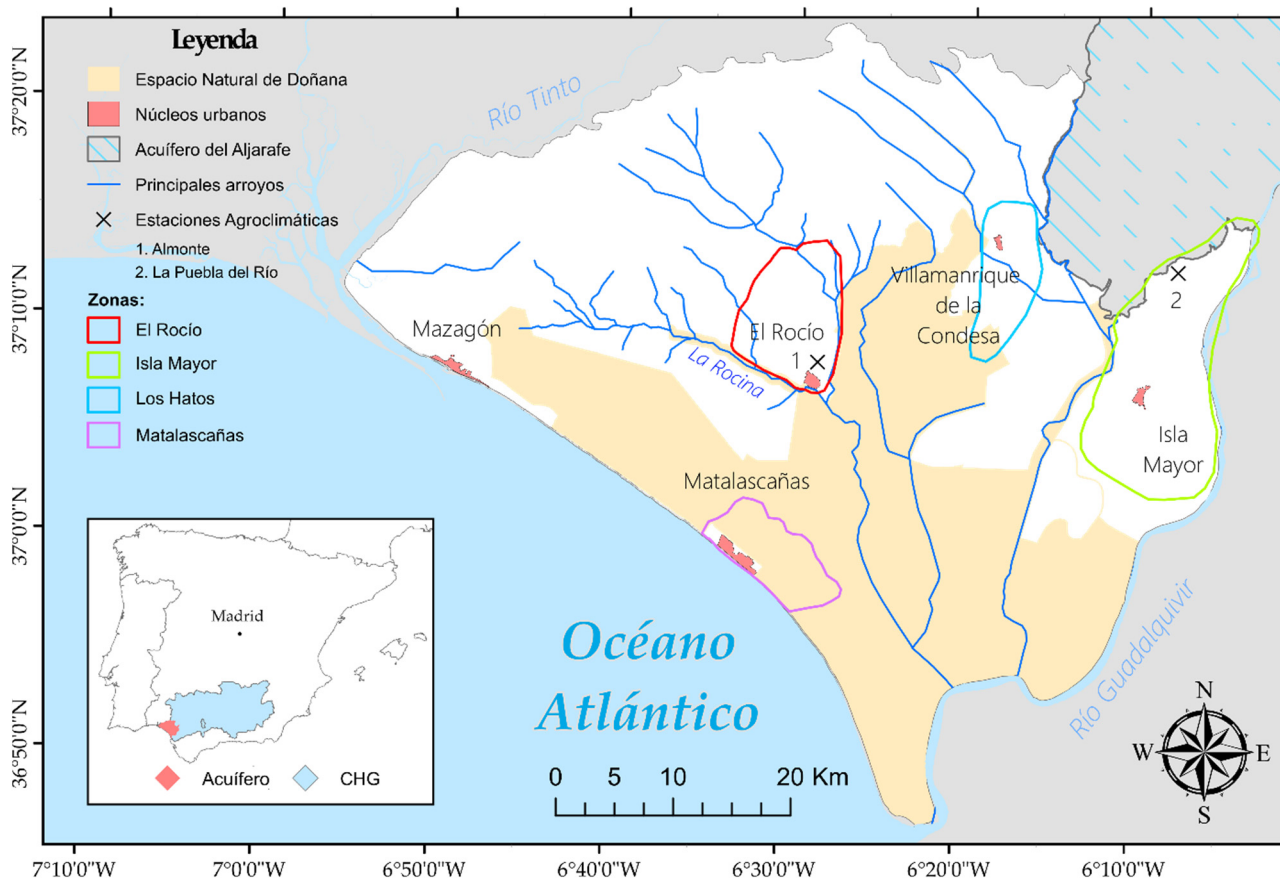


Figura 1: Situación del acuífero Almonte-Marismas y localización de las zonas de estudio, marcadas con polígonos en color.

El acuífero de Almonte-Marismas se encuentra localizado en el suroeste de la Península Ibérica, entre las provincias de Huelva y Sevilla. Pertenece a la cuenca baja del río Guadalquivir, quedando limitado por el río Tinto al oeste, el Guadalquivir al este y el océano Atlántico al sur y suroeste. Presenta una extensión aproximada de 2639 km<sup>2</sup> y una topografía suave, encontrándose los puntos más altos (150 msnm) en la

parte septentrional y los más bajos (próximos al nivel del mar) en la meridional.

La zona presenta un clima mediterráneo con influencia atlántica, caracterizado por inviernos húmedos y fríos y veranos secos y cálidos. La temperatura y precipitación media anual son de 19°C y 550-600 mm

respectivamente, presentando esta última una fuerte variación interanual (Manzano and Custodio 2007).

Desde el punto de vista geológico, el acuífero se encuadra en la parte suroccidental de la Depresión del Guadalquivir, quedando limitado por la meseta hercínica en el borde noroccidental y la Cordillera Bética en la arista suroriental. Se trata de un complejo sedimentario formado por arenas y gravas, con frecuentes intercalaciones de arcillas. El muro del sistema acuífero lo constituyen las margas azules del Mioceno Superior, con valores de permeabilidad hidráulica muy bajos.

A grandes rasgos, el sistema acuífero está formado por un acuífero detrítico y libre, y otro confinado bajo los materiales arcillosos y de baja conductividad hidráulica de la marisma. El espesor del acuífero libre aumenta de norte a sur, oscilando desde los 15 m hasta los 150 m en la zona de Matalascañas (Guardiola-Albert *et al.* 2010).

El agua subterránea fluye desde el noroeste hacia el sureste. La recarga media anual es de 200 hm<sup>3</sup>, y se produce de manera principal a través de la precipitación que tiene lugar durante la primavera y el otoño en aquellas zonas en las que afloran los materiales del acuífero libre (Manzano and Custodio 2007). En menor medida, se produce a partir de los excedentes de riego y de la transferencia lateral en la parte nororiental por parte del acuífero de Aljarafe. La descarga del acuífero se produce a través de la salida al mar y por medio del drenaje de los ríos y arroyos, así como por la evapotranspiración y los abundantes bombeos, constituyendo éstos últimos el principal proceso de descarga del acuífero (Manzano and Custodio 2007; Guardiola-Albert *et al.* 2010).

### 3. Datos utilizados

Para llevar a cabo el estudio se han recopilado, en primer lugar, datos para el periodo 2014-2020 de las dos principales variables de estudio: piezometría y movimiento del terreno. Se ha elegido este lapso temporal por la disponibilidad de los datos de deformación.

Los datos de deformación del terreno consisten en imágenes IW SLC (*Interferometric Wide Single Look Complex*) procedentes de las trayectorias ascendente (Track 147) y descendente (Track 154) del satélite *Sentinel-1*. Estas imágenes han sido procesadas a través de la técnica InSAR PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) y mediante la cadena de procesado PSBAS (*Parallel Small BAseline Subset*; Manunta *et al.* 2019), implementada en la plataforma GEP (*GeoHazards Exploitation Platform*) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

De cada una de las trayectorias se han obtenido dos conjuntos de datos para dos periodos de tiempo distintos. El primero abarca desde octubre de 2014 hasta enero de 2020, mientras que el segundo se extiende entre enero de 2017 y enero de 2020. Cada conjunto de datos consiste en una capa vectorial de entidades puntuales, siendo éstas las que se han utilizado en el análisis de la deformación del terreno (Fig. 2).

En cuanto a la información piezométrica, se han utilizado los piezómetros de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y los sensores del Instituto Geológico

y Minero de España (IGME), con un registro de medida mensual y diario, respectivamente (Fig. 3).

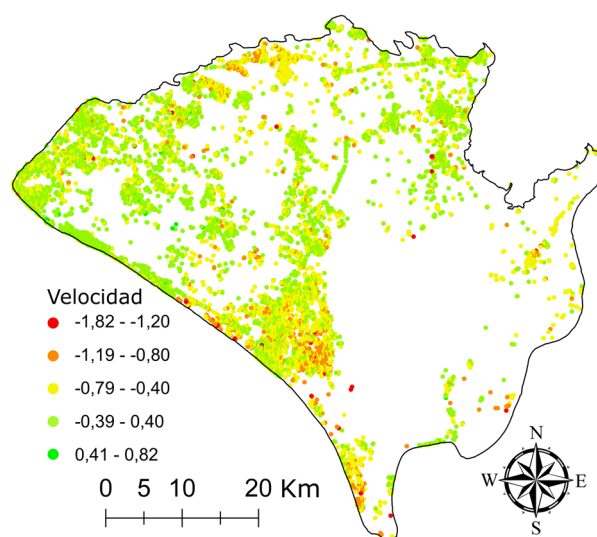


Figura 2: Visualización de todos los puntos SAR del *data-set* "Descending 2014-2020", representados según la velocidad (cm/año) del movimiento del terreno.

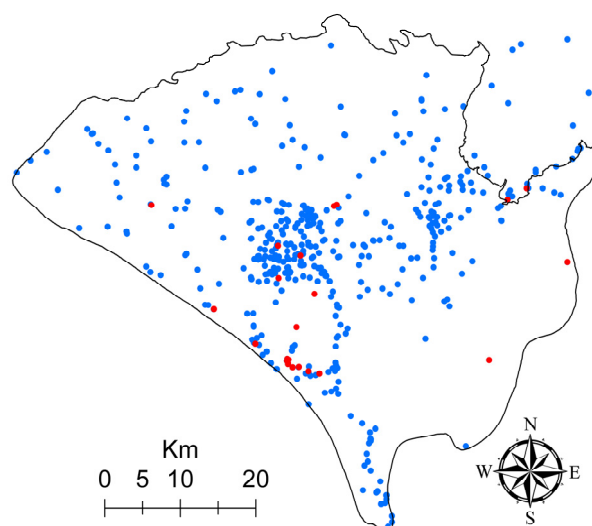


Figura 3: Ubicación de los piezómetros (azules) y sensores (rojos) disponibles en la zona de estudio.

Asimismo, en algunas zonas del área de estudio se han estudiado conjuntamente otras variables que pudieran explicar los resultados obtenidos. Éstas son: las series temporales de precipitación, evapotranspiración (ETP) y extracciones ocurridas en el entorno de Matalascañas. Los datos de extracciones consisten en el registro mensual para el periodo 2014-2020, con valores mensuales típicos generados en base al periodo 2007-2010, que es el lapso temporal con registro disponible para esta variable.

Los registros históricos de evapotranspiración y precipitación se han obtenido de las estaciones agroclimáticas de 'La Puebla del Río' (para el caso de Isla Mayor) y 'Almonte' (para la zona de Matalascañas), ambas pertenecientes a la Junta de Andalucía (Fig. 1). De la evapotranspiración se han representado tanto los valores originales como la curva de desviación estándar



acumulada (normalizada a valores entre 0 y 1), mientras que de la precipitación únicamente se ha representado la curva de desviación estándar acumulada.

#### 4. Metodología

El estudio de la deformación del terreno y su posible relación con la piezometría se ha realizado para cada una de las zonas definidas anteriormente (Fig. 1). Para un estudio más detallado, cada zona ha sido dividida, a su vez, en sub-zonas o agregados en función de la densidad de los puntos SAR. El análisis de la deformación del terreno y la representación gráfica de los resultados se ha realizado para cada agregado.

Este análisis se ha realizado por medio de dos *scripts* programados en Python, que permiten obtener el promedio de la deformación de cada agregado para cada uno de los conjuntos de datos disponibles, y representarlo gráficamente junto con la evolución de la piezometría de los puntos de agua incluidos en la zona en cuestión, así como otras variables de interés.

Los agregados se han generado mediante la herramienta *Aggregate Points*, del *software* ArcMap 10.7, a partir de la cual se han generado entidades poligonales que agrupan los puntos SAR más cercanos. Esta herramienta se ha ejecutado sobre la distribución de los puntos del *data-set* "Descending 2014 – 2020", por ser el que mayor cantidad y mejor distribuidos presenta los puntos. En el resto de *data-sets*, la geometría de estos agregados se ha modificado ligeramente con el objetivo de albergar el máximo número de puntos cercanos sin alterar la ubicación e identidad de cada uno de los polígonos.

Una vez constituidos los agregados, se ha procedido a la captura de los puntos incluidos en cada uno de ellos según la zona y el procesado al que pertenezcan. Sobre esta información, almacenada como archivos de texto (formato *csv* y *txt*), se han ejecutado los *scripts*.

#### 5. Resultados y discusión

Tras el análisis conjunto mediante Python de la piezometría y los datos de deformación del terreno se ha obtenido una imagen de cada uno de los agregados que conforman cada zona. Esta imagen está formada por dos gráficas: una superior y otra inferior. En la primera se encuentran representadas la evolución temporal de la deformación promedio del agregado para cada uno de los procesados con información disponible; mientras que en la segunda se muestra la evolución temporal del nivel freático de los puntos de agua incluidos en la zona de estudio, así como la evolución temporal de alguna variable climática de interés (Fig. 4).

Se considera que existe un posible movimiento vertical del terreno en aquellos agregados en los que, para un mismo momento temporal, la distancia al satélite en la línea de visión (*Line of Sight*; LOS) varía de manera congruente en ambas trayectorias (ascendente y descendente). Si se cumple este requisito, se podría producir subsidencia cuando la distancia al satélite aumenta respecto a la pasada anterior, y elevación cuando disminuye. Gráficamente esto queda reflejado a través de una correlación directa entre ambas curvas de deformación, tal y como ocurre en el caso de Isla Mayor (Fig. 4).

En general, las curvas de deformación promedio de los agregados de todas las zonas muestran una tendencia subsidente (Fig. 4). La máxima potencial subsidencia acumulada podría alcanzar valores entre 1 y 3,5 cm para el periodo de estudio 2014 – 2020, lo que se traduciría en una tasa de subsidencia anual inferior a 1 cm. La evolución temporal de la deformación del terreno presenta un comportamiento cíclico, oscilando los valores de cada periodo entre 0,5 y 1 cm. De la misma manera, la piezometría muestra un comportamiento cíclico según la tasa de recarga y las extracciones de agua del acuífero. El rango de oscilación de las variaciones piezométricas puede llegar a alcanzar los 6 m.

En la mayor parte de las zonas se observa cierta correlación entre las oscilaciones del nivel freático y la deformación del terreno (Fig. 4). En función de la zona, esta correlación presenta un desfase aproximado de entre 1 y 3 meses, ocurriendo siempre en primer lugar las variaciones en la piezometría, tal y como era de esperar. En las zonas de El Rocío e Isla Mayor, oscilaciones de 1 m del nivel freático generan movimientos verticales del terreno de aproximadamente 1 cm, mientras que en Los Hatos y Matalascañas, la respuesta del terreno a la variación piezométrica se encuentra mucho más atenuada. En estas dos últimas zonas, variaciones del nivel freático de entre 4 y 6 m inducen una deformación vertical en el terreno de tan solo 0,5 cm. Esta menor proporcionalidad observada entre la oscilación de la piezometría y la respuesta en la deformación del terreno se puede deber tanto a la profundidad de los niveles freáticos como a la distancia de los pozos de extracción (Ezquerro *et al.* 2014). También debe de influir el grado de confinamiento del acuífero, siendo éste mayor cuanto mayor sea la potencia de los niveles de arcilla, como ocurre en el caso de Isla Mayor o Los Hatos.

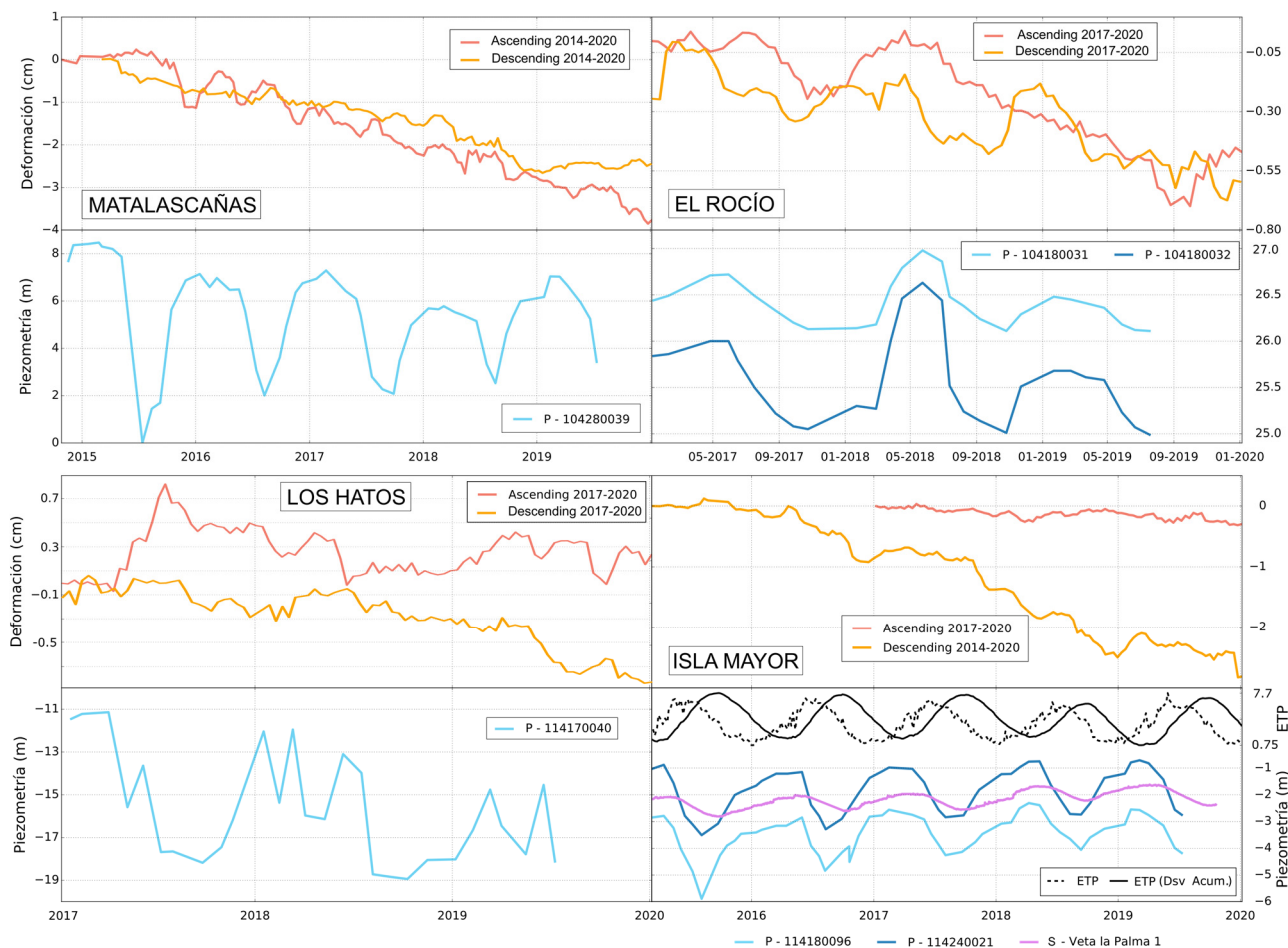
Durante el análisis de la zona de Isla Mayor se ha observado una relación muy interesante entre la piezometría y la ETP. La curva de la desviación estándar acumulada de la ETP presenta una correlación inversa anual (o un desfase de 6 meses) con respecto a la piezometría profunda de la zona. En relación con la serie original de ETP, este desfase es de 3 meses. En esta zona, el acuífero se encuentra confinado por una capa de arcillas de hasta 50 metros de potencia, por lo que resulta difícil que las oscilaciones del nivel freático se encuentren generadas por variaciones estacionales. En base al estudio de Van der Kamp y Maathuis (1991), podría considerarse que estas variaciones del nivel freático profundo son consecuencia de las fluctuaciones en la carga mecánica que ejerce la humedad sobre el acuífero (Van der Kamp and Schmidt 1997), aunque sería necesario realizar un análisis más exhaustivo de esta zona para poder establecer esta relación con seguridad.

La tendencia general observada en las señales del movimiento vertical del terreno podría indicar cierta componente inelástica para todas las zonas acuífero. El coeficiente de elasticidad de un acuífero depende de la naturaleza litológica del mismo, siendo este menor cuanto mayor sea la cantidad de materiales arcillosos y de baja permeabilidad que contenga. En acuíferos detríticos como el de la cuenca de Madrid (Ezquerro *et al.* 2014), el coeficiente de elasticidad es muy alto, lo que genera que las elevaciones y subsidencias provocadas por la recarga y descarga del acuífero respectivamente,

presenten una magnitud muy similar. Por esta razón y, según las conclusiones del trabajo de Ezquerro *et al.* (2014), la ligera proporcionalidad observada entre los ascensos y descensos del terreno en todas las zonas estudiadas del acuífero Almonte-Marismas, así como la constante tendencia decreciente de la señal InSAR, determina una naturaleza elasto-plástica para el mismo.

Aunque en las gráficas resultantes se observa la existencia de una correlación entre las variables del

estudio, se recomienda realizar un tratamiento estadístico de las mismas para corroborar las correlaciones observadas. Una de las técnicas más utilizadas para realizar este análisis es mediante las herramientas *Wavelet* (Grinsted *et al.* 2004; Tomás *et al.* 2016) que, a través del análisis en el dominio frecuencial y temporal de las series temporales, permiten identificar las periodicidades principales de las variables del estudio, así como las posibles correlaciones entre ellas.



**Figura 4:** Gráficas representativas de la relación existente entre la piezometría (curvas azules) y la deformación del terreno (curvas naranjas y rojas) para cada una de las zonas analizadas. En color negro se muestran los valores reales de evapotranspiración (ETP; línea discontinua) y la curva de la desviación acumulada de la evapotranspiración (Dsv. Acum.; línea continua) normalizada al intervalo 0-1.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la posible relación existente entre la piezometría y la deformación del terreno mediante técnicas InSAR y a través de la confección de dos *scripts* con Python y el uso de *softwares* de sistemas de información geográfica. Tras el análisis de un total de cuatro zonas (Isla Mayor, El Rocío, Los Hatos y Matalascañas) se alcanzan dos conclusiones. En primer lugar, toda la zona podría encontrarse sometida a una subsidencia constante y paulatina de aproximadamente 1 cm/año, que refleja la naturaleza elasto-plástica del acuífero. Y, en segundo lugar, todas las zonas muestran cierta correlación entre la deformación del terreno, obtenida de la señal InSAR, y la oscilación de la piezometría. Para estudiar en

profundidad esta correlación, convendría aplicar técnicas estadísticas, como podrían ser las herramientas *Wavelet*.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades subvencionadas dentro del Sistema Nacional de Garantía Juvenil (PEJ2018-002477), financiado por la Fundación Tripartita para la Formación en el Empleo, la iniciativa YEI (Youth Employment Initiative) y el Fondo Social Europeo (FSE).

Los datos Copernicus Sentinel-1 se obtuvieron y procesaron en la plataforma GEP de la ESA en el marco del *GEP Early Adopters Programme*.

Agradecemos al IGME y a la CHG por proporcionar los datos de piezometría, así como a la Junta de Andalucía por suministrar los datos meteorológicos.

## References

- BÉJAR-PIZARRO, M., EZQUERRO, P., HERRERA, G., TOMÁS, R., GUARDIOLA-ALBERT, C., HERNÁNDEZ, J. M. R., FERNÁNDEZ-MERODO, J.A., MARCHAMALO, M., and MARTÍNEZ, R., 2017. Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain. *Journal of Hydrology*, **547**, pp. 678-689. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.011
- BOZZANO, F., ESPOSITO, C., FRANCHI, S., MAZZANTI, P., PERISSIN, D., ROCCA, A., and ROMANO, E., 2015. Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. *Remote Sensing of Environment*, **168**, pp. 219-238. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.010
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., DEVANTHÉRY, N., and CRIPPA, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, pp. 78-89 DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
- CUSTODIO, E., MANZANO, M., and MONTES, C., 2009. *Las aguas subterráneas en Doñana: aspectos ecológicos y sociales*. Consejería de medio Ambiente. 249 pages
- DÍAZ-PANIAGUA, C., and ARAGONÉS, D., 2015. Permanent and temporary ponds in Doñana National Park (SW Spain) are threatened by desiccation. *Limnetica*, **34**, pp. 407-424. DOI: 10.23818/limn.34.31
- EZQUERRO, P., HERRERA, G., MARCHAMALO, M., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., and MARTÍNEZ, R., 2014. A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology*, **519**, pp. 1192-1204. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.040
- GALLOWAY, D. L., HUDNUT, K. W., INGEBRITSEN, S. E., PHILLIPS, S. P., PELTZER, G., ROGEZ, F., and ROSEN, P. A., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, **34**(10), pp. 2573-2585. DOI: 10.1029/98WR01285
- GRINSTED, A., MOORE, J. C., and JEVREJEVA, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes Geophys, European Geoscience Union (EGU)*. **11**(5/6), pp. 561-566.
- GUARDIOLA-ALBERT, C., GARCÍA-BRAVO, N., MEDIAVILLA, C., and MARTÍN-MACHUCA, M., 2010. Gestión de los recursos hídricos subterráneos en el entorno de Doñana con el apoyo del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas. *Boletín Geológico y Minero*, **120**(3), pp. 361-376.
- HERRERA-GARCÍA, G., EZQUERRO, P., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., LÓPEZ-VINIELLES, J., ROSSI, M., MATEOS, R.M., CARREÓN-FREYRE, D., LAMBERT, J., TEATINI, P., CABRAL-CANO, E., ERKENS, G., GALLOWAY, D., HUNG, WEI-CHIA, KAKAR, N., SNEED, M., TOSI, L., WANG, H., and YE, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, **371**(6524), pp. 34-36 DOI: 10.1126/science.abb8549
- MANUNTA, M., DE LUCA, C., ZINNO I., CASU, F., MANZO, M., BONANO, M., FUSCO, A., PEPE, A., ONORATO, G., BERARDINO, P., DE MARTINO, P., and LANARI, R., 2019. The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **57**(9), pp. 6259-6281.
- MANZANO, M., and CUSTODIO, E., 2007. Las aguas subterráneas en Doñana y su valor ecológico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, **15**(3), pp. 305-316.
- MASSONNET, D., and FEIGL, K., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of geophysics*, **36**, pp. 441-500. DOI: 0.1029/97RG03139
- SERRANO, L., and SERRANO L., 1996. Influence of groundwater exploitation for urban water supply on temporary ponds from the Donana National Park (SW Spain). *Journal of Environmental Management*, **46**(3), pp. 229-238. DOI: 10.1006/jema.1996.0018
- TERZAGHI, K., 1925. *Settlement and Consolidation of Clay*. McGraw-Hill, New York, pp. 874-878.
- TOMÁS, R., LI, Z., LOPEZ-SÁNCHEZ, J. M., LIU, P., and SINGLETON, A., 2016. Using wavelet tools to analyse seasonal variations from InSAR time-series data: a case study of the Huangtupo landslide. *Landslides*, **13**(3), pp. 437-450. DOI: 10.1007/s10346-015-0589-y
- TOMÁS, R., MÁRQUEZ, Y., LOPEZ-SÁNCHEZ, J. M., DELGADO, J., BLANCO, P., MALLORQUÍ, J. J., MARTÍNEZ, M., HERRERA, G., and MULAS, J., 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, **98**(2-3), pp. 269-283. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.003
- TOMÁS, R., ROMERO, R., MULAS, J., MARTURIÀ, J. J., MALLORQUÍ, J. J., LOPEZ-SANCHEZ, J. M., HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GONZÁLEZ, P.J., FERNÁNDEZ, J., DUQUE, S., CONCHA-DIMAS, A., COCKSLEY, G., CASTAÑEDA, C., CARRASCO, D., and BLANCO, P., 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground

subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental earth sciences*, **71**(1), pp. 163-181. DOI: 10.1007/s12665-013-2422-z

VAN DER KAMP, G., and MAATHUIS, H., 1991. Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture. *Journal of hydrology*, **127**, pp. 137-152. DOI: 10.1016/0022-1694(91)90112-U

VAN DER KAMP, G., and SCHMIDT, R., 1997. Monitoring of total soil moisture on a scale of hectares using groundwater piezometers. *Geophysical Research Letters*, **24**(6), pp. 719-722. DOI: 10.1029/97GL00521



## MEJORANDO LA CALIDAD DE LOS MAPAS DE DEFORMACIONES GENERADOS POR LA CADENA PSIG DEL CTTC: LA SUITE DE HERRAMIENTAS VETOOLS

### IMPROVING THE QUALITY OF DEFORMATION MAPS PRODUCED BY CTTC'S CHAIN: THE VETOOLS SUITE

José A. Navarro\*, Anna Barra, Oriol Monserrat, Michele Crosetto

Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Av. Carl Friedrich Gauss 7, 08860 Castelldefels, España.  
jose.navarro@cttc.es; anna.barra@cttc.es; oriol.monserrat@cttc.es; michele.crosetto@cttc.es

#### Abstract:

The PSIG software chain, which has been producing terrain displacement maps for one and a half decades now, has been entirely developed by the members of the Geomatics Division of the Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC). Despite its high degree of automation, PSIG offers its users a noticeable degree of flexibility, making possible to control the relevant set of parameters defining how the processes involved in the chain will behave. However, these parameters, which are applied uniformly to the whole area being processed, may not be the best ones when considering specific local, critical areas. Running the PSIG software chain to process each of these critical areas using tailored sets of parameters is the solution to obtain a product with a good overall quality. However, identifying these areas without an appropriate set of analysis tools may prove very complicated. The VETools, the subject of this work, are targeted at solving this problem. With the VETools it is possible to perform the aforesaid tasks, namely, identifying - visually - the areas that should be enhanced and then relaunch their reprocessing with new control parameters, having the possibility to assess (again, visually) the results and thus rejecting or accepting these until a set of satisfactory solutions are found to be merged afterwards in a unique product with the requested overall quality.

**Key words:** geoprocessing, graphical tools, ground deformation maps, DInSAR

#### Resumen:

La cadena PSIG, en producción desde hace ya una década y media, ha sido desarrollada desde sus inicios por el personal de la actual división de Geomática del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya. Dicha cadena goza de un altísimo grado de automatización, pero aún así es capaz de ofrecer a sus usuarios una gran flexibilidad, dando la posibilidad de definir aquellos parámetros clave que controlan los diferentes procesos de la cadena. No obstante, esos parámetros, los cuales se aplican uniformemente a la totalidad del área a procesar, pueden no ser los más apropiados cuando se tienen en cuenta ciertas zonas locales críticas. Para resolver este problema, sería suficiente con ejecutar la cadena PSIG circunscrita en esas zonas usando un conjunto de parámetros adecuados para ellas, pudiéndose así obtener finalmente un producto cuya calidad global sea la apropiada. No obstante, identificar dichas áreas puede ser muy complicado sin las herramientas de análisis apropiadas. Esta es la tarea de las VETools, las cuales son el objeto de este artículo: con ellas es posible identificar, visualmente, dichas áreas, lanzar su re-procesado mediante la cadena PSIG tantas veces como sea necesario usando parámetros a medida, rechazando o aceptando los resultados así obtenidos (también visualmente) hasta llegar a un conjunto de soluciones que puedan integrarse en una sola y que goce de la calidad global perseguida.

**Palabras clave:** geoprocesado, herramientas gráficas, mapas de deformación del terreno, DInSAR

### 1. Introducción

Hace ya más de quince años que la actual división de Geomática del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) comenzó el desarrollo de la conocida como cadena PSIG, concebida para generar mapas de deformaciones del terreno basándose en la técnica DinSAR, esto es, "Differential Interferometry" usando imágenes radar de apertura sintética (SAR). Véase (Devanthy *et al.* 2014) para más información.

Esta cadena software ha alcanzado en la actualidad un gran nivel de madurez, siendo por tanto utilizada en numerosos y variados proyectos. Con el paso del tiempo,

no solamente se ha conseguido mejorarla para que sea posible utilizarla en diversos tipos de aplicaciones, sino que también ha alcanzado un elevado grado de automatización, eliminando así en lo posible la interacción con los usuarios, reduciendo así el volumen de errores que pudieran cometerse y al mismo tiempo aumentando su productividad. Es importante comentar que, a pesar de dicho grado de automatización, PSIG ofrece a sus usuarios la posibilidad de decidir el conjunto de parámetros que controlan el comportamiento de todos y cada uno de los componentes (aplicaciones) que integran dicha cadena.

\* Corresponding Author: José A. Navarro, jose.navarro@cttc.es

Para complementar la cadena, e incluso acercarla a grupos de usuarios con un nivel de experiencia menor, dentro de la división de Geomática se están llevando a cabo desarrollos adicionales, tales como la identificación de “Active Deformation Areas” (ADA), esto es, “áreas de deformación activa” – véase por ejemplo (Barra *et al.* 2017; Tomás *et al.* 2019; Navarro *et al.* 2020) – o la generación de mosaicos de imágenes para datos de coherencia, amplitud o interferogramas (des)enrollados que permitan una visualización y análisis de la situación con mayor eficacia que en la actualidad. Otro trabajo muy importante, todavía en desarrollo, pero muy próximo a su finalización, es el de las VETools, las cuales son el objeto de este artículo, siendo descritas en cierto detalle en la Sección 2.

Con el objetivo de justificar la necesidad de las VETools y para ubicar al lector en el debido contexto, a continuación, se describirán brevemente y de forma muy general los diferentes pasos que ejecuta la cadena PSIG para generar un mapa de deformaciones del terreno – el cual consiste en la velocidad con la cual se mueve un conjunto de puntos con características de retrodispersión estables y sus correspondientes series temporales de deformación.

Las entradas para dicho proceso son (1) un conjunto de  $n$  imágenes SAR corregistradas (2) la dispersión de amplitud y (3) un conjunto de  $m$  ( $m > n$ ) interferogramas enrollados.

Así pues, a *grosso modo*, los diferentes pasos que se ejecutan son los que se indican a continuación. Para más detalles, se remite al lector a (Biescas *et al.* 2007) y (Devanthery *et al.* 2014).

- **Paso 1:** selección de puntos. Se seleccionan aquellos puntos que garantizan una buena calidad de las fases de entrada en el conjunto de interferogramas.
- **Paso 2:** Cálculo de aristas entre píxeles. Los diferentes píxeles se conectan entre sí por medio de aristas, y para cada una de ellas, la diferencia de fase se calcula para cada interferograma enrollado. La velocidad lineal anual (modelo lineal) y el error topográfico para cada arista se obtienen en base a las diferencias de fase calculadas (observaciones): véase (Biescas *et al.* 2007). La bondad (calidad) del ajuste de estos datos así obtenidos se representa por medio del conocido como factor gamma ( $\gamma$ ).
- **Paso 3:** reordenación. Para estimar la velocidad se selecciona un determinado conjunto de aristas. Para ello se usa como criterio los factores gamma de las aristas en cuestión, así como y un valor umbral que se emplea como referencia para aceptarlas o rechazarlas. La selección del valor umbral puede ser problemática, ya que en función de éste se eliminarán ciertas aristas y algunos puntos podrían quedar desconectados de otros, de manera que no aparecerían en el mapa final de velocidades. Estos grupos de puntos no conectados conducen a la imposibilidad de obtener una solución única.
- **Paso 4:** integración. Como el nombre de este paso indica, aquí se trata de obtener la velocidad de todos y cada uno de los puntos integrando las velocidades diferenciales asociadas a cada una de las aristas en las que está involucrado. El mismo tipo de proceso

se efectúa para obtener el error topográfico. Téngase en cuenta que esto solamente se puede llevar a cabo con grupos de puntos conectados entre sí. Tal y como se decía en el paso 3, si existen varios grupos inconexos entre ellos, no es posible obtener una solución única, con lo cual serán necesarios tantos pasos de integración como grupos de este tipo existan.

Para cada uno de los pasos anteriores, el usuario experto puede seleccionar los parámetros que los controlan; hay que tener en cuenta, no obstante, que dicha selección tendrá una influencia directa en el resultado final, en aspectos tales como la calidad de la estimación de la velocidad (fiabilidad o nivel de ruido), cobertura y densidad de los puntos medidos y, tal y como acaba de comentarse, la conexión entre diversos grupos de puntos y por tanto la posibilidad de obtener una única solución.

La selección de dichos parámetros no es sencilla en absoluto, debido a que la zona a procesar es habitualmente muy amplia y de características muy variadas. Esto hace que escoger un único conjunto de parámetros para procesarla pueda conducir a una solución de calidad inferior a la buscada. Es, por tanto, deseable, poder escoger diferentes conjuntos de parámetros que se ajusten lo mejor posible a aquellas zonas locales del área de interés donde el procesado tendría que realizarse de una forma diferente a la global. Así pues, la obtención del producto final consistiría en la integración tanto del procesado inicial como el de los diferentes procesados de áreas locales críticas que lo precisaran para, finalmente, obtener una solución única.

El gran problema es la identificación de dichas áreas. Y aquí es donde entran en juego las VETools, el conjunto de herramientas de análisis y re-procesado que se discute en este artículo.

La idea de las VETools es, precisamente, facilitar la identificación de las áreas críticas que precisan de un tratamiento diferente, por medio de la visualización de los resultados (velocidad, error topográfico, grupos, aristas existentes, etc.) obtenidos en primera instancia, haciendo posible su re-procesado (integrado como parte de la aplicación para una mayor ergonomía) de acuerdo con un conjunto de parámetros seleccionados a medida para dichas zonas.

La Sección 2 describe a continuación las VETools en detalle.

## 2. La suite de herramientas “VETools”

La suite de herramientas adopta su nombre de los elementos con los que trata, vértices y aristas – en inglés, “Vertices (V)” y “Edges (E)”, esto es, “Vertex & Edge Tools” o VETools.

Tal y como se ha descrito en la sección anterior, el objetivo de dicha suite es el de permitir a los usuarios de PSIG analizar visualmente qué zonas de una determinada área de interés necesitarían ser re-procesadas con un conjunto de parámetros diferente del global para obtener así una solución de mayor calidad.

En *strictu sensu*, solamente una de las dos herramientas que constituyen las VETools, la conocida como VEGrapher, permite llevar a cabo lo que se acaba de enunciar; no obstante, y como se describe a

continuación, el uso del otro componente de la suite, VEReady, es del todo imprescindible. No obstante, y antes de proceder a dicha descripción, se ofrece un resumen muy sintético del flujo de trabajo que hay que respetar para el correcto funcionamiento de dichas herramientas.

El flujo en cuestión es el siguiente:

- *Paso 1:* el área de interés se procesa globalmente utilizando un conjunto de parámetros único por medio de la cadena PSIG. Esto genera una serie de archivos de salida.
- *Paso 2:* la herramienta VEReady entra entonces en juego, no para facilitar al usuario el análisis de los datos, sino por el contrario para reorganizar estos de manera que la segunda herramienta, VEGrapher, pueda funcionar de forma correcta. La Sección 2.1 explica en qué consiste esta reorganización; baste aquí decir que (1) VEReady no precisa de ningún tipo de intervención humana, ya que es una herramienta totalmente automatizada y (2) que su papel es crucial para el correcto desempeño de VEGrapher.
- *Paso 3:* en este punto ya puede ser usada VEGrapher, la segunda herramienta, para analizar los resultados del paso 1, identificándose las zonas problemáticas, lanzando su re-procesado con parámetros específicos tantas veces como sea necesario; y todo ello, asistiendo al usuario con las herramientas de visualización que permitan realizar este trabajo.
- *Paso 4:* finalmente, VEGrapher procederá a la combinación del procesado inicial más tantos re-procesados locales como se hayan efectuado para lanzar la cadena PSIG de manera que se obtenga una solución única con un nivel de calidad suficiente para la totalidad del área de interés.

## 2.1. VEReady

El nombre de esta herramienta, “VEReady”, es un juego de palabras fonético en inglés, ya que intenta sonar como “Be ready” o “preparate”, dando a entender que su tarea es la de preparar los datos para un ulterior uso eficiente por parte de VEGrapher.

Como se ha comentado en el flujo de trabajo descrito en la sección anterior, este es precisamente su objetivo: transformar la información generada por la cadena PSIG para hacer posible la tarea de su compañera, VEGrapher. Esto es así porque la salida de la cadena PSIG puede incluir millones de puntos y muchísimas más aristas. Si esta información no se organiza de manera que pueda ser accedida rápidamente, entonces la tarea de VEGrapher deviene imposible.

En resumen, VEReady no es más que una herramienta que cambia el formato de los datos. Esto es cierto, pero dicho cambio de formato ha de organizar la información de una manera que haga que su uso por VEGrapher no sea solamente posible, sino que requiera el mínimo tiempo para ser accedida.

A continuación, se detallan las entradas de VEReady, las cuales son, como ya se ha indicado, la salida de la primera ejecución de la cadena PSIG:

- Aristas, constando para cada una de ellas, de la fila y columna (del píxel) tanto del origen como del destino de ésta, así como de los identificadores de los dos puntos (píxeles) involucrados, juntamente con los parámetros asociados a ella, a saber: velocidad, error topográfico y el factor gamma ( $\gamma$ ) cuantificando su calidad.
- Atributos para los puntos, es decir, su velocidad, error topográfico y grupo al cual pertenecen.
- Imagen de fondo. La imagen SAR original convertida a cualquier formato visualizable (como, por ejemplo, JPG) para mejorar la visualización de los puntos y las aristas y ayudar a la comprensión de la situación analizada.

Todas estas entradas vienen en forma ya sea de archivos de texto plano o binarios, pero sin ningún tipo de estructura que permita su acceso aleatorio eficaz, por ejemplo, a partir del identificador de un punto o una arista.

Una vez ejecutado, VEReady reorganiza dicha información produciendo las siguientes salidas:

- Un índice espacial para los puntos. Es importante empezar diciendo que este índice es crucial para el funcionamiento de VEGrapher, ya que, sin él, su operativa no sería posible. Un índice espacial es una estructura de datos que asocia coordenadas (las de un punto, por ejemplo) con un cierto conjunto de atributos (como, en este caso, su velocidad, error topográfico o grupo). Dicha estructura es capaz de responder de forma muy eficiente gracias su especial organización, a preguntas tales como: “¿cuáles son los elementos (puntos) que caen dentro de un determinado rectángulo?”. La capacidad de responder rápidamente a esta pregunta es la piedra angular en que se basa la política de visualización de VEGrapher, como podrá verse en la Sección 3.2.1.
- Si el índice anterior se ocupa solamente de los puntos y sus atributos, un nuevo archivo de salida gestiona los datos relativos a las aristas. El formato de dicho archivo es binario, y es accesible aleatoriamente de forma muy sencilla y rápida a través del identificador de la arista que se desea consultar – identificador, por cierto, generado por VEReady para este propósito.
- Para relacionar los puntos con las aristas, es necesaria una base de datos tal que, dado el identificador de un punto cualquiera, permita recuperar la lista de identificadores de las aristas que en dicho punto se originan. Así pues, una vez que el usuario selecciona un punto para su análisis, es posible saber de forma prácticamente inmediata cuales son las aristas que de él dependen.
- Finalmente, la imagen de fondo se fragmenta en teselas para hacer posible la visualización de escenas arbitrariamente grandes. Esto se hace así para evitar que las imágenes de fondo correspondientes a áreas de interés extremadamente grandes sean, asimismo, muy grandes, de manera que puedan llegar a plantear un problema de visualización a VEGrapher. La Sección 3.2.2 describe con más detalle en qué consiste esta técnica.

Es conveniente hacer notar que tanto el índice espacial como la base de datos relacionando puntos con aristas son capaces de soportar cantidades arbitrariamente grandes de datos, posibilitándose así el trabajo con volúmenes de estos que, de otra manera, serían inmanejables – véase nuevamente la Sección 3.2.1 para más información. Asimismo, su velocidad de desempeño permite tiempos de respuesta razonables al gestionar este tipo de datos en VEGrapher. El índice espacial se ha implementado por medio de la librería libspatialindex (Hadjieleftheriou 2019) y la base de datos de puntos a aristas por medio de la librería levelDB (LevelDB development team 2021).

### 3. VEGrapher

VEGrapher es la herramienta gráfica que permite el análisis de los resultados obtenidos por medio de la ejecución de la cadena PSIG, así como el re-procesado de las ya comentadas áreas críticas que necesiten ser corregidas según el criterio del especialista. Como ya se ha comentado en varias ocasiones, VEGrapher se apoya en la reorganización de los citados resultados realizada por VEReady para realizar esta tarea.

El flujo de trabajo es el siguiente: el usuario revisa las áreas que puedan resultar problemáticas. Cuando identifica una o más de ellas puede lanzar la cadena PSIG directamente desde VEGrapher (mejorándose así la ergonomía de la aplicación) especificando el conjunto de parámetros que, a su juicio, se ajusta mejor a las necesidades de la zona. Hay que notar que este re-procesado se produce dentro de los límites de la zona en cuestión. El re-procesado, no obstante, no es definitivo, ya que el usuario tiene la oportunidad de revisar los resultados y dar su visto bueno o no en función del análisis que realice una vez que dicho re-procesado acabe. Asimismo, no hay límite en cuanto al número de zonas a tratar; pueden ser tantas como se considere necesario. Una vez que se considere que ya se han corregido las zonas locales necesarias, se puede iniciar desde el propio VEGrapher un proceso de fusión de todos los conjuntos de datos (los resultados originales más los relativos a las áreas identificadas como problemáticas) para que estos sean, finalmente, procesados de nuevo por la cadena PSIG obteniéndose así un producto final.

Una herramienta como esta, que ha de manejar enormes cantidades de datos, se enfrenta a una serie de desafíos de diseño e implementación importantes; por ello, y como primera medida, las VETools en su totalidad se han desarrollado en C++, ya que este lenguaje permite crear aplicaciones mucho más eficientes que cuando se emplean otros. La calidad de la interfaz gráfica (ergonomía, velocidad) también es de suma importancia: por ello, se ha utilizado la “Qt framework” (The Qt company 2020) debido a las prestaciones que este marco ofrece.

No obstante, la simple elección de un lenguaje de programación es insuficiente para garantizar el conjunto de funcionalidades necesarias, ni tampoco basta para hacer frente a los diversos desafíos que tales aplicaciones plantean. Ejemplos de tales desafíos son el manejo de ingentes cantidades de datos de forma eficaz, no ralentizando los tiempos de respuesta para no degradar la experiencia del usuario o, por otro lado, el tener que embeber una instancia de la cadena PSIG para

llevar a cabo el re-procesado de las zonas que así lo requieren, facilitando así que el usuario no tenga que trabajar a caballo de múltiples entornos de trabajo.

Las secciones a continuación se extienden en la descripción estas funcionalidades y desafíos.

#### 3.1. Las funcionalidades

En esta sección se describe el subconjunto de funcionalidades más relevante de VEGrapher con el objetivo de permitir al lector hacerse una idea de cuáles son las capacidades de esta herramienta.

##### 3.1.1. Coloreado de puntos según varios criterios

Ésta es la primera gran herramienta a disposición del usuario para ayudarle en su trabajo de análisis. Como se ha comentado anteriormente, los puntos están caracterizados por una serie de atributos, a saber: velocidad, error topográfico y grupo al cual pertenecen.

Poder distinguir esos puntos en función de esos atributos es posible en VEGrapher mediante un coloreado específico. Es decir, es posible distinguir mediante diferentes colores qué valores de dichos atributos definen cada uno de los puntos. Que se utilice el coloreado por uno u otro atributo dependerá del objetivo que en cada momento persiga el analista.

Además, los colores a emplear son definibles por el propio usuario mediante un editor de tablas de colores incluido en la propia aplicación; con este editor, es posible seleccionar, por ejemplo, qué color emplear ya sea para los diferentes intervalos de velocidad o de error topográfico, o para los diferentes grupos de puntos que integran el conjunto de datos. Dichas tablas de colores pueden ser guardadas como archivos externos y ser reutilizadas cuantas veces sea necesario.

Asimismo, y en función de cada proyecto, es posible utilizar diferentes tablas de color, para así mejor adaptarse a la variación en cuanto a los rangos de datos en cada uno de ellos.

Finalmente, es posible alternar entre los diferentes modos de coloración (velocidad, error topográfico, grupo y coloración por defecto no basada en atributos) cada vez que así se desee, para observar los datos de acuerdo con los diferentes criterios existentes. Cada modo de coloración puede emplear su propia tabla de colores.

La Figura 1 muestra una zona (con una densidad de puntos altísima) que se ha coloreado de acuerdo con el criterio de velocidad. Pueden apreciarse hasta tres grupos distintos (azul claro, verde, naranja). Las aristas en azul oscuro que aparecen en esta figura se comentarán en la sección siguiente.

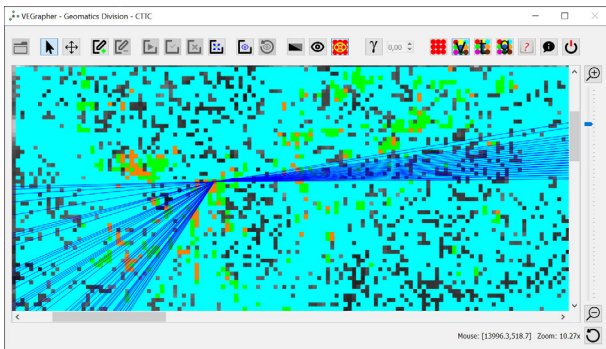
##### 3.1.2. Selección y filtrado de aristas en tiempo real

Por defecto VEGrapher no muestra las aristas que conectan los puntos entre sí, ya que el número de estas haría del todo incomprensible el conjunto de datos mostrados. Hay que tener en cuenta que, si los puntos pueden llegar a ser millones, las aristas multiplican dicho número notablemente.

Por esta razón, dichas aristas solamente se muestran cuando el usuario selecciona, haciendo clic sobre ellos, alguno de los puntos mostrados en pantalla. La Figura 1



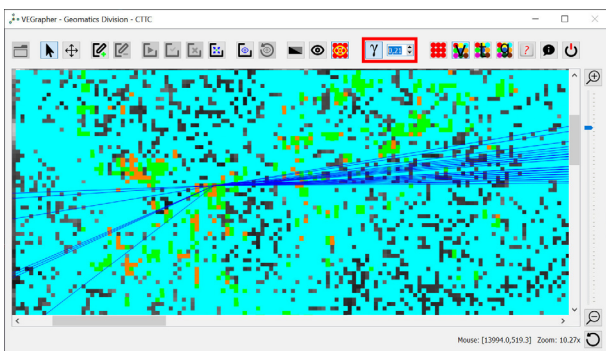
muestra esta situación. Por medio de esta opción el usuario puede comprobar cual es la conectividad del punto seleccionado.



**Figura 1:** Los puntos están coloreados según el atributo de velocidad. Se muestran las aristas que se originan en el punto seleccionado.

Ya se había avanzado, además, que cada arista está etiquetada con el parámetro que mide la calidad de la conexión que representa, es decir, gamma. Dicho parámetro puede oscilar entre cero y uno, siendo el cero el valor correspondiente a la peor calidad posible y uno el asignado a la máxima. VEGrapher permite discriminar qué aristas mostrar modificando de forma interactiva y en tiempo real el valor umbral para el parámetro gamma; cambiando este umbral se mostrarán en pantalla solamente aquellas aristas cuyo valor de gamma sea igual o superior al de dicho umbral. Esto permite observar qué conexiones alcanzan un nivel determinado de calidad, siendo así posible evaluar dichas conexiones.

La Figura 2 muestra exactamente la misma zona y el mismo punto que la Figura 1. No obstante, en esta última figura se ha seleccionado un valor de gamma de 0,21. Esa es la razón por la cual el número de aristas ha disminuido ostensiblemente, como puede comprobarse comprobando ambas ilustraciones. Nótese que el umbral para filtrar según el parámetro gamma está recuadrado en rojo en la Figura 2, estando este ubicado en la barra de herramientas principal de la aplicación.



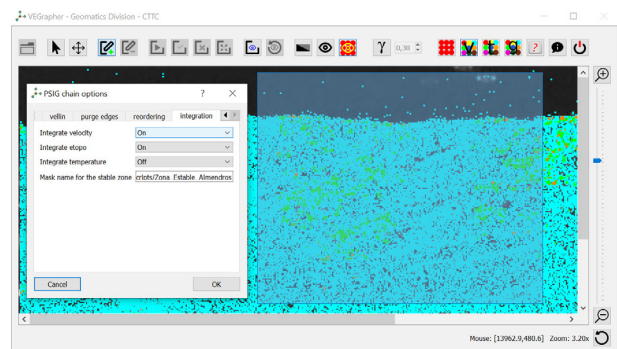
**Figura 2:** Se ha reducido el número de aristas visibles por medio del umbral del parámetro gamma.

### 3.1.3. Re-procesado local de áreas críticas

La identificación de problemas en determinadas zonas del área de interés es solamente una parte del trabajo que el analista realiza con VEGrapher, ya que el resultado de esta actividad puede llevar a la necesidad de volver a procesar localmente algunas zonas dentro del área de interés.

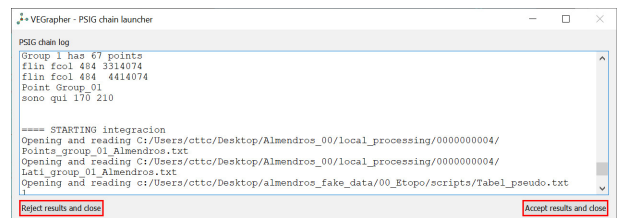
VEGrapher incluye la posibilidad de realizar este re-procesado sin abandonar la propia aplicación, ya que con ella se ha embebido una copia de la cadena PSIG. Desde el punto de vista ergonómico esto es muy conveniente, ya que (1) no es necesario cambiar de entorno de trabajo mientras se realiza todo este proceso y (2) los resultados del re-procesado local pueden ser, a su vez, analizados inmediatamente dentro de VEGrapher una vez que los cálculos han finalizado.

Así pues, y una vez que el usuario ha identificado que hay que re-procesar una determinada zona, éste solamente tiene cambiar el modo de trabajo de la aplicación a “re-procesado” por medio de un botón provisto a tal efecto en la barra de herramientas de VEGrapher; inmediatamente podrá seleccionar el área afectada dibujando un rectángulo que la recubra con el cursor (véase la parte derecha de la Figura 3). Inmediatamente aparecerá una ventana incluyendo diferentes pestañas, una para cada una de las aplicaciones involucradas en la cadena PSIG (véase otra vez la Figura 3, esta vez en su parte izquierda). Es en estas pestañas donde el usuario puede modificar los valores ofrecidos por defecto de los parámetros que controlan el comportamiento de dichas aplicaciones. Una vez que se haya cumplimentado este paso es posible poner en marcha la cadena PSIG pulsando un solo botón.



**Figura 3:** Re-procesando localmente un área identificada como problemática.

La acción anterior hace que aparezca una nueva ventana donde se muestra el registro (“log”) de las diferentes aplicaciones que, sucesivamente se ejecutarán hasta, finalmente, completarse el re-procesado; esto queda ilustrado en la Figura 4.

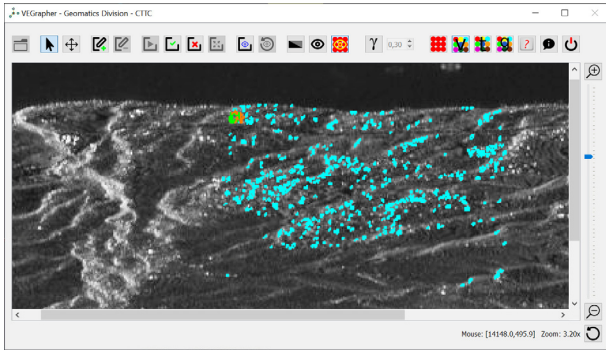


**Figura 4:** El registro de la ejecución de la cadena PSIG. Ya posible rechazar o aceptar preliminarmente los resultados del proceso.

Por medio del estudio de este registro el analista ya puede tomar una decisión preliminar sobre si los resultados de dicho re-procesado son satisfactorios o no; caso de no estar conforme con ellos, puede rechazarlos pulsando sobre el botón provisto a tal efecto (recuadrado en rojo en la parte inferior izquierda de la Figura 4). Si por

el contrario considera que dichos resultados son, aparentemente correctos, puede aceptarlos preliminarmente pulsando el otro botón disponible (también recuadrado en rojo, esta vez en la parte inferior derecha de la misma figura).

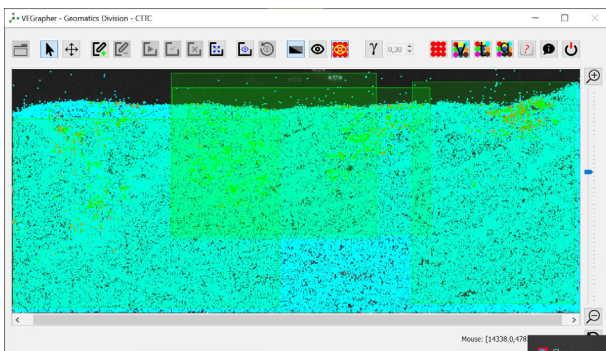
En el supuesto de que se acepten preliminarmente los resultados, VEGrapher mostrará los puntos afectados que pertenecen, exclusivamente, a la zona que se acaba de re-procesar, tal y como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5:** Visualización exclusiva de un re-procesado local de un área crítica.

En este punto, el analista puede aplicar de nuevo las técnicas ya descritas (coloreado de puntos, filtración de aristas por gamma) para decidir si dichos resultados le satisfacen de forma definitiva. Caso de ser así, y pulsando el botón adecuado en la barra de herramientas superior, puede aceptar dichos resultados, los cuales se guardarán para un proceso ulterior de integración. Si por el contrario decide rechazarlos, estos se eliminan, restituyéndose la situación anterior.

Para facilitar el control sobre qué se ha re-procesado y qué no, VEGrapher muestra las áreas que ya han pasado por este paso resaltándolas por medio de rectángulos semitransparentes de color verde pálido que actúan como marcadores, tal y como puede comprobarse en la Figura 6. Caso de que molesten, el usuario puede activar o desactivar la visualización de dichos marcadores a voluntad.

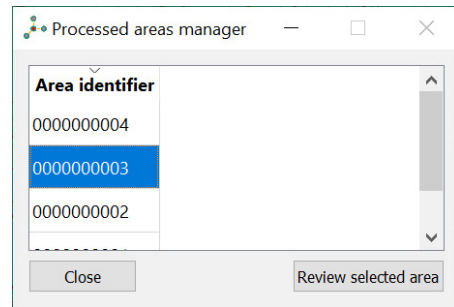


**Figura 6:** Los marcadores semitransparentes resaltan las áreas críticas que ya se han re-procesado localmente.

Pueden re-procesarse localmente tantas áreas críticas como sea necesario hasta que se considere que no son necesarias más mejoras.

Nótese que VEGrapher incluso ofrece la posibilidad de revisar un re-procesado previamente aceptado por el analista, aumentándose así no solo la flexibilidad de la

herramienta sino también reduciéndose la incertidumbre de dicha persona, ya que incluso habiendo dado por bueno un re-procesado, es posible revisarlo si se considera necesario. A tal efecto, VEGrapher ofrece la herramienta de revisita; pulsando el correspondiente botón en la barra de herramientas aparece un diálogo que muestra las diferentes zonas ya trabajadas para que puedan ser seleccionadas y, si se desea, volver a lanzar un nuevo re-procesado. Dicho diálogo se muestra en la Figura 7.



**Figura 7:** El diálogo que permite visitar e incluso re-procesar las áreas críticas ya procesadas anteriormente.

Una vez que éste se ha lanzado, el mecanismo funciona de forma idéntica al re-procesado ya descrito; si éste se acepta, se eliminan los resultados anteriores substituyéndose estos por los nuevos, pero si por el contrario se aceptan, lo que sucede es que se eliminan los resultados anteriores conservándose los últimos.

### 3.1.4. Preparando el resultado final: armonización y fusión de datos

Para obtener un resultado final cuya calidad sea la buscada, falta todavía ejecutar una vez más la cadena PSIG con todos los conjuntos de datos disponibles; esto incluye tanto el procesado global original como aquellos relativos a las diferentes zonas críticas identificadas y re-procesadas tal y como se ha descrito.

VEGrapher, a pesar de que podría ocuparse de ello, no asume dicho paso final, ya que, al tratarse de un procesado global, éste consumirá mucho tiempo y recursos; por el contrario, este paso se hará externamente con la cadena PSIG.

No obstante, y antes de poder proceder así, es necesario realizar una fusión de todos los datos disponibles hasta el momento, armonizando estos.

¿En qué consiste dicha armonización? Un ejemplo sería la necesidad de unificar los identificadores de las aristas; éstas pueden aparecer múltiples veces, ya sea en el procesado global o en uno o más de los re-procesados locales. Hay que re-codificar dichos identificadores de manera que la misma arista, aparezca donde aparezca, sea siempre etiquetada con el mismo identificador para evitar errores. Y si aparecen aristas nuevas, sus identificadores no deben entrar en conflicto con los ya existentes. Continuando con las aristas, otro ejemplo sería que cuando aparecen varias instancias de la misma arista, tal y como se comenta en el ejemplo anterior, es preciso conservar solamente aquella cuyo valor del parámetro gamma sea mejor.

La armonización es un proceso muy sencillo de ejecutar en VEGrapher; eso sí: para que esté disponible, es

necesario que al menos se haya re-procesado localmente un área crítica – ya que, de no ser así, no existiría nada que armonizar. Para iniciarla, basta con pulsar el botón correspondiente y tras la preceptiva confirmación por parte del usuario, el proceso se inicia sin más requisitos. La Figura 8 muestra la ventana con el registro de dicha operación una vez que ésta ha acabado.

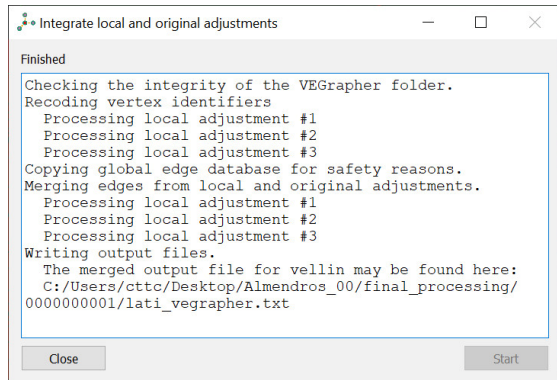


Figura 8: Armonización de resultados para el procesado final.

Hecho esto, el usuario puede tomar los resultados de este proceso para alimentar la ejecución final de la cadena PSIG.

No obstante, es interesante comentar que si el analista deseara proseguir re-procesando localmente más áreas críticas, esto es posible; asimismo, también es posible volver a armonizar resultados nuevamente. De esta manera, no hay límite a la experimentación que el usuario puede hacer para mejorar el producto final.

### 3.2. Los desafíos

Para implementar las funcionalidades descritas y conseguir que éstas reaccionen con tiempos de respuesta razonables que no entorpezcan el trabajo del usuario, ha sido necesario hacer frente a algunos desafíos.

El volumen de datos que han de gestionar las aplicaciones incluidas en las VETools puede llegar a ser muy grande; el número de puntos gestionado puede ser de (decenas de) millones; el de aristas, consecuentemente, aún puede llegar a límites mayores.

Esto plantea inmediatamente el problema de cómo trabajar con esas cantidades de datos y, además, de que el rendimiento de las aplicaciones que trabajan con ellos (especialmente VEGrapher) no se convierta en un obstáculo insalvable que anule su posible utilidad.

La aproximación para resolver este problema es doble. En primer lugar, los datos generados por la cadena PSIG deben ser reorganizados para que su uso de acuerdo con patrones de acceso aleatorio sea posible. Esto se implementa por medio del programa VEReady, descrito en la Sección 2.1.

El segundo vector de ataque consiste en racionalizar la manera en que los datos se cargan y muestran en VEGrapher. Sería absurdo pretender cargar en memoria y listos para mostrarse todos los puntos y aristas existentes en el conjunto de datos; con volúmenes muy inferiores a los comentados el colapso de una aplicación que pretendiera manejarlos estaría garantizado. Por ello,

VEGrapher utiliza el concepto de “viewport” (zona visible) para reducir en lo posible el volumen de datos con los que tenga que tratar.

Cuando se utiliza VEGrapher (o cualquier otra aplicación de visualización) es normal utilizar las funcionalidades de “panning” y “zooming” para mostrar, en mayor o menor detalle los datos a estudiar. Por lo tanto, el área que realmente se muestra es una, mientras que el área de estudio (potencialmente visualizable) es otra y mucho mayor. Si la aplicación solamente carga y visualiza, en todo momento, aquella información que debería presentarse en el área que realmente se está observando, el volumen de datos a gestionar se reduce drásticamente (pasando, por ejemplo, a “solamente” decenas de miles de objetos). Pretender gestionar aquellos elementos que son invisibles por caer fuera de dicha zona visible no reporta ningún beneficio.

La contrapartida es que es necesario actualizar constantemente esa zona visible descargando (eliminando) aquello que no se ve y cargando lo que deviene visible. De ahí que la forma en que se organiza la información (VEReady) sea tan importante.

Las secciones a continuación explican como se gestionaron tanto puntos y aristas como la imagen de fondo que se usa como respaldo para una mejor interpretación de los datos.

#### 3.2.1. Gestionando los puntos y las aristas

VEGrapher trabaja de acuerdo con el modelo arriba presentado de mostrar exclusivamente aquellos datos que son visibles en todo momento, ignorando los que no lo son. Para ello, descansa en la información generada por VEReady, la cual permite un acceso inteligente y rápido a los datos buscados. En particular, la primera pieza clave es el índice espacial implementado con la librería libspatialindex. El lector puede encontrar más información sobre esta librería en (Hadjieleftheriou 2019).

Gracias a este índice, que permite almacenar cantidades arbitrariamente grandes de datos juntamente con un índice que permita recuperarlos, es posible formular la consulta esencial que permitirá conocer qué elementos (puntos, y consecuentemente, aristas) forman parte de la zona visible en todo momento. Dicha consulta no es otra que discernir cual es el conjunto de puntos que caen dentro de un determinado rectángulo (véase la Figura 9).

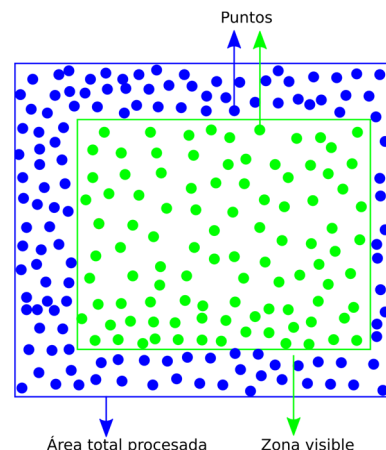


Figura 9: El índice espacial permite discernir muy rápidamente qué puntos pertenecen a la zona visible (en verde).



El índice espacial permite responder a esta cuestión en un tiempo negligible desde el punto de vista humano y, posteriormente, recuperar el conjunto de datos implicados también muy rápidamente. Esto hace posible el refresco continuo de la zona visible.

La importancia de disponer de un índice espacial es tal, que de no existir este, la búsqueda de los elementos presentes en la zona visible implicaría un tiempo de respuesta tan grande que haría del todo imposible implementar una herramienta como la que se está discutiendo.

Tal y como ya se ha comentado, las aristas no se muestran de entrada, ya que esto solamente serviría para generar confusión al ser su volumen tan grande que no sería posible distinguir los elementos individuales dentro de la zona visible. Éstas solamente se muestran cuando se selecciona (haciendo clic) sobre un punto determinado.

En este momento entra en juego la base de datos que conecta un punto con los identificadores de las aristas que parten de dicho punto. Esta base de datos (en realidad, un diccionario relacionando claves – los identificadores de los puntos – con su “significado” – la lista de identificadores de las aristas) también es capaz de almacenar un volumen arbitrariamente grande de datos y ofrece tiempos de acceso igualmente negligibles desde el punto de vista humano.

Esta base de datos está implementada con la librería levelDB, sobre la cual puede obtenerse información en (LevelDB development team 2021).

Es importante comentar que, si bien la funcionalidad de “diccionario” de esta base de datos está disponible en C++ utilizando librerías estandarizadas, es la posibilidad de levelDB de guardar en disco diccionarios de un tamaño arbitrariamente grande lo que posibilita esta función de localización de las aristas relacionadas con un punto. De haberse tenido que utilizar los diccionarios habituales (no persistentes, es decir, sin soporte en disco) el volumen de información a manejar también habría imposibilitado la implementación de VEGrapher.

Una vez obtenidos los identificadores de las aristas, éstas se recuperan del archivo binario que las contiene accediendo de forma aleatoria (por contraposición a secuencial). Este archivo es estándar, y solamente está afectado por las posibles limitaciones de tamaño que el sistema operativo de base (Windows 10 en este caso) pueda imponer.

Todo este proceso (selección del punto, obtención de los identificadores de las aristas, lectura de las aristas propiamente dichas, dibujado en pantalla) sucede en un tiempo mínimo, tan bajo que la experiencia del usuario es que todo ello sucede de forma instantánea.

### 3.2.2. La gestión imágenes de fondo de gran tamaño

VEGrapher permite mostrar la imagen de fondo correspondiente al área de interés con la que se está trabajando con el objetivo de ayudar al usuario en el proceso de interpretación de los datos (puntos, aristas) que se muestran en pantalla.

Esta característica de VEGrapher no debería ser en absoluto objeto de comentarios si no fuese por la técnica

que se utiliza para mostrar dichas imágenes: el teselado y visualización selectiva. Hay que decir, no obstante, que teniendo en cuenta los tamaños de las imágenes que se emplean hoy en día, esta funcionalidad no sería necesaria; no obstante, se ha implementado ya en previsión del aumento de dichos tamaños, cosa que, en un futuro, podría comprometer el rendimiento de la aplicación.

Por ejemplo, aplicaciones muy reputadas de manipulación de imágenes tales como The GIMP – véase (The GIMP Team 2021) - tienen serios problemas para manejar aquellas imágenes que se mueven en rangos próximos a los 50.000 x 50.000 píxel<sup>2</sup>. Es en previsión de que el aumento de las capacidades de los sensores pueda llegar a proporcionar imágenes en este rango de tamaños por lo que VEGrapher utiliza, ya, la técnica del teselado y su carga y visualización selectiva.

Es VEReady quien transforma la imagen de fondo original en tantas teselas de tamaño manejable como sea necesario, teselas que se incluyen con el resto de información transformada por esta aplicación. Entonces VEGrapher, empleando el concepto de zona visible ya descrito en las Secciones 3.2 y 3.2.1, carga en memoria y visualiza solamente aquellas teselas que son visibles en cada momento, deshaciéndose de aquellas que devienen invisibles al cambiar la zona en la que el usuario está trabajando. La Figura 10 ilustra este concepto.

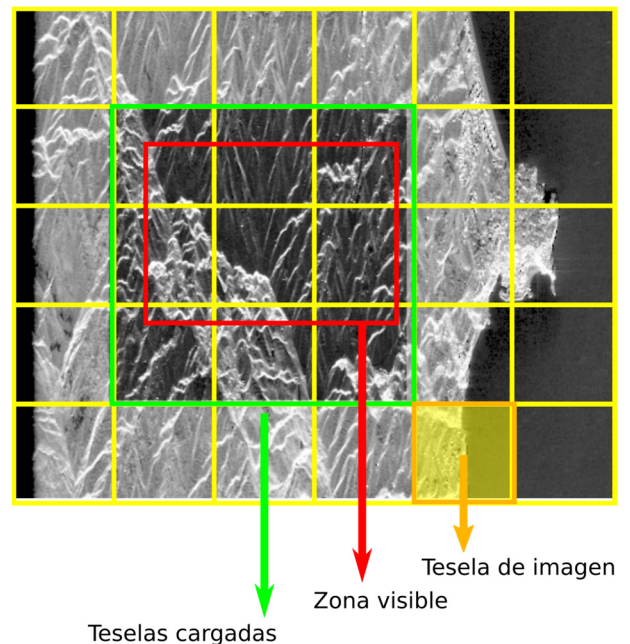


Figura 10: Zona visible: teselado y carga y visualización selectiva.

En dicha figura puede apreciarse (1) cómo la imagen original ha sido teselada en fragmentos más pequeños, los representados por la malla amarilla así como por la zona sombreada en el mismo color, (2) cuál es la zona visible en pantalla, en este ejemplo concreto aquella enmarcada por un rectángulo de color rojo y, finalmente (3) cuáles son las únicas teselas que hay que cargar para garantizar que dicha zona visible sea, realmente, visible; dichas teselas son las comprendidas dentro del recuadro de color verde.



Esta técnica puede llegar a ahorrar mucha memoria a la hora de mostrar imágenes de gran tamaño. Por el contrario, la gestión de la visualización de estas teselas no consume apenas recursos, siendo estos incluso negligibles, y quedando, por tanto, disponibles para la gestión de los puntos y las aristas descrita en la Sección 3.2.1.

#### 4. Discusión y conclusiones

En primer lugar, hay que recordar que las VETools son un conjunto de herramientas que todavía están en fase de desarrollo, si bien su conclusión está próxima.

Se ha comentado en la Sección 1 que la cadena PSIG está altamente automatizada, ofreciendo aún así a sus usuarios la posibilidad de controlar multitud de parámetros que controlan su comportamiento; estos parámetros, en ocasiones, generan diferentes flujos de trabajo.

Son, por un lado, esta variabilidad en lo que se refiere a cómo se ejecuta la cadena PSIG y por otro el hecho de que ésta esté embebida en VEGrapher, las razones por las cuales todavía no se pueda contar con una versión final de dicha herramienta en el momento de escribir este artículo; mientras que un usuario humano no tiene problemas en ajustar lo que sea necesario cuando PSIG se ejecuta de manera independiente, implementar esta lógica de forma automatizada dentro de una aplicación implica una complejidad que está todavía por resolver.

Está previsto, no obstante, tener resuelto este problema dentro del año 2021.

Por esta razón no se han presentado resultados que permitan respaldar de forma absolutamente objetiva los beneficios de las VETools.

Comoquiera que sea, y a pesar de no estar completamente acabadas, su uso por parte de los usuarios ya indica claramente que las VETools pueden llegar a ser unas herramientas de gran utilidad para complementar la cadena PSIG. Esto es así gracias a la implementación, ya disponible en VEGrapher, de uno de los flujos de trabajo de dicha cadena: se ha podido comprobar tanto el rendimiento como su ergonomía, así como su adecuación para asumir las tareas que se esperan de ellas.

Asimismo, esta implementación, aunque aún incompleta, ha permitido validar que estas herramientas satisfacen las expectativas iniciales, lo cual permite creer en un futuro flujo de trabajo en el cual la cadena PSIG se vea acompañada de las VETools para ayudar al experto en su tarea de obtener mejores mapas de deformación del terreno.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido co-financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (“European Regional Development Fund”) a través de Interreg V-A España, Francia y Andorra (POCTEFA 2014-2020), proyecto EFA295/19.

#### References

- BARRA, A., SOLARI, L., BÉJAR-PIZARRO, M., MONSERRAT, O., BIANCHINI, S., HERRERA, G., CROSETTO, M., SARRO, R., GONZÁLEZ-ALONSO, E., MATEOS, R.M., LIGÜERZANA, S., LÓPEZ, C., and MORETTI, S., 2017. A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images, *Remote Sensing*, **9**(10), 1002. DOI: 10.3390/rs9101002
- BIESCAS, E., CROSETTO, M., AGUDO, M., MONSERRAT, O., and CRIPPA, B., 2007. Two radar interferometric approaches to monitor slow and fast land deformation. *Journal of Surveying Engineering*, **133**(2), pp. 66-71. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:2(66)
- DEVANTHÉRY, N., CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., and CRIPPA, B., 2014. An approach to persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing* **6**(7), pp. 6662-6679. DOI: 10.3390/rs6076662
- HADJIELEFTHERIOU, M., 2019. libspatialindex 1.9.3 documentation. Available: <https://libspatialindex.org/en/latest/> [4/29, 2021].
- LEVELDB DEVELOPMENT TEAM, 2021. LevelDB is a fast key-value storage library written at Google that provides an ordered mapping from string keys to string values. Available: <https://github.com/google/leveldb> [4/29, 2021].
- NAVARRO, J. A., TOMÁS, R., BARRA, A., PAGÁN, J. I., REYES-CARMONA, C., SOLARI, L., VINIELLES, J. L., FALCO, S., and CROSETTO, M., 2020. ADAtools: Automatic Detection and Classification of Active Deformation Areas from PSI Displacement Maps. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **9**(10), 584. DOI: 10.3390/ijgi9100584
- TOMÁS, R., J. PAGÁN, J. I., NAVARRO, J.A., CANO, M., PASTOR, J. L., RIQUELME, A., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., CROSETTO, M., BARRA, A., MONSERRAT, O., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J. M., RAMÓN, A., IBORRA, S., DEL SOLDATO, M., SOLARI, L., BIANCHINI, S., RASPINI, F., NOVALI, F., FERRETI, A., CONSTANTINI, M., TRILLO, F., HERRERA, G., and CASAGLI, N., 2019. Semi-Automatic Identification and Pre-Screening of Geological-Geotechnical Deformational Processes Using Persistent Scatterer Interferometry Datasets. *Remote Sensing*, **11**(14), 1675. DOI: 10.3390/rs11141675
- THE GIMP TEAM, 2021. GIMP — GNU Image Manipulation Program. Available: <https://www.gimp.org/> [4/29, 2021].
- THE QT COMPANY, 2020. Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop. Available: <https://www.qt.io/> [4/29, 2021].

## EL PROYECTO MOMPA: PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN BASADOS EN EL MONITOREO MEDIANTE INTERFEROMETRÍA SATELITAL RADAR (INSAR)

### MOMPA PROJECT: ACTUATION PROTOCOLS BASED ON SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY (INSAR) MONITORING

Anna Barra<sup>a,\*</sup>, Xavier Colell<sup>b</sup>, Anna Echeverria<sup>c</sup>, Laura Trapero<sup>c</sup>, Jordi Marturia<sup>d</sup>, Ivan Fabregat<sup>d</sup>, Qi Gao<sup>a</sup>, María Cuevas<sup>a</sup>, Muriel Gasc<sup>e</sup>, Pere Buxó<sup>d</sup>, Nathalie Dufour<sup>e</sup>, Guido Luzi<sup>a</sup>, Michele Crosetto<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Av. Carl Friedrich Gauss 7, 08860 Castelldefels, España. [anna.barra@cttc.es](mailto:anna.barra@cttc.es); [qi.gao@cttc.es](mailto:qi.gao@cttc.es); [maria.cuevas@cttc.es](mailto:maria.cuevas@cttc.es); [gluzi@cttc.cat](mailto:gluzi@cttc.cat); [michele.crosetto@cttc.es](mailto:michele.crosetto@cttc.es)

<sup>b</sup> Euroconsult, Carrer de Na Maria Pla, 33, AD500, Andorra la Vella, Andorra. [xcolell@euroconsult.ad](mailto:xcolell@euroconsult.ad)

<sup>c</sup> Snow and Mountain Research Center of Andorra (CENMA-IEA), Institut d'Estudis Andorrans, Av. Rocafort 21-23, Sant Julià de Lòria, Andorra. [aeecheverria@iea.ad](mailto:aeecheverria@iea.ad); [ltrapero@iea.ad](mailto:ltrapero@iea.ad)

<sup>d</sup> Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc, 08038 Barcelona, España. [Jordi.Marturia@icgc.cat](mailto:Jordi.Marturia@icgc.cat); [Ivan.Fabregat@icgc.cat](mailto:Ivan.Fabregat@icgc.cat); [Pere.Buxo@icgc.cat](mailto:Pere.Buxo@icgc.cat)

<sup>e</sup> Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), 1 Avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse, Francia. [muriel.gasc@cerema.fr](mailto:muriel.gasc@cerema.fr); [nathalie.dufour@cerema.fr](mailto:nathalie.dufour@cerema.fr)

#### Abstract:

The objective of the POCTEFA - MOMPA project (Monitoring of Ground Movements and Action Protocol) is to provide a useful technical-operational tool for the prevention and management of risks due to slope movements, at a cross-border level, based on the satellite monitoring technique InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry). The tool includes two main elements: the risk evaluation, and the integration of the technique in an action protocol for the administrations in charge of Civil Protection. The study area covers around 4,000 km<sup>2</sup> and includes a part of the eastern Pyrenees, including the countries of Spain, France, and Andorra. The project deals with risk assessment based on the ground displacement map at an interregional scale and on the detected Active Deformation Areas (ADA), to select movements with potential risk where it will then focus on an analysis at a local scale using traditional methods (photo interpretation and field work). Both the free medium-resolution data, acquired by the Sentinel-1 satellite, as well as the high-resolution data acquired by COSMO-SkyMed are used. In addition, the project focuses on the landslide event of "la Portalada" (in Andorra) that occurred in 2019. Today the slope shows a slow movement that could affect a main road located at the bottom of the valley. The Government of Andorra is implementing measures to monitor and characterize the current movement of the slope. Therefore, nine artificial reflectors were installed along this forested slope. The data obtained will be integrated into the risk prevention protocol. Here, the project and the first results obtained through satellite interferometry are presented.

**Key words:** MOMPA, POCTEFA, deformation maps, InSAR, Pyrenees, landslides

#### Resumen:

El objetivo del proyecto POCTEFA - MOMPA (MONitorización de Movimientos del terreno y Protocolo de Actuación) es proporcionar una herramienta técnico-operativa útil para la prevención y la gestión de los riesgos ocasionados por movimientos de ladera, a nivel transfronterizo, basada en la técnica de seguimiento satelital InSAR. (Interferometría Radar a Apertura Sintética) La herramienta incluye dos elementos principales: la evaluación del riesgo; y la integración de la técnica en un protocolo de actuación para las administraciones encargadas de la Protección Civil. El área de estudio cubre alrededor de 4.000 km<sup>2</sup> e incluye una parte de los Pirineos orientales, incluyendo los países España, Francia y Andorra. El proyecto trata la evaluación de riesgos a partir del mapa de movimientos del terreno a escala interregional y de las Áreas de Deformación Activa (ADA), para seleccionar movimientos con riesgo potencial donde luego se enfocará en un análisis a escala local mediante el uso de métodos tradicionales (básicamente fotointerpretación y trabajo de campo). Se utilizan tanto los datos libres y gratuitos de resolución media, adquiridos por el satélite Sentinel-1, como los datos de alta resolución adquiridos por COSMO-SkyMed. Además, el proyecto centra su atención en el caso particular del deslizamiento de "la Portalada" (Andorra) ocurrido en 2019. En la actualidad, la ladera presenta un movimiento lento que podría afectar el eje principal de comunicación entre Andorra y España ubicado en el fondo del valle. El Gobierno de Andorra está implementando medidas para monitorear y caracterizar el movimiento actual de la ladera. Por tanto, nueve reflectores artificiales se instalaron a lo largo de esta ladera ocupada por un bosque. Los datos obtenidos se integrarán en el protocolo de prevención de riesgos. En este trabajo se presentan el proyecto y los primeros resultados obtenidos mediante interferometría satelital.

\* Corresponding Author: Anna Barra, [anna.barra@cttc.es](mailto:anna.barra@cttc.es)

**Palabras clave:** MOMPA, POCTEFA, Mapas de deformación del terreno, InSAR, Pirineos, deslizamientos

## 1. Introducción

La gestión de los riesgos a escala regional se basa principalmente en mapas de peligrosidad, o de susceptibilidad, que se basan en el conocimiento del territorio y en datos históricos de eventos. Estos mapas son muy útiles, pero son generalmente informaciones estáticas, que se actualizan cada vez que un nuevo evento ocurra. Además, los elevados costes de la monitorización *in situ* de los movimientos del terreno condicionan a que la gestión de los riesgos geológicos asociados sea frecuentemente de tipo “reactivo”, es decir se enfoca solamente en los movimientos del terreno evidentes, de alto riesgo, o que ya han generado daños.

El objetivo de MOMPA es mejorar la gestión del riesgo, contribuyendo a pasar de una aproximación “reactiva” a una “proactiva”. El elemento innovador del proyecto es la técnica de interferometría de imágenes radar de apertura sintética (InSAR), basada en imágenes satelitales para la mejora de la gestión de los riesgos geológicos. Esta técnica aprovecha la diferencia de fase entre imágenes SAR adquiridas en la misma área, en tiempos diferentes. Las diferencias de fase se utilizan para estimar posibles movimientos de la superficie del terreno ocurridos durante el período de tiempo cubierto por las fechas de adquisiciones. La técnica nos permite obtener millones de medias de movimientos, sobre amplias áreas (escala regional) con una precisión de orden milimétrico (Massonnet and Feigl 1998). Esto nos permite de un lado una detección y actualización periódica de los movimientos a escala regional, de otro lado la posibilidad de monitorizar y caracterizar el comportamiento temporal de varios movimientos, sin necesidad de medidas *in situ*. Una revisión de los métodos avanzados de interferometría satelital radas se proporciona en Crosetto *et al.* 2016.

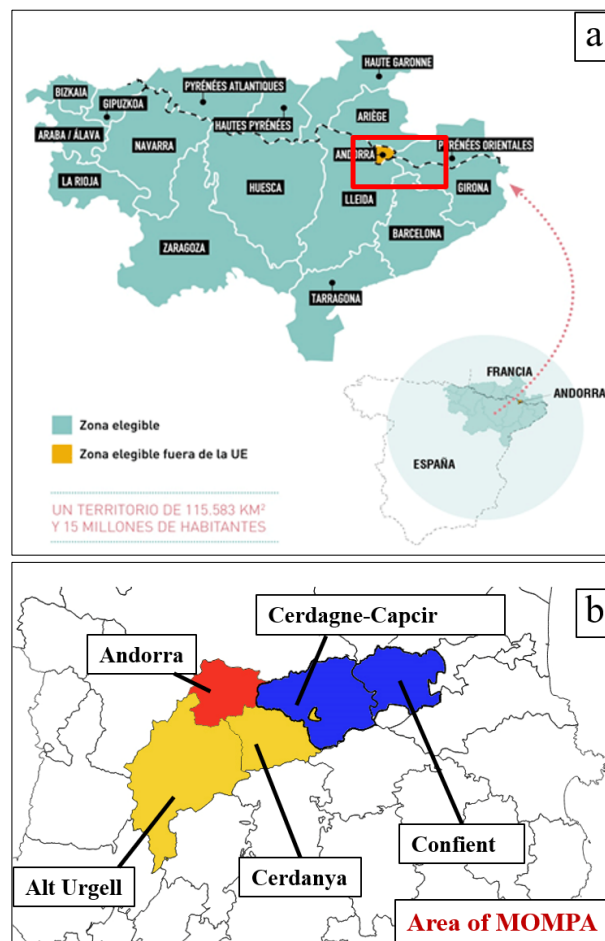
En las últimas décadas, el mapeo y monitoreo de fenómenos de peligro geológico han recibido una importante contribución de las técnicas InSAR. Algunos ejemplos de aplicación son: actividad volcánica (Peltier *et al.* 2010; Bonforte *et al.* 2011; Lagios *et al.* 2013), movimientos tectónicos (Massironi *et al.* 2009; Vilardo *et al.* 2010; Lagios *et al.* 2012), hundimientos (Tomás *et al.* 2014; Solari *et al.* 2016; Béjar-Pizarro *et al.* 2017) o caracterización y monitoreo de deslizamientos de tierra (Notti *et al.* 2010; Herrera *et al.* 2013; Oliveira *et al.* 2015; Barra *et al.* 2016; Reyes-Carmona *et al.* 2020; Solari *et al.* 2020). Es evidente que existe una integración de la técnica InSAR en la gestión de los riesgos geológicos como herramienta de detección y monitoreo. Sin embargo, salvo pocas excepciones de utilizzo integrado en la gestión regional de riesgos (Bianchini *et al.* 2018; Raspini *et al.* 2019; Montalti 2019), su uso se ha limitado al ámbito científico debido a su dificultad de procesado y de interpretación. La puesta en funcionamiento de constelaciones con políticas de adquisición sistemática y acceso gratuito a los datos (como Sentinel-1) ha supuesto un incremento en el interés por estas técnicas y un enfoque en el desarrollo de herramientas y procedimientos para incrementar el utilizzo operativo en la gestión del territorio (Barra *et al.* 2017, 2018, Del Soldato, 2019, Bianchini *et al.* 2020).

En este contexto, el proyecto MOMPA quiere introducir la interferometría satelital en la gestión de los riesgos en un área de los pirineos orientales, proponiendo un enfoque interregional y piramidal (de pequeña a grande escala) basado en la interferometría satelital.

Después de una presentación general del proyecto (sección 2) y de la zona de estudio (sección 2.1), se presentarán los primeros resultados logrados con el uso de la técnica InSAR con imágenes adquiridas por los satélites Sentinel-1 y COSMO-SkyMed (sección 3). Así mismo, se presentan los resultados preliminares de un estudio de un deslizamiento de interés, donde se instalaron 9 reflectores artificiales serán comentados en la sección 4.

## 2. El proyecto MOMPA

El proyecto MOMPA (MONitorización de Movimientos del terreno y Protocolo de Actuación) está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020). POCTEFA 2014-2020 es un programa europeo de cooperación territorial creado para fomentar el desarrollo sostenible del territorio fronterizo entre los tres países (Fig. 1) (POCTEFA 2021).



**Figura 1:** Zona de estudio: a) zona elegible del programa POCTEFA; b) área de estudio del proyecto MOMPA: en azul la zona francesa, en amarillo la zona española, y en rojo la andorrana.

MOMPA se enmarca en el eje estratégico 2 del programa “Promover la adaptación al cambio climático y la prevención y gestión de riesgos”, y con el objetivo específico de “Mejorar la capacidad de anticipación y respuesta de los actores del territorio a los riesgos específicos y a la gestión de catástrofes naturales”.

El proyecto se inició el 1 de diciembre de 2019 y finalizará en mayo de 2022 (MOMPA 2021). El partenariado incluye cuatro socios especializados en teledetección y en técnicas de análisis y gestión del riesgo: el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), el Institut d'Estudis Andorrans (IEA), el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), y el Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). Cuenta como asociados las protecciones civiles de cada territorio y la empresa Euroconsult Andorra S.A..

Los resultados principales esperados del proyecto son los siguientes: (i) mapas de seguimiento de los movimientos del terreno en una zona incluida en los territorios de l'Alt Urgell, Cerdanya, Capcir, Conflent y Andorra; (ii) valoraciones de riesgo asociado; (iii) protocolos de actuación de soporte a la Protección Civil. Se trata de resultados permanentes, en línea con la estrategia Europa 2020, que serán transferidos a las Protecciones Civiles (socios asociados) y a otras organizaciones, como las Autoridades locales y regionales.

La idea del proyecto es tener un enfoque piramidal en la gestión de los riesgos: a partir de los mapas de deformación a escala interregional, se detectan las Áreas de Deformación Activa (ADA) y se clasifican en función del nivel de riesgo potencial asociado. En las ADA de interés se hace un estudio de más detalle, priorizando la inversión de recursos, tiempo y análisis (integrando otras técnicas y datos), en función del nivel potencial de riesgo asociado a cada ADA.

Después de las acciones de preparación, gestión y comunicación del proyecto, las principales acciones técnicas son:

- **Acción 3** - Monitorización de los movimientos del terreno: realización de mapas de velocidad anual de deformación y series temporales de deformación. Extracción de las Áreas de Deformación Activa (ADA) detectadas. Se utilizan dos tipos de datos: media (Sentinel-1) y alta resolución (COSMO-SkyMed).
- **Acción 4** - Análisis de riesgo asociada a movimientos del terreno: valoración de riesgo de los elementos expuestos en base a una delimitación de los fenómenos geológicos asociados a las ADA detectadas en la Acción 3. Se prevé realizar dos análisis: el primero se basará en los mapas de deformación y las series temporales de deformación a media resolución, el segundo se basará en los datos a alta resolución.
- **Acción 5** - Protocolo de actuación: realización de dos actividades principales: el análisis de los umbrales de prealerta o alerta de los movimientos analizados, y el desarrollo metodológico de los protocolos de actuación para la Protección Civil.

## 2.1. Área de estudio

Geográficamente, la zona de estudio del proyecto MOMPA cubre un área de aproximadamente 4.000 km<sup>2</sup>, e incluye las siguientes regiones de los Pirineos centro-orientales (Fig. 1): Alt Urgell y Cerdanya, en España, Cerdagne-Capcir y Conflent, en Francia, y el principado de Andorra. Los movimientos del terreno que pueden comportar riesgo son diversos principalmente deslizamientos y flujos, caída de rocas, y subsidencias.

Los datos de teledetección son muy útiles y recomendados en la gestión de deslizamientos de tierra (Mantovani *et al.* 1996; Metternicht *et al.* 2005; Tofani *et al.* 2013; Scaioni *et al.* 2014). Entre estos, el uso de productos interferométricos para estudios de deslizamientos de tierra lo describe bien Wasowski and Bovenga (2014), destacando las ventajas y limitaciones de la técnica. La zona de los Pirineos no presenta características favorables a la aplicación de la técnica InSAR, y por eso no existen muchos trabajos previos (Herrera 2011). La zona de estudio presenta características que limitan la aplicación de la técnica, así como explicado en Wasowski and Bovenga (2014). Los principales factores limitantes de la AOI son:

- **Cobertura del suelo:** la zona de estudio está cubierta mayoritariamente por vegetación: bosques, prados y áreas agrícolas. La vegetación genera una respuesta del suelo inestable a la señal RADAR, lo que implica ruido o imposibilidad de obtener medidas.
- **Cobertura de nieve:** las zonas más elevadas de la zona de estudio están cubiertas por un manto de nieve durante muchos días al año. Esto implica que las imágenes adquiridas en días con nieve no se puedan utilizar si se quiere obtener un resultado global en zonas de montaña.
- **Topografía:** la fuerte topografía implica una geometría relativa suelo-adquisición muy variable en el espacio. Al ser un sistema que solo puede medir movimientos en la dirección LOS, la línea de vista del satélite, la capacidad de detectar el movimiento depende de su dirección real. Además, la pendiente del terreno define la huella o resolución espacial de nuestro píxel: en una zona como la de MOMPA, la resolución varía mucho entre zonas.

## 2.2. Acción 3: Monitorización de los movimientos del terreno

Esta sección describe las primeras actividades de la Acción 3 del proyecto MOMPA, enfocada en el uso de InSAR para la monitorización de los movimientos del terreno. Esta acción representa una componente fundamental del proyecto, ya que sus resultados son los datos principales de entrada de las Acciones 4 y 5.

La monitorización de los movimientos de la Acción 3 se basa en la técnica InSAR, que usa una serie de imágenes radar, de tipo SAR, adquiridas desde satélites. Es importante destacar que la técnica InSAR no funciona de forma homogénea sobre el territorio. De hecho, la técnica funciona bien sobre zonas urbanas, infraestructuras, zonas rocosas, etc., mientras que puede tener una densidad de medidas menor, o hasta ninguna medida, en zonas con mucha vegetación (Hanssen 2005).

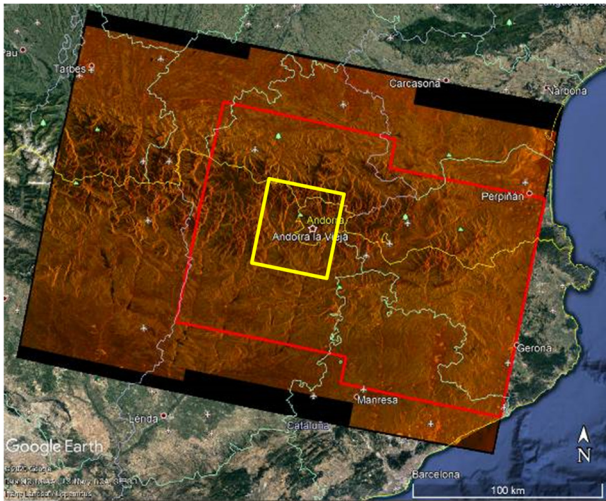


Las estimaciones de las deformaciones a partir de las imágenes SAR se ha hecho utilizando el software y procesado PSIG, adaptada a la zona de estudio. Para más detalles ver Biescas *et al.* (2007); Crosetto *et al.* (2016) y Devanthery *et al.* (2014).

Esta acción prevé dos tipos de análisis InSAR: una a media y otra a alta resolución.

### 2.2.1. Procesado de Media resolución

Los datos de media resolución ( $4 \times 14 \text{ m}^2$ ) son adquiridos por los satélites Sentinel-1, en geometría descendente. Son datos gratuitos y que permiten cubrir grandes áreas gracias al método de adquisición *Wide Swath* (IWS). En consecuencia, toda la zona de interés de MOMPA cabe en el marco de una sola imagen (Fig. 2). En el específico se han generado los interferogramas a partir de seis bursts (subimágenes) de dos swaths (Fig. 2) de las imágenes Sentinel-1 A y B. Para el primer mapa de deformación, se han procesado un total de 203 imágenes que cubren el período comprendido entre el 4 de julio de 2015 hasta el 28 de diciembre de 2020.



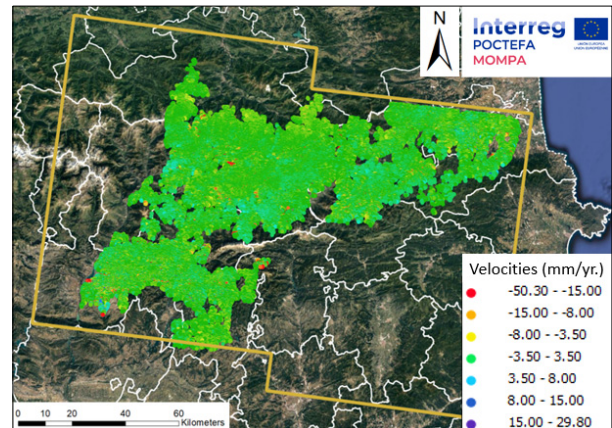
**Figura 2:** En color marrón se representa la extensión de las imágenes Sentinel-1. El polígono rojo indica la parte de la imagen que ha sido procesada para la generación de los interferogramas. El polígono amarillo indica la extensión de las imágenes COSMO-SkyMed. Imagen de fondo de Google Earth.

Las imágenes, descargadas a través del portal Copernicus Open Access Hub, tienen en general, una separación temporal de 6 o 12 días. No obstante, algunas imágenes de los periodos invernales (diciembre-mayo) han sido eliminadas para evitar problemas de coherencia debida a la cobertura de nieve (Solari *et al.* 2020; Mirmazloumi *et al.* 2021). Estos datos nos han permitido obtener el mapa de velocidades sobre toda la zona de estudio (Fig. 3) utilizando el procesado PSIG explicado en Biescas *et al.* (2007) y Devanthery *et al.* (2014).

A partir de los mapas globales de velocidades se han extraído las áreas de deformación activas (ADA) de manera automática con la utilización de la herramienta ADAFinder (Barra *et al.* 2017; Tomás *et al.* 2019; Navarro *et al.* 2020). Las áreas extraídas facilitan la interpretación y la utilización de los productos InSAR, ayudan a enfocar las actividades de análisis a las zonas de mayor interés.

Gracias a la detección de las ADA, se han seleccionado áreas de mayor interés por su potencial riesgo. Sobre

estas áreas, en manera local, se han generado las series temporales de deformación con el método explicado en Devanthery *et al.* (2014).



**Figura 3:** Mapa de velocidades de deformación (mm/año) estimada a partir de datos de media resolución Sentinel-1.

### 2.2.2. Procesado de alta resolución

Los datos de alta resolución ( $3 \times 3 \text{ m}^2$ ) son adquiridos por los satélites Cosmo-SkyMED (de Telespazio Iberica), en modo de adquisición *Stripmap*, con geometría descendente. El marco de las imágenes seleccionadas (marcado en amarillo en la Figura 2) cubre toda Andorra y la parte norte del Alt Urgell. Para los primeros resultados de alta resolución, se han procesado 36 imágenes disponibles que cubren un periodo comprendido entre Julio de 2013 a y Julio de 2020. Se ha generado un mapa de velocidades anuales de deformación cubriendo los principales núcleos urbano. A partir de estos resultados será posible extraer las ADA de alta resolución, y será posible un análisis de riesgo de más detalle, en las zonas urbanas.

### 2.2.3. Monitorización con reflectores

El 10 de agosto de 2019 el principal acceso a Andorra desde Catalunya, a través de la Seu d'Urgell, fue cortado por la ocurrencia de un gran desprendimiento (Fig. 4). El incidente sucedió a las seis de la mañana en la Portalada (Sant Julià de Lòria), en una zona en obras junto a un importante centro comercial. El desprendimiento obligó a cerrar el tráfico en ambos sentidos. Las autoridades andorranas reabrieron la circulación en los dos sentidos de la marcha de la carretera CG-1, entre Andorra y La Seu d'Urgell, después de más de 6 horas.

El deslizamiento de ladera de la Portalada, inducido probablemente por las excavaciones realizadas al lado de la carretera, es el fenómeno conocido más importante en el territorio cubierto por el proyecto MOMPA. Por esta razón, se decidió analizar en detalle esta zona usando la técnica InSAR. Tal y como se describe a continuación, el estudio InSAR de la zona requiere el despliegue de una red de reflectores artificiales.

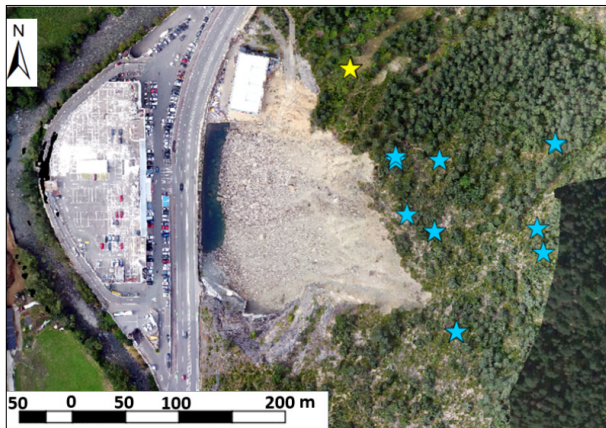
La técnica InSAR explota la respuesta de objetos (reflectores) a las microondas de los sensores SAR, que tiene que ser persistente en el tiempo. Normalmente las zonas cubiertas por vegetación tienen muy pocos reflectores.





**Figura 4:** Deslizamiento de la Portalada (Andorra) del 10/08/2019. Fuente: Diari d'Andorra (2021).

Este es el caso de la zona de la Portalada donde: la ladera bajo monitoreo está a ladera arriba del desprendimiento del 2019 y está cubierta por bosque (Fig. 5), lo que implica la ausencia de reflectores naturales que nos permitan adquirir medidas con la técnica InSAR. Por este motivo, y por el alto interés de la zona, se ha elegido instalar nueve reflectores artificiales (ocho pasivos y uno activo, Figs. 5 y 6) que aseguran una reflexión estable de la señal radar permitiendo obtener medidas de movimientos (Crosetto *et al.* 2013; Luzi *et al.* 2021). La primera instalación de la red de reflectores se finalizó el 1 de diciembre de 2020 gracias al apoyo de las administraciones locales. El primer objetivo de cualquier red de reflectores es comprobar la respuesta de cada reflector con un análisis de la amplitud, y luego derivar las primeras estimaciones de los desplazamientos. Los reflectores están orientados según la geometría de adquisición de los datos Sentinel-1 utilizados, para aprovechar la alta frecuencia de adquisiciones (una imagen cada 6 días).



**Figura 5:** Posición de la red de reflectores. Las estrellas azules indican la posición de los reflectores pasivos. La estrella amarilla indica la posición del reflector activo.

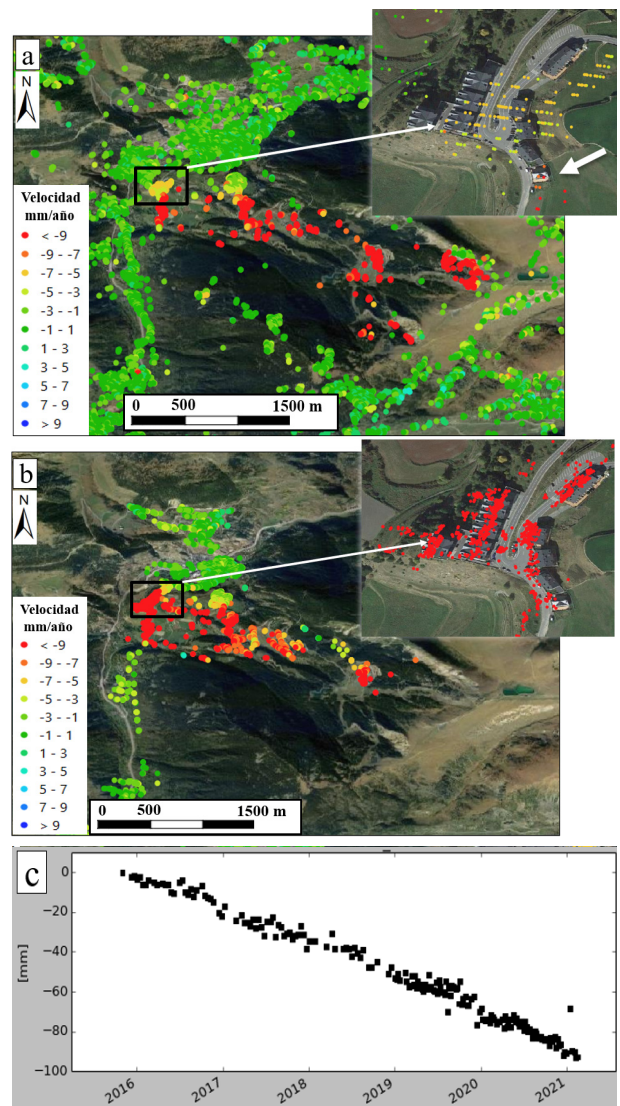
### 3. Resultados

La Figura 3 presenta el mapa global de velocidades de deformación, estimado con una solución única sobre la totalidad del área del proyecto, donde se puede destacar una sensibilidad media de 3.5 mm/año. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un deslizamiento localizado en Andorra, medido con ambos datos de media resolución

(Fig. 7a) y alta resolución (Fig. 7b). Ambos resultados describen muy bien la extensión del deslizamiento.



**Figura 6:** Instalación y orientación de un reflector pasivo en la ladera en movimiento de La Portalada (Andorra, diciembre de 2020).



**Figura 7:** Ejemplo de una zona en deslizamiento, detectada en ambos procesados de media (a) y alta (b) resolución. En (c) se muestra un ejemplo de serie temporal de deformación estimada a partir de datos Sentinel-1 de media resolución.

Es notorio que los datos a mayor resolución (es decir con menor longitud de onda) tienen peor coherencia en zonas de cambio. Se puede destacar como Sentinel-1 ofrece



una cobertura más completa y extensa debido a su mayor coherencia sobre zonas vegetadas. Mientras que los datos de alta resolución son más sensibles al ruido debido por ejemplo a la cobertura vegetal (Crosetto *et al.* 2010). Por otro lado, observando los dos detalles de la Figura 7, es evidente como CosmoSkyMed, ofrece un muestreo muy detallado (de aproximadamente un punto cada 3 por 3 m<sup>2</sup>), en correspondencia con los edificios, estructuras e infraestructuras. La Figura 7c muestra un ejemplo de serie temporal de deformación de un punto localizado en la zona señalada en la Figura 7a, estimada a partir de los datos Sentinel-1.

### 3.1. Monitorización de la Portalada (Andorra) con reflectores

En esta fase del proyecto, se ha evaluado la respuesta, en términos de amplitud de las imágenes SAR, de diferentes píxeles, con el objetivo de seleccionar los píxeles que se corresponden a los reflectores y de individuar posibles problemas. Se considera que un reflector está funcionando bien cuando el píxel correspondiente tiene un incremento permanente de amplitud justo después de la instalación del mismo (los reflectores se instalaron el 1 diciembre de 2020). La serie temporal de la Figura 8 contiene la secuencia de amplitudes de un mismo píxel donde la mayoría de los valores están entre 0 y 100. Sin embargo, hay una fecha (el 1 de diciembre de 2020) donde estos valores suben a 255 (bytes) y después se mantienen constantes: Se trata claramente de un reflector artificial, concretamente del reflector activo marcado con 1 en la Figura 9. Gracias a este análisis se ha individuado un reflector que no estaba dando señal y se ha podido individuar el problema con una inspección de campo: el reflector no estaba correctamente orientado.

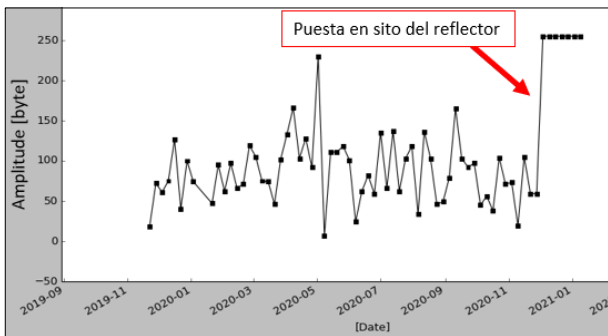


Figura 8: Serie temporal de amplitud del reflector activo.

Una vez individuados los reflectores en las imágenes, se han estimado las series temporales de deformación sobre los puntos seleccionados (Figs. 8 y 10). Las series de deformación se han estimado a partir de la primera imagen disponible después de la instalación de los reflectores: incluye 7 imágenes desde el 04/12/2020 hasta el 09/01/2021. La Figura 9 ilustra un mapa de deformación acumulada de la zona de interés. Se puede observar que en la zona del centro comercial (parte izquierda de la Figura 9) hay una buena respuesta con muchos puntos, la mayoría de los cuales son estables (color verde). Es importante observar que en la parte derecha de la Figura 9 aparecen grupos de puntos (p. ej. dos, tres o más puntos). Dichos puntos se corresponden típicamente a un único reflector, cuya respuesta representa múltiples píxeles. Normalmente se usa el

punto con mayor amplitud de respuesta y se descartan los otros.

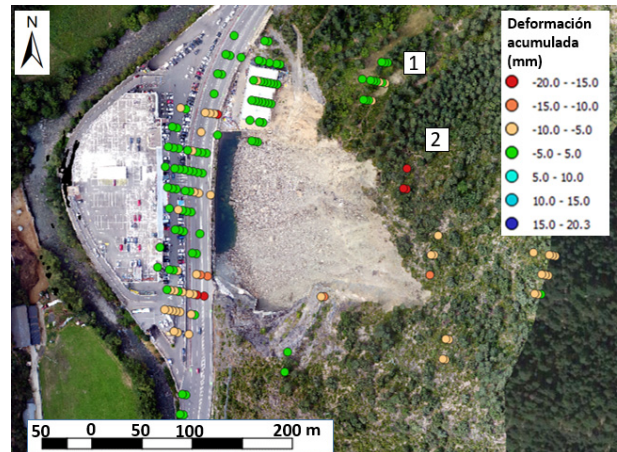


Figura 9: Resultado preliminar de la red de reflectores y de otros reflectores de la zona. Los colores indican la deformación acumulada.

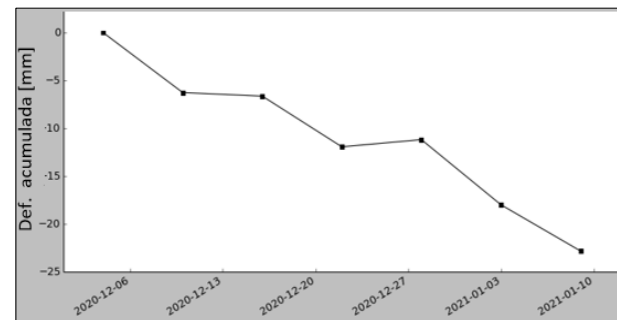


Figura 10: Serie temporal de deformación del reflector pasivo indicado con el número 2 en la Figura 9.

En la Figura 10 se muestra la serie temporal de deformación del reflector señalado con el número 2 en la Figura 9. Con este primer resultado podemos detectar un movimiento post-deslizamiento que afecta la ladera arriba del desprendimiento. Además, la zona que presenta la serie temporal enseñada (Figs. 8 y 10) se ha movido el más o menos el doble de los otros reflectores. Esos movimientos son importantes de monitorizar para ver si están decelerando o no en el tiempo. Los resultados se analizarán juntos con otros datos de monitorización *in situ*.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el proyecto MOMPA con un enfoque sobre la Acción 3, que incluye el procesado InSAR de media y alta resolución. Se han presentado unos primeros resultados que han permitido seleccionar las áreas de interés para las siguientes acciones del proyecto, dedicadas a un análisis de riesgo y caracterización de los movimientos. Los resultados mostrados serán la base para desarrollar protocolos de actuación útiles para los servicios de protección civil, o las autoridades involucradas en la gestión del riesgo. Esta información será de utilidad para actuar en función de la información derivada por la técnica de interferometría radar de satélite. Los resultados serán transferidos a las Protecciones Civiles (socios asociados

del proyecto) y a otras administraciones públicas locales y regionales.

Se ha presentado un mapa de velocidades de deformación que cubre integralmente la zona de estudio del proyecto, que incluye Alt Urgell y Cerdanya en Cataluña, Capcir, Conflent en Francia y Andorra. Con una zona de interés relacionada a un movimiento detectado en Andorra se ha mostrado en detalle un ejemplo de medidas derivadas por ambos procesados de media (datos Sentinel-1) y alta (datos Cosmo-SkyMED) resolución. Este ejemplo permite una primera comparación entre los dos resultados. Al contrario de Sentinel-1, los datos de alta resolución no aseguran adquisiciones regulares en el tiempo, y no son gratuitos. Esto implica de un lado que no se puede planificar un monitoreo a largo plazo, de otro lado implica una dificultad (a veces imposibilidad) de derivar las series temporales de deformación. Otro aspecto es la mayor sensibilidad a las deformaciones de un lado positivo, y al ruido de un lado negativo. Esto nos ha implicado una dificultad alta en obtener resultados integrados en toda la zona, debido a la baja densidad de urbanización. Hasta ahora podemos afirmar que en la gestión regional de los riesgos los datos de alta resolución no resultan necesarios y no son favorables a la operatividad a largo plazo, mientras la utilización de datos Sentinel-1 son más

que satisfactorios. De otro lado, a escala de mayor detalle en los elementos antrópicos, nos permiten un estudio de detalle como por ejemplo detectar edificios afectados por mayores movimientos diferenciales y entonces sujetos a un daño potencial mayor.

Además, se han presentado los resultados preliminares de la zona de estudio de La Portalada, después de la instalación de los reflectores artificiales. El valor añadido del empleo de una red de reflectores artificiales en esta zona de interés será evaluado durante el curso del proyecto.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido co-financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional ("European Regional Development Fund") a través de Interreg V-A España, Francia y Andorra (POCTEFA 2014-2020), proyecto EFA295/19. En el caso de la Portalada, los autores agradecen a la administración local de La Portalada, el Comú de Sant Julià de Lòria, por permitir la implementación de los reflectores, y al Ministerio de Ordenación Territorial del Gobierno de Andorra por facilitar su gestión. La obra de implementación de los reflectores fue contratada a la empresa INACCÉS.

## References

- BARRA, A., MONSERRAT, O., MAZZANTI, P., ESPOSITO, C., CROSETTO, M., and SCARASCIA, G., 2016. First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection. *Geomat Nat Haz Risk*, **7**, pp. 1–10
- BARRA, A., MONSERRAT, O., SOLARI, L., HERRERA, G., LOPEZ, C., ONORI, R., REICHENBACH, P., GONZÁLEZ-ALONSO, E.L.E.N.A., MATEOS, R.M., BIANCHINI, S., and CROSETTO, M., 2018. The safety project: SENTINEL-1 for the management of geological risk. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, **121**, pp. 247-258.
- BARRA, A., SOLARI, L., BÉJAR-PIZARRO, M., MONSERRAT, O., BIANCHINI, S., HERRERA, G., CROSETTO, M., SARRO, R., GONZÁLEZ-ALONSO, E., MATEOS, R.M., LIGÜERZANA, S., LÓPEZ, C., and MORETTI, S., 2017. A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*, **9**(10), 1002.
- BÉJAR-PIZARRO, M., EZQUERRO, P., HERRERA, G., TOMÁS, R., GUARDIOLA-ALBERT, C., HERNÁNDEZ, JMR., FERNANDEZ MERODO, JA., MARCHAMALO, M., and MARTÍNEZ, R., 2017. mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, central Spain. *J hydrol.*, **547** pp. 678–689
- BIANCHINI, S., RASPINI, F., SOLARI, L., DEL SOLDATO, M., CIAMPALINI, A., ROSI, A., and CASAGLI, N., 2018. From picture to movie: Twenty years of ground deformation recording over Tuscany region (Italy) with satellite InSAR. *Frontiers in Earth Science*, **6**, p.177.
- BIANCHINI, S., SOLARI, L., BARRA, A., MONSERRAT, O., CROSETTO, M., and CATANI, F., 2020. Sentinel-1 PSI Data for the Evaluation of Landslide Geohazard and Impact. *In Workshop on World Landslide Forum* (pp. 447-455). Springer, Cham.
- DIARI D'ANDORRA. 2021. Diari d'Andorra (diariandorra.ad). Available: <https://www.diariandorra.ad/> [7/15, 2021].
- BIESCAS, E., CROSETTO, M., AGUDO, M., MONSERRAT, O., and CRIPPA, B., 2007. Two radar interferometric approaches to monitor slow and fast land deformation. *Journal of Surveying Engineering*, **133**(2), pp.66-71.
- BONFORTE, A, GUGLIELMINO F, COLTELLI M, FERRETTI A, and PUGLISI G., 2011. structural assessment of mount etna volcano from permanent scatterers analysis. *Geochem Geophys Geosy.* **12**, pp. 1–19
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., IGLESIAS, R., and CRIPPA, B., 2010. Persistent scatterer interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **76**(9), pp.1061-1069.
- CROSETTO, M., GILI, J.A., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., COROMINAS, J., and SERRAL, D., 2013. Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **13**(4), pp. 923–933.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., DEVANTHÉRY, N., and CRIPPA, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*, **115**, pp. 78–89.



- DEL SOLDATO, M., SOLARI, L., RASPINI, F., BIANCHINI, S., CIAMPALINI, A., MONTALTI, R., FERRETTI, A., PELLEGRINESCHI, V., and CASAGLI, N., 2019. monitoring ground instabilities using sar satellite data: a practical approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **8**(7), p.307.
- DEVANTHÉRY, N., CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., and CRIPPA, B., 2014. An approach to persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, **6**(7), pp. 6662–6679.
- HANSSSEN, R.F., 2005. satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, **6**(3-4), pp.253-260.
- HERRERA, G., NOTTI, D., GARCÍA-DAVALILLO, J.C., MORA, O., COOKSLEY, G., SÁNCHEZ, M., ARNAUD, A., and CROSETTO, M., 2011. analysis with c-and x-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. *Landslides*, **8**(2), pp.195-206.
- HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GARCÍA-DAVALILLO, J.C., GUERRERO, J., NOTTI, D., GALVE, J.P., FERNANDEZ-MERODO, J.A., and COOKSLEY, G., 2013. multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena Valley case study (central Spanish Pyrenees). *Remote Sens Environ.*, **128**, pp. 31–43
- LAGIOS, E., PAPADIMITRIOU, P., NOVALI, F., SAKKAS, V., FUMAGALLI, A., VLACHOU, K., and DEL CONTE, S., 2012. combined seismicity pattern analysis, DGPS and PSInSAR studies in the broader area of Cephalonia (Greece). *Tectonophysics*, **524**, pp. 43–58
- LAGIOS, E., SAKKAS, V., NOVALI, F., BELLOTTI, F., FERRETTI, A., VLACHOU, K., and DIETRICH, V., 2013. SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini volcano (1992–2012): tectonic implications. *Tectonophysics*, **594**, pp. 38–59.
- LUZI, G., ESPÍN-LÓPEZ, P.F., MIRA PÉREZ, F., MONSERRAT, O., and CROSETTO, M., 2021. A Low-Cost Active Reflector for Interferometric Monitoring Based on Sentinel-1 SAR Images. *Sensors*, **21**(6), 2008.
- MANTOVANI, F., SOETERS, R., and VAN WESTEN, C.J., 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, **15**, pp. 213-225. DOI: 10.1016/s0148-9062(97)87261-0
- MASSIRONI, M., ZAMPIERI, D., BIANCHI, M., SCHIAVO, A., and FRANCESCHINI, A., 2009. use of PSInSAR™ data to infer active tectonics: clues on the differential uplift across the Giudicarie Belt (central-eastern Alps, Italy). *Tectonophysics*, **476**, pp. 297–303
- MASSONNET, D., and FEIGL, K. L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, **36**, pp. 441–500. DOI: 10.1029/97RG03139
- METTERNICHT, G., HURNI, L., and GOGU, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sens Env.*, **98**, pp. 284-303. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.004
- MIRMAZLOUMI, S.M., BARRA, A., CROSETTO, M., MONSERRAT, O., and CRIPPA, B., 2021. Pyrenees deformation monitoring using sentinel-1 data and the persistent scatterer interferometry technique. *Procedia Computer Science*, **181**, pp.671-677.
- MOMPA. 2021. MOnitorización de Movimientos del terreno y Protocolo de Actuación. Home . Available: <https://mompaeu.es/> [7/15, 2021].
- MONTALTI, R., SOLARI, L., BIANCHINI, S., DEL SOLDATO, M., RASPINI, F., and CASAGLI, N., 2019. A Sentinel-1-based clustering analysis for geo-hazards mitigation at regional scale: a case study in Central Italy. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **10**(1), pp. 2257-2275.
- NAVARRO, J. A., TOMÁS, R., BARRA, A., PAGÁN, J. I., REYES-CARMONA, C., SOLARI, L., VINIELLES, J. L., FALCO, S., and CROSETTO, M., 2020. ADAtools: Automatic Detection and Classification of Active Deformation Areas from PSI Displacement Maps. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, **9**(10), p. 584.
- NOTTI, D., DAVALILLO, J.C., HERRERA, G., and MORA O., 2010. assessment of the performance of x-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: upper Tena Valley case study. *Nat Hazards Earth Sys.*, **10**, pp. 1865
- OLIVEIRA, S.C., ZÊZERE, J.L., CATALÃO, J., and NICO, G., 2015. the contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, **12**(4), pp.703-719.
- PELTIER, A., BIANCHI, M., KAMINSKI, E., KOMOROWSKI, J.C., RUCCI, A., and STAUDACHER, T., 2010. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: validation using GPS measurements on piton de la Fournaise. *Geophys Res Lett.*, **37**, pp. 1–5.
- POCTEFA. 2021. ¿Qué es POCTEFA?. Available: <https://www.poctefa.eu/programa/que-es-poctefa/#> [7/15, 2021].
- RASPINI, F., BIANCHINI, S., CIAMPALINI, A., DEL SOLDATO, M., MONTALTI, R., SOLARI, L., TOFANI, V., AND CASAGLI, N., 2019. persistent scatterers continuous streaming for landslide monitoring and mapping: the case of the Tuscany region (Italy). *Landslides*, **16**(10), pp.2033-2044.

- REYES-CARMONA, C., BARRA, A., GALVE, J.P., MONSERRAT, O., PÉREZ-PEÑA, J.V., MATEOS, R.M., NOTTI, D., RUANO, P., MILLARES, A., LÓPEZ-VINIELLES, J., and AZAÑÓN, J.M., 2020. sentinel-1 DInSAR for monitoring active landslides in critical infrastructures: the case of the Rules reservoir (southern Spain). *Remote Sensing*, **12**(5), p. 809.
- SCAIONI, M., LONGONI, L., MELILLO, V., and PAPINI, M., 2014. Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sens.*, **6**, pp. 9600-9652. DOI: 10.3390/rs6109600
- SOLARI, L., CIAMPALINI, A., RASPINI, F., BIANCHINI, S., and MORETTI, S., 2016. PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): a case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization. *Remote Sens.*, **8**, p. 120.
- SOLARI, L., BIANCHINI, S., FRANCESCHINI, R., BARRA, A., MONSERRAT, O., THUEGAZ, P., BERTOLO, D., CROSETTO, M., and CATANI, F., 2020. Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **87**, p. 102028.
- SOLARI, L., DEL SOLDATO, M., RASPINI, F., BARRA, A., BIANCHINI, S., CONFUORTO, P., CASAGLI, N., and CROSETTO, M., 2020. review of satellite interferometry for landslide detection in Italy. *Remote Sens.*, **12**, p. 1351.
- TOFANI, V., SEGONI, S., AGOSTINI, A., CATANI, F., and CASAGLI, N., 2013. Use of remote sensing for landslide studies in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci.*, **13**, pp. 299-309. DOI: 10.5194/nhess-13-299-2013
- TOMÁS, R., ROMERO, R., MULAS, J., MARTURIÀ, J.J., MALLORQUÍ, J.J., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.M., HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GONZÁLEZ, P.J., FERNÁNDEZ, J., and DUQUE, S., 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environ Earth Sci.*, **71**, pp. 163–181.
- TOMÁS, R., J. PAGÁN, J. I., NAVARRO, J.A., CANO, M., PASTOR, J. L., RIQUELME, A., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., CROSETTO, M., BARRA, A., MONSERRAT, O., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J. M., RAMÓN, A., IBORRA, S., DEL SOLDATO, M., SOLARI, L., BIANCHINI, S., RASPINI, F., NOVALI, F., FERRETI, A., CONSTANTINI, M., TRILLO, F., HERRERA, G., and CASAGLI, N., 2019. Semi-Automatic Identification and Pre-Screening of Geological-Geotechnical Deformational Processes Using Persistent Scatterer Interferometry Datasets. *Remote Sensing*, **11**(14), p. 1675.
- VILARDO, G., ISAIA, R., VENTURA, G., DE MARTINO, P., and TERRANOVA, C., 2010. InSAR permanent scatterer analysis reveals fault re-activation during inflation and deflation episodes at Campi Flegrei caldera. *Remote Sens Environ.*, **114**, pp. 2373–2383
- WASOWSKI, J., and BOVENGA, F., 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Eng Geol.*, **174**, pp. 103-138. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003

## LAND SUBSIDENCE ANALYSIS CAUSED BY AQUIFER OVEREXPLOITATION USING GEP TOOLS: A-DINSAR ON THE CLOUD

### MEDICIÓN DE SUBSIDENCIA DEL TERRENO CAUSADA POR SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS MEDIANTE HERRAMIENTAS GEP: A-DINSAR EN LA NUBE

Guadalupe Bru<sup>a,\*</sup>, Pablo Ezquerro<sup>a</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>a</sup>, Marta Béjar-Pizarro<sup>a</sup>, Gerardo Herrera<sup>a</sup>, Roberto Tomás<sup>b</sup>, María Inés Navarro-Hernández<sup>b</sup>, Juan M. López-Sánchez<sup>c</sup>, Ali Hakan Ören<sup>d</sup>, Barış Çaylak<sup>d</sup>, Alper Elçi<sup>e</sup>, Khaldoun Shatanawi<sup>f</sup>, Alsharifa Hind Mohammad<sup>f</sup>, Husam A. Abu Hajar<sup>f</sup>, Roberta Boni<sup>g</sup>, Claudia Meisina<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Calle de Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, Spain. [g.bru@igme.es](mailto:g.bru@igme.es); [p.ezquerro@igme.es](mailto:p.ezquerro@igme.es); [c.guardiola@igme.es](mailto:c.guardiola@igme.es); [m.bejar@igme.es](mailto:m.bejar@igme.es); [g.herrera@igme.es](mailto:g.herrera@igme.es)

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Carr. de San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain. [roberto.tomas@ua.es](mailto:roberto.tomas@ua.es); [mainnahe@ua.es](mailto:mainnahe@ua.es)

<sup>c</sup> Instituto Universitario de Investigación Informática, Universidad de Alicante, Carr. de San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain. [juanma.lopez@ua.es](mailto:juanma.lopez@ua.es)

<sup>d</sup> Department of Civil Engineering, Dokuz Eylul University, Alsancak, No: 144 35210, Cumhuriyet Blv, 35220 Konak, Turkey. [ali.oren@deu.edu.tr](mailto:ali.oren@deu.edu.tr); [bariscaylak91@gmail.com](mailto:bariscaylak91@gmail.com)

<sup>e</sup> Department of Environmental Engineering, Dokuz Eylul University, Alsancak, No: 144 35210, Cumhuriyet Blv, 35220 Konak, Turkey. [alper.elci@deu.edu.tr](mailto:alper.elci@deu.edu.tr)

<sup>f</sup> Water, Energy and Environment Center, University of Jordan, Queen Rania St, Amman, Jordan. [kshatanawi@ju.edu.jo](mailto:kshatanawi@ju.edu.jo); [s.jasem@ju.edu.jo](mailto:s.jasem@ju.edu.jo); [h.abuhajar@ju.edu.jo](mailto:h.abuhajar@ju.edu.jo)

<sup>g</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Universidad de Pavia, Corso Str. Nuova, 65, 27100 Pavia, Italy. [claudia.meisina@unipv.it](mailto:claudia.meisina@unipv.it); [roberta.boni01@universitadipavia.it](mailto:roberta.boni01@universitadipavia.it)

#### Abstract:

Groundwater is a vitally important resource for humans. One of the main problems derived from the overexploitation of aquifers is land subsidence, which in turn carries other associated natural risks. Advanced Differential satellite radar interferometry (A-DInSAR) techniques provide valuable information on the surface displacements of the ground, which serve to characterize both the deformational behaviour of the aquifer and its properties. RESERVOIR is a research project belonging to the European PRIMA programme, whose main objective is to design sustainable groundwater management models through the study of four areas of the Mediterranean subjected to water stress. One of the main tasks of the project is the integration of the terrain deformation data obtained with satellite remote sensing techniques in the hydrogeological and geomechanical models of the aquifers. In the present work, a first evaluation of the deformation of the ground in each study area is carried out using the tools contained in the Geohazards Exploitation Platform (GEP). This is a service financed by the European Space Agency (ESA) that allows processing directly on its server, without need to store data or applications locally.

**Key words:** A-DInSAR, GEP, Sentinel-1, aquifer overexploitation, land subsidence

#### Resumen:

Las aguas subterráneas son un recurso de vital importancia para el ser humano. Una de las principales problemáticas derivadas de la sobreexplotación de acuíferos es la subsidencia del terreno, que a su vez lleva asociados otros riesgos naturales. Las técnicas avanzadas de interferometría radar diferencial de satélite (A-DInSAR) aportan información muy valiosa sobre los desplazamientos superficiales del terreno, que sirven para caracterizar tanto el comportamiento geomecánico del acuífero como sus propiedades. RESERVOIR es un proyecto de investigación perteneciente al programa europeo PRIMA, cuyo principal objetivo es diseñar modelos sostenibles de gestión de aguas subterráneas mediante el estudio de cuatro zonas del Mediterráneo sometidas a estrés hídrico. Una de las principales tareas del proyecto es la integración de los datos de deformación del terreno obtenidos con técnicas de teledetección por satélite en los modelos hidrogeológicos y geomecánicos de los acuíferos. En el presente trabajo se realiza una primera evaluación de la deformación del terreno en cada zona de estudio utilizando las herramientas contenidas en la *Geohazards Exploitation Platform* (GEP). Este servicio financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA) permite realizar procesados directamente en su servidor, sin necesidad de almacenar datos ni aplicaciones en local.

**Palabras clave:** A-DInSAR, GEP, Sentinel-1, sobreexplotación de acuíferos, subsidencia

\* Corresponding Author: [Guadalupe Bru, g.bru@igme.es](mailto:Guadalupe Bru, g.bru@igme.es)

## 1. Introduction

Groundwater is a critical resource that provides fresh drinking water to at least 50% of the global population and accounts for 43% of all of the water used for irrigation (Siebert *et al.* 2010; UNESCO 2012). Groundwater withdrawal in overexploited aquifers can induce soil consolidation and associated land subsidence, which at the same time ensues other impacts, such as permanent reduction of storage capacity in aquifer systems, increase of flooding risk (specially in coastal areas), earth fissures and damage to human infrastructures.

A well-established tool for measuring land subsidence that uses Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite acquisitions is the Advanced Differential Interferometry SAR (A-DInSAR) technique (Galloway and Hoffmann 2007; Galloway *et al.* 1998; Tomás *et al.* 2014). With the launch of the Sentinel-1 (S-1) mission from the European Space Agency (ESA) in 2014, that provides freely accessible data globally with a revisit time of 6 days, the SAR archive has become huge and is constantly increasing. To handle and be able to process S-1 Big Data by scientists that are non-expert in A-DInSAR, the Geohazards Exploitation Platform (GEP) on-demand web tool was launched in 2015 funded by ESA. The strategy is to co-locate both A-DInSAR algorithms (Thematic Applications) and computational resources close to the SAR data archives, as well as to provide the capability to easily generate A-DInSAR results in a friendly interface. The developed on-demand Thematic Applications permits to set up an efficient on-line service to produce surface deformation mean velocity maps and time series in an unsupervised manner (De Luca *et al.* 2015). The concept “unsupervised” stands for the fact that the processing chains run automatically in the server without user interaction. The efficiency and robustness of the chain guarantee the achieved result accuracy.

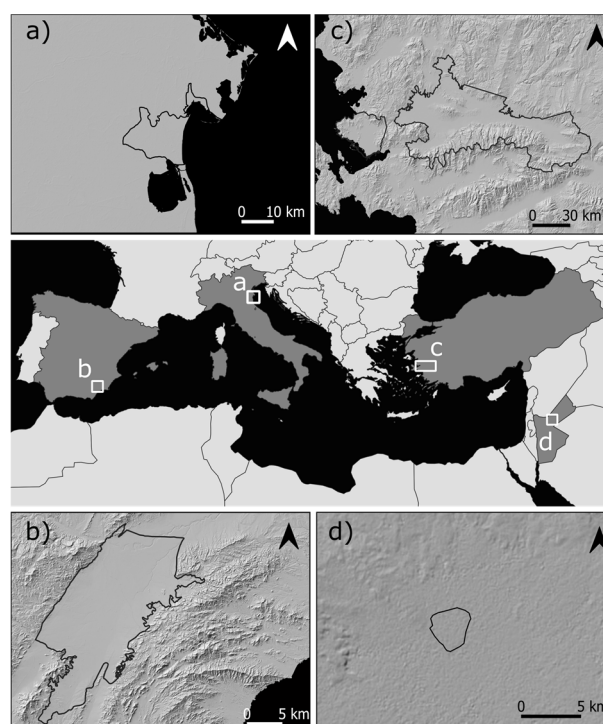
In this work we present a preliminary land subsidence detection by means of line-of-sight LOS velocity maps obtained in the GEP platform, in the four pilot sites of the RESERVOIR PRIMA project. We discuss the performance of the two different Thematic Applications that were used (P-SBAS and FASTVEL algorithms) and address their suitability to study surface displacements related to aquifer system deformation.

## 2. Studied sites

The RESERVOIR project funded by the PRIMA programme supported by the European Union, aims to provide new products and services for a sustainable groundwater management model to be developed and tested in four water-stressed Mediterranean pilot sites, and which then would be applicable in other regions via an interdisciplinary approach. The pilot sites are located in Italy (coastal aquifer of Comacchio), Spain (Alto Guadalentín Basin), Turkey (Gediz River Basin) and Jordan (Azraq Wetland Reserve) (Fig. 1). The water usages of these aquifers are irrigation, drinking water and/or power generation. Each site is prone to different issues such as land subsidence, salt water intrusion, water pollution, over-exploitation and insufficient recharge.

The aquifer of Comacchio is in the coastal floodplain of the Po River in north-eastern Italy. The geological setting

is formed by a 700-800 m thick sedimentary sequence of continental and marine deposits accumulated during the Pliocene-Pleistocene (Castellarin *et al.* 1985; Pieri and Groppi 1981) which led to a complex hydrogeological aquifer system. The primary land use of the area is intensive horticultural crops. During the summer season water demand increases significantly as a result of tourism along the coastline. This pilot site is affected by various threats: saltwater intrusion in the phreatic aquifer and seawater encroachment inland along the rivers (Giambastiani *et al.* 2007); natural (Carbognin and Tosi 1995; Carminati *et al.* 2005) and anthropogenic land subsidence (Teatini *et al.* 2006); land reclamation drainage systems; soil salinization; high demand of water during the peak tourist season; insufficient aquifer recharge and sea level rise (Antonellini *et al.* 2008).



**Figure 1:** Location of the four pilot sites: a) Comacchio coastal aquifer; b) Alto Guadalentín basin; c) Gediz River Basin; d) Azraq Wetland Reserve.

The Alto Guadalentín Basin is an intramontane tectonic depression located in Murcia Region, southeast Spain, in the detrital and sedimentary filling of a large basin developed by tectonic shifts. The average thickness of the filling layers reaches more than 300 m. However, as a consequence of the horst and graben structure of the bedrock this thickness increases locally up to 900 m (Cerón, 1995). The layers present from the top are Plio-Quaternary materials subdivided in soft soils (aquitarde) and coarse fraction (aquifer) (Béjar-Pizarro *et al.* 2016; Boni *et al.* 2015), Miocene materials that act as low permeability or impervious limit and lastly the Palaeozoic metamorphic substrate. In the 60's hundreds of wells were drilled to improve agriculture's productivity, but led to the declaration of overexploitation in 1987 (Cerón and Pulido-Bosch 1996). The piezometric levels have been continuously descending over the last 60 years, although in the last years they have been partially stabilized. Subsidence rates are the highest ones measured in Europe related to groundwater withdrawal (> 10 cm/yr)



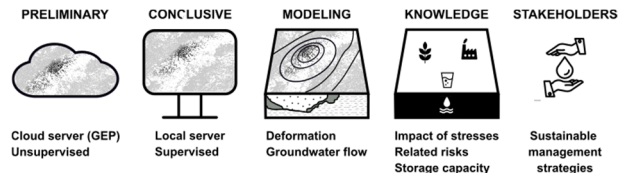
(Ezquerro *et al.* 2020; Fernández *et al.* 2018; González and Fernández 2011; Rigo *et al.* 2013).

The Gediz River Basin, located in the Aegean region of Turkey, is one of the largest out of 25 major watersheds and most water-stressed river basins in the country. The basement is formed by metamorphic rocks of the Menderes Massive (Bulut *et al.* 2020; DSI 2014) covered by Quaternary basalts and alluvium units. There are 76 groundwater bodies or aquifers consisting of different lithological units (TUBITAK-MAM 2018). The ones formed by sedimentary-alluvial deposits constitute a significant share of the total groundwater potential in the basin (DSI 2014) and are referred to as the alluvial aquifer or the Gediz Plain Aquifer. The agriculture sector is the largest groundwater user since the basin is agriculture-dominant; however, significant competition for water exists among various stakeholders and other sectors. The main socio-economical activities are agriculture, animal husbandry, food industry, textile industry and mining. There are more than 40,000 registered wells mostly in alluvial aquifers on the basin. In addition, there are thousands of unregistered wells for which the actual total groundwater withdrawal rate is unknown. Land subsidence linked to overexploitation of groundwater is observed in some parts of the basin, however it does not cause any major problems yet. The aquifer is also affected by groundwater pollution and deterioration due to agriculture, interaction with polluted river water and geothermal water influence.

The Azraq Wetland Reserve is an Oasis of international importance for its biodiversity and constitutes one of the most peculiar ecosystems in the world. It is located in the heart of an extensive trans-boundary groundwater basin in the northeaster part of the Desert of Jordan. The basin seems to have developed during the Paleozoic (Abed 2018) and represents a thick stratigraphic section (El-Naqa 2010). Groundwater systems in the basin can be divided into three main hydraulic complexes ranging from recent deposits to deep sandstone aquifer complexes. During the last two decades, overexploitation of the groundwater in the basin for human consumption and irrigation, has caused lowering of the basin water table and, consequently, the salinity has increased. The latter has exposed the Reserve, which has an important social and economic role for the local community, to severe pressure, and ecosystems are in far stage of degradation.

### 3. Methodology

The preliminary assessment of ground deformation at the four aquifers has been done using S-1 SAR images processed with two different algorithms of the GEP. These preliminary results are the first step towards integrating A-DInSAR into aquifer deformation models within the frame of the RESERVOIR project (Fig. 2). With these satellite observations we can identify potential deformation areas before carrying out a more work demanding and conclusive A-DInSAR analysis with supervised procedures, that will be used to characterize and calibrate groundwater flow and deformational numerical models. This will provide insights and knowledge about the impacts of overexploiting groundwater resources for irrigation, industry or tourism demands, and how is related to land subsidence and related impacts or risks. The new products and services will be handled to the stakeholders.

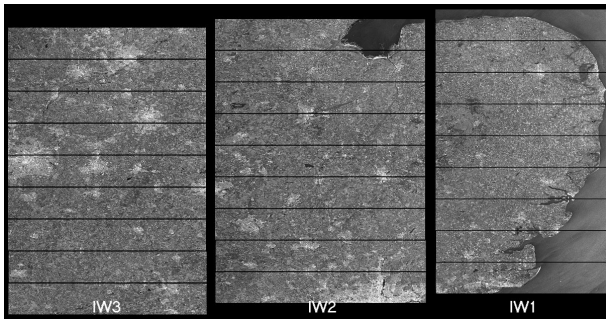


**Figure 2:** Workflow to integrate A-DInSAR into aquifer deformation models within the frame of the RESERVOIR project.

Data processing was carried out with the P-SBAS and FASTVEL services integrated in GEP. The input data are S-1 Single Look Complex (SLC) SAR acquisitions in Interferometric Wide (IW) swath mode. The thematic apps on GEP require a mandatory registration step on the ESA web portal ([gpod.eo.esa.int/](http://gpod.eo.esa.int/)), by creating an ESA Earth Observation Single Sign-On (EO-SSO). GEP provides a list of processing tutorials in Terradue (2020) where the configuration and outputs of each processor is detailed. A brief description of each processor is outlined below.

#### 3.1. P-SBAS

The Small Baseline Subset (SBAS) approach (Berardino *et al.* 2002) is a seminal work that proposes a complete A-DInSAR procedure using small baselines to limit the spatial decorrelation, multilooked data to reduce phase noise, and a coherence-based selection criterion. P-SBAS is the parallel computing solution developed by CNR-IREA for the SBAS processing chain to deal with the current scenario characterized by huge SAR archives (Casu *et al.* 2014). The P-SBAS InSAR S-1 Terrain Observation with Progressive Scans (TOPS) service implemented in GEP supports S-1 TOPSAR IW SLC data (Galve *et al.* 2017). Just a few parameters of the processing can be selected, such as the coherence threshold which can be set in the 0.7-0.9 range (the default is 0.85), the area of interest (AOI), and the reference point coordinates. However, as addressed by Galve *et al.* (2017), if the point that is selected by the user is not coherent, the processing tool selects another reference point without any possibility of interaction. Currently, a mandatory step must be performed before launching the P-SBAS job, which is ordering the S-1 acquisitions older than a few months through the “DIAS product order” utility, as they were put offline at the end of 2020 due to change of policy at the main data providers. In practice, the DIAS ONDA provider recommends that users consider running the utility at least two times for a sanity check. The main outputs of the processing are pixel location (geographic coordinates), displacement time series (TS) in LOS [cm], mean LOS velocity [cm/year], temporal coherence, and LOS unit vectors along the north, east and vertical directions. The sign criteria are negative values indicating movement away from the satellite and positive towards the satellite. The multilook applied is 5 x 20 (azimuth x range) which generates pixels in the size of about 90 x 90 m. In practice, it is recommended to select an AOI that spans at least four S-1 bursts (Fig. 3), which approximately corresponds to 80 km along azimuth. Automatically, the algorithm will process the entire swath of the image (250 km in range direction) and the azimuth specified by the user.



**Figure 3:** S-1 SLC IW mode captures three sub-swaths (range) and nine Bursts (azimuth) using Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR). Image from ESA (2021).

### 3.2. FASTVEL

FASTVEL algorithm was developed by TRE-Altamira for generating differential interferograms or PSI-based mean displacement velocity maps from a set of S-1 or ASAR images. A minimum number of 25 images are required and no pre-ordering step is needed. The parameters to be considered are: AOI, reference point coordinates, maximum temporal baseline (default value 365 days), maximum perpendicular baseline (default 400 m), maximum doppler difference (default 1000 Hz), maximum doppler centroid (default 2000 Hz), interferometric coherence threshold, and Atmospheric Phase Screen (APS) correlation distance (default 3000 m). In all the FASTVEL processes presented in this work the values have been set to the default, with the exception of the interferometric coherence threshold which has been set in the range of 0.50 to 0.85. The main outputs of the processing are pixel location (geographic coordinates), mean LOS velocity [cm/year], height error [m], temporal coherence, and LOS unit vectors. The sign criteria are negative values indicating movement away from the satellite and positive towards the satellite. The product's pixel size is approximately 40 x 40 m. In practice, it is recommended to select an AOI of about 30 x 30 km in areas where high pixel density is expected and up to 70 x 70 km in areas where low pixel density is expected. The algorithm will only process the AOI specified by the user.

## 4. Results

In this section the results of the preliminary assessment of ground deformation of the four pilot sites obtained with the P-SBAS and the FASTVEL A-DInSAR services in GEP are presented. The periods studied are similar, ranging from end 2016 to beginning 2021. As it was mentioned, P-SBAS also provide displacement time series in LOS, but only the mean LOS velocity will be analysed. Note that the extent processed with P-SBAS is much larger than for FASTVEL. The coherence can be theoretically defined on a pixel basis as the correlation coefficient that varies in the range of 0 to 1. It significantly influences the accuracy of phase in the interferogram; the higher coherence (more restrictive), the better the quality. The threshold limits the selection of pixels above the specified coherence value.

### 4.1. Coastal aquifer of Comacchio

Four different preliminary mean LOS velocity maps are presented for Comacchio pilot site. The P-SBAS algorithm was performed in ascending (ASC) (Fig. 4

upper left) and descending (DES) (Fig. 4 upper right) orbits using 100 S-1 SAR images in both cases and covering the period January 2016 to May 2019 and September 2017 to January 2021 respectively. The FASTVEL algorithm was also performed in ASC (Fig. 4 lower left) and DES (Fig. 4 lower right) orbits using 125 and 37 S-1 SAR images respectively, covering the period January 2016 to May 2019. The threshold coherences for each processing is shown in Table 1. The reference point was placed in a stable area according to previous Global Positioning System (GPS) 2011-2016 subsidence studies (Bonsignore *et al.* 2018).

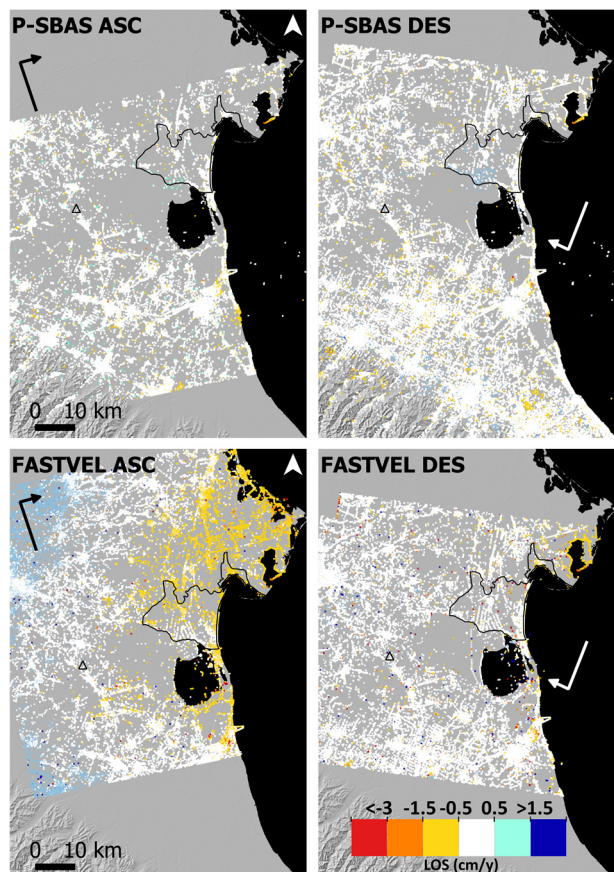
**Table 1:** Main characteristics of the A-DInSAR processing performed in GEP. Type of service or thematic application, orbit direction, number of images (N), track and coherence threshold (Coh). ASC and DES stand for ascending and descending orbits of the satellite, respectively.

Site	Service	Orbit	N	Track	Coh.
Comacchio	P-SBAS	ASC	100	117	0.85
		DES	100	95	0.70
	FASTVEL	ASC	125	117	0.50
		DES	37	95	0.55
Alto Guadalentin	P-SBAS	ASC	100	103	0.85
		DES	102	8	0.85
	FASTVEL	DES	79	8	0.50
Gediz	P-SBAS	DES	138	138	0.85
			123	36	
Gediz West	P-SBAS	ASC	111	131	0.85
	FASTVEL	ASC	60	131	0.50
Gediz East	P-SBAS	ASC	98	131	0.85
	FASTVEL	ASC	73	131	0.50
Azraq Wetland	P-SBAS	DES	124	21	0.85
		FASTVEL	ASC	104	14
			104		0.85
		DES	126	21	0.80
		125		0.85	

All analyses include completely the Goro Gorino and Po di Volano areas of interest, which are delimited in black in Figure 4. For all the analysis the stable velocities represented in the maps have been set in the same range of -0.5 to 0.5 cm/year (white) as it is the mean value of standard deviation and for the sake of comparison. Both P-SBAS results (ASC/DES) are similar with mean LOS velocities ranging from -3.5 to 1.5 cm/year in the common area with the FASTVEL processing extent (approximately 75x75 km). FASTVEL results, obtained with less restrictive coherence values for the reasons explained in Section 5, are noisier, especially the ASC orbit where a ramp in velocity is observed from the West (positive values) to the East (negative) of the scene (Fig. 4). Also, there are randomly distributed pixels showing not explained high uplifts or movement towards the satellite. Velocities in LOS range from -14.3 to 6.2 cm/year in DES orbit and up to -20.5 to 30.8 in ASC. These artefacts are probably caused by the temporal decorrelation, or coherence loss, that occurs in spring and summer, due to



the crops growing cycle. A clear deformation pattern associated to land subsidence could not be retrieved in the Comacchio aquifer area. This is a historically affected subsidence area, which present day displacement rates are low (mm/yr) and locally accelerated by the construction of new buildings and structures (Vitagliano *et al.* 2020). Further local scale analysis will be performed to investigate the multi-component low subsidence rates that have implications for the flooding of the coastal area and the saltwater contamination of the soils and groundwater resources.



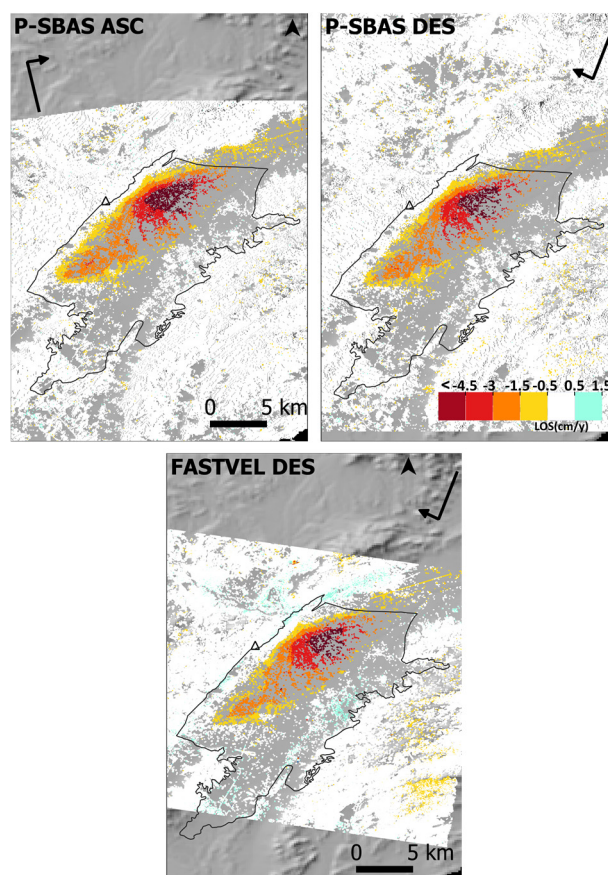
**Figure 4:** P-SBAS (upper) and FASTVEL (lower) mean LOS velocity (cm/y) maps. Reference point selected by the user is marked with a black triangle.

#### 4.2. Alto Guadalentín basin

As for the previous pilot site, three different preliminary mean LOS velocity maps are presented for Alto Guadalentín. The P-SBAS algorithm was performed in ASC (Fig. 5 upper left) and DES (Fig. 5 upper right) orbits using 100 and 102 S-1 SAR images respectively, covering the period January 2017 to January 2021. The FASTVEL algorithm was only performed in DES mode (Fig. 5 lower) using 79 S-1 SAR images and covering the period June 2017 to January 2021. The threshold coherences for each process are shown in Table 1. The reference point was placed in the mountain range of the West.

All the datasets cover the whole extent of the aquifer boundary. The stable threshold has been set in the range of -0.5 to 0.5 cm/year based on the standard deviation values, although previous InSAR studies revealed that radar noise over this area is usually high and stability

thresholds around  $\pm 1$  cm/year were used (Boni *et al.* 2015). The deformation pattern is very consistent among the datasets and the pixel density is relatively high. The maximum deformation area is located in the northern section of the basin, with rates in LOS ranging from -4.5 up to -6.9 cm/year. These results agree with previous studies (Béjar-Pizarro *et al.* 2016; Boni *et al.* 2015; Ezquerro *et al.* 2017; Ezquerro *et al.* 2020). Again, FASTVEL results obtained with coherence values of 0.50 against the 0.85 of P-SBAS, seem noisier. The deformation pattern coincides spatially with other monitoring data, such as CSK, ALOS-PALSAR and ENVISAT from previous studies (Béjar-Pizarro *et al.* 2016; Boni *et al.* 2015; Ezquerro *et al.* 2017; Ezquerro *et al.* 2020; González and Fernández 2011).



**Figure 5:** P-SBAS (upper) and FASTVEL (lower) mean LOS velocity (cm/y) maps. Reference point selected by the user is marked with a black triangle.

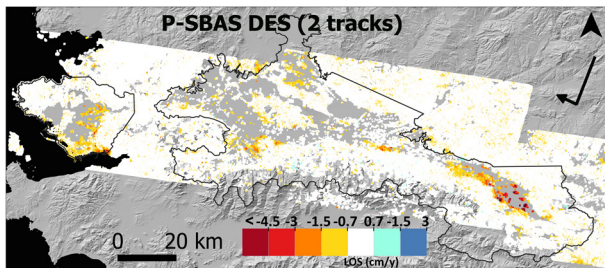
Regarding the velocity range, they also agree, although it has to be considered that the studied periods are different from this work to previous ones.

#### 4.3. Gediz River Basin

A complete picture of the deformation at the Gediz basin was obtained by processing separately two DES tracks datasets with the P-SBAS thematic application and plotting the results together (Fig. 6). The period for both of them is from June 2016 to July 2020. Movement away from the satellite was clearly detected in the western section, more precisely towards the southern coast which is an urbanized area that belongs to Izmir city. In the eastern section of the basin movement is detected in various patches, being the most relevant the one in the



eastern part, which is an agricultural area surrounding the towns of Alaçehir and Sarigöl.



**Figure 6:** Mean LOS velocity map of the entire Gediz Basin of two distinct P-SBAS processes of two different DES tracks.

Further analysis has been performed in these two areas with S-1 datasets in ASC orbit (Fig. 7). The period studied for the west area is July 2017 to February 2021 (upper part of Fig. 7). Both algorithms detect movement with peak LOS rates greater than  $-4.5$  cm/year at the central lowlands (that has low pixel density), at the southwestern area along the coast that is covered by salt evaporation ponds (coherent targets are along the paths) and at the south eastern limit of the AOI over the metropolitan city area (high pixel density). However, there are discrepancies between P-SBAS and FASTVEL. In the metropolitan area, the FASTVEL results detect a small patch with movement towards the satellite, meanwhile P-SBAS detect it as down lift. Also, at the upper right corner of the FASTVEL scene, there is a section showing low movement away from the satellite that neither P-SBAS ASC or DES actually detect (Fig. 7 upper).

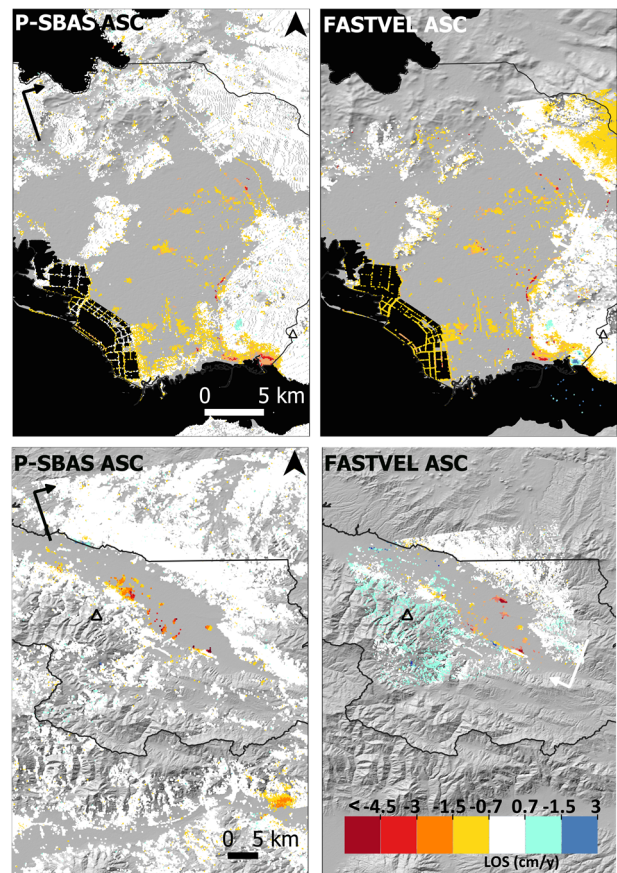
The periods studied for the East area are December 2017 to February 2021 (P-SBAS) and June 2017 to February 2021 (FASTVEL). The pixel density is relatively low in the basin due to coherence loss of the agricultural land coverage. High deformation rates away from the satellite are detected along the centre of the basin. Mountain ranges at the sides appear stable (not moving) in both DES and ASC P-SBAS results, however FASTVEL detects slight up lift in the SW of the scene.

#### 4.4. Azraq Wetland Reserve

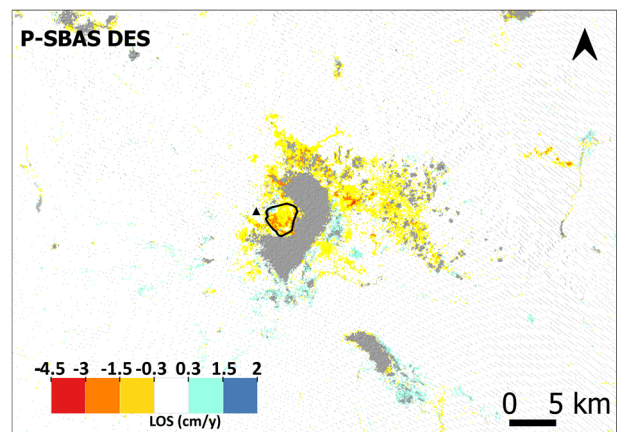
Five different preliminary mean LOS velocity maps are presented for Azraq Wetland Reserve. The reference point for all of them coincide with a GNSS station that does not detect any movement. The P-SBAS algorithm was performed in DES orbit (Fig. 8) covering the period October 2016 to December 2020. Most of the landcover is bare land which exhibits high coherence among the SAR scenes and, therefore, the pixel coverage is also significant, except for the grey patch (no data) that correspond to the wetland. Movement away from the satellite is detected surrounding the Reserve area, with peak LOS rates of  $-4.5$  cm/year. Small areas of movement towards the satellite are also detected.

The FASTVEL algorithm was run with ASC (January 2017 to December 2020) and DES (October 2016 to February 2021) datasets with different coherence values, which are much more restrictive than the ones used in the other areas (Table 1 and Fig. 9). The reason is because the processes run in GEP failed with lower coherence values, that could be due to the big number of selected pixels in the highly coherent terrain surface. The pixel coverage is substantially reduced, however the

deformation area at the north of the Reserve is well detected in the four maps with mean velocity values and a spatial coverage similar to the P-SBAS results. The FASTVEL ASC result, which was done with the lowest coherence, exhibits a ramp in the South- North direction.



**Figure 7:** P-SBAS and FASTVEL mean LOS velocity (cm/y) maps of the West part of the Gediz basin (upper) and the Eastern part (lower). Reference point selected by the user is marked with a black triangle.



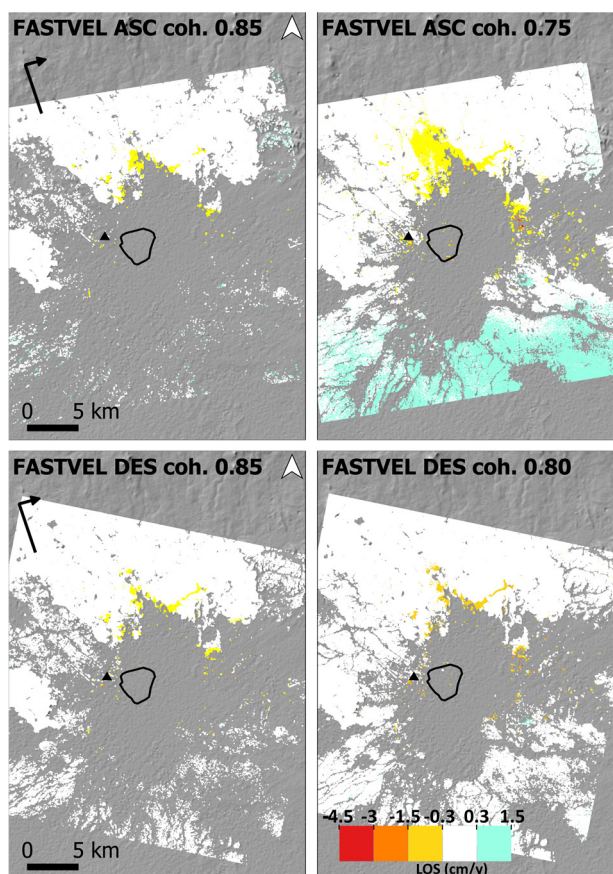
**Figure 8:** Mean LOS velocity map obtained with P-SBAS of the Azraq Wetland Reserve.

## 5. Discussion

In this section we will discuss the different performance of the two A-DInSAR algorithms used in this work and their versatility to generate preliminary land subsidence maps.



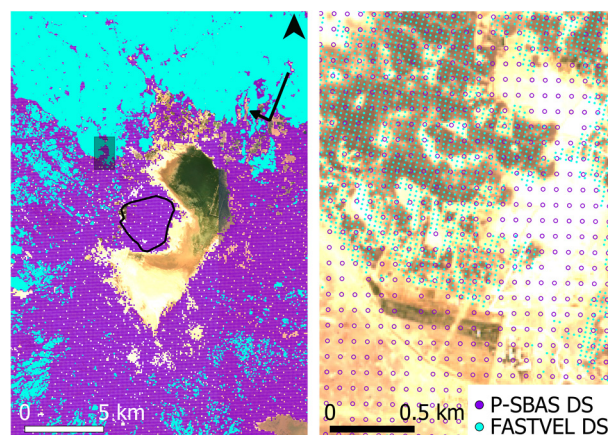
The most relevant difference is that P-SBAS provides LOS rates and LOS displacement time series, meanwhile FASTVEL only provides the former. However, GEP should be taken as an exploratory tool to obtain the mean LOS velocities, that are taken as preliminary results for the RESERVOIR project proposes. Although displacement time series (TS) obtained with P-SBAS have been used to interpret surface terrain deformation in previously studied areas where the geologic phenomena is well known (Cigna and Tapete 2021), we are cautious on their reliability for making precise analysis. The reason is that the processing chain runs without user supervision, which adds more uncertainty to the intrinsic limitations of the technique. For example, the criteria to discard or not certain interferograms is unknown and cannot be controlled. We have experienced that in general the FASTVEL algorithm discards more interferograms, as the metadata of the process reveals that the SAR images used for the LOS velocity calculations is less than the selected. FASTVEL gives to the user the option to change more parameters than P-SBAS (Section 3.2), however we have not performed a sensitivity test and the default values were used for all the analysis.



**Figure 9:** FASTVEL mean LOS velocity (cm/y) maps of the Azraq Wetland Reserve with ASC orbit dataset (upper) and DES orbit dataset (lower). Reference point selected by the user is marked with a black triangle.

Other important distinctions are the extent that can be processed, as already discussed in Section 3, and the processing time. For FASTVEL is around 24 hours (for 100 images in 30x30 km) and for P-SBAS is up to 48 hours (for 100 images in 80 x 250 km) plus the pre-ordering step in DIAS (20 S-1 SAR images per hour).

Both algorithms use the same method to create the stack of interferograms and also the same criterion to select the punctual targets in the interferograms in which the deformation will be computed. P-SBAS and FASTVEL use a small baseline configuration, where a denser interferogram network is created linking multiple SAR images (Multi-master). Is a coherence-based method that use distributed scatters (DS), or in other words, areas whose scatter properties are not altered with time. The coherence estimation requires a spatial average within a two-dimension window, usually named as multilook. The multilook processing allows to reduce noise at the expenses of a resolution loss (Mestre-Quereda *et al.* 2018). P-SBAS uses a multilook of 5 x 20 (azimuth x range) which generates pixels or DS size of about 90 x 90 m. On the other hand, FASTVEL DS size is 40x40 m, so the multilook applied, although not specified in the documentation of the Thematic Application, must be of around 2 x 5. The bigger pixel size of P-SBAS improves the spatial coverage, especially in non-urban areas (Fig. 10 left and Fig. 11 left). However, in very coherent locations, such as urban fabric, roads or even pathways, FASTVEL will provide more DS, because it has a higher resolution or smaller pixel size (Fig. 10 right and Fig. 11 right). The low resolution or bigger pixel size of the P-SBAS DS also allows the use of more restrictive coherence thresholds without compromising data coverage, as it has been experienced in all the pilot sites. Contrarily, to have a good spatial coverage with FASTVEL it is required to use a lower coherence threshold (around 0.50 to 0.55), which introduces noise, ramps and false uplifts in the results.



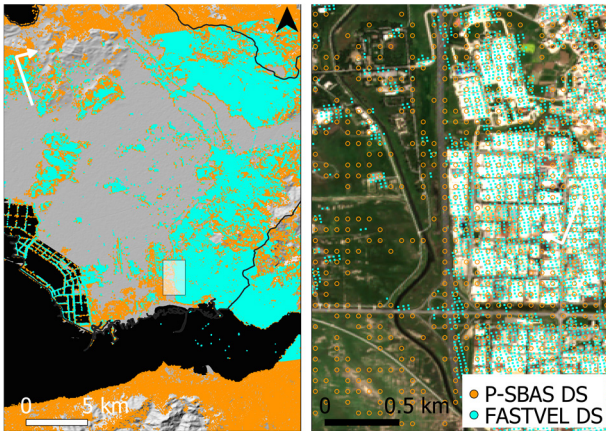
**Figure 10:** Comparison between DS spatial coverage (left) and DS density (zoomed rectangle at the right) from very similar SAR datasets processed with the two different algorithms in the Azraq Wetland Reserve. Land cover is characterized by bare land with no vegetation. DS are represented as points that would be at the centre of each pixel. Both SAR datasets have a DES orbit, same track and the same threshold coherence (0.85). Time period for P-SBAS is October 2016 to December 2020 (124 S1 images) and for FASTVEL October 2016 to February 2021 (125 S1 images).

## 6. Conclusions

We have obtained successful processes in GEP with both P-SBAS and FASTVEL algorithms in all the four pilot sites.

We could delimit clear moving areas that can be related to land subsidence in Alto Guadalentín, Gediz River Basin and Azraq Wetland Reserve pilot sites. The dense

agricultural coverage and the crops growing cycle in Comacchio pilot site, compromises the retrieval of reliable information. The results are consistent between ASC and DES modes and also between the algorithms, despite certain differences that have been addressed in Section 4 and discussed in Section 5.



**Figure 11:** Comparison between DS spatial coverage (left) and DS density (zoomed rectangle at the right) obtained with each algorithm in the western Gediz Basin, that has urban and agricultural land cover. Both datasets are ASC and from the same track. The threshold coherence is 0.85 for P-SBAS and 0.50 for FASTVEL. The time period is June 2017 to February 2021 for both datasets, using 111 S-1 images for P-SBAS and 60 for FASTVEL.

We have experienced that the lower coherence threshold (needed to have a good data coverage) of the FASTVEL processing's, introduce more noise and sometimes false uplifts.

For studying large areas P-SBAS is more suitable. We could retrieve a useful deformation picture of the entire Guediz Basin in Turkey. Other advantages are that those unknown hotspots outside the AOI can be detected, the spatial coverage is better (although it has a lower resolution) and displacement TS are also delivered.

The GEP tools used in this study have some limitations that need to be considered: the main drawback is that they are unsupervised processes, meaning they are a black box which compromises the reliability of the results to perform detailed interpretations. We neither assure the ability to reproduce the exact processing in the platform. Also, the server is sometimes unstable (disabling to run the jobs).

Nonetheless, we find that GEP tools are very useful for preliminary land subsidence analysis. All the technical resources are external, SAR images and algorithms are located together which simplifies the process, the interfaces are user friendly, and the processes are very fast (especially FASTVEL). As addressed by Cigna and Tapete (2021), the platform allows SAR Big Data processing by providing accessibility to a cloud/grid infrastructure and chains to process such huge datasets.

## Acknowledgements

This work was supported by RESERVOIR project, which is part of the PRIMA Programme supported under Horizon 2020 the European Union's Framework Programme for Research and Innovation. Grant Agreement number: [1924] [RESERVOIR] [Call 2019 Section 1 Water RIA].

Copernicus Sentinel-1 IW SAR data were provided and processed in ESA's Geohazards Exploitation Platform (GEP), in the framework of the GEP Early Adopters Programme.

## References

- ABED, A. M., 2018. Geological evolution of the Azraq basin, eastern Jordan: An overview. *Jordan Journal of Natural History*, **5**, pp. 6-52.
- ANTONELLINI, M., MOLLEMA, P., GIAMBASTIANI, B., BISHOP, K., CARUSO, L., MINCHIO, A., PELLEGRINI, L., SABIA, M., ULAZZI, E., and GABBIANELLI, G., 2008. Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology journal*, **16**(8), 1541.
- BÉJAR-PIZARRO, M., GUARDIOLA-ALBERT, C., GARCÍA-CÁRDENAS, R. P., HERRERA, G., BARRA, A., LÓPEZ MOLINA, A., TESSITORE, S., STALLER, A., ORTEGA-BECERRIL, J. A., and GARCÍA-GARCÍA, R. P., 2016. Interpolation of GPS and geological data using InSAR deformation maps: Method and application to land subsidence in the alto guadalentín aquifer (SE Spain). *Remote Sensing*, **8**(11), 965.
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R., and SANSOSTI, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **40**(11), pp. 2375-2383.
- BONÌ, R., HERRERA, G., MEISINA, C., NOTTI, D., BÉJAR-PIZARRO, M., ZUCCA, F., GONZÁLEZ, P. J., PALANO, M., TOMÁS, R., and FERNÁNDEZ, J., 2015. Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study. *Engineering Geology*, **198**, pp. 40-52.
- BONSIGNORE, F., CARATI, M., COSTANTINO, R., CRISTOFORI, D., ZACCANTI, G., BITELLI, G., VITTIUARI, L., FRANCI, F., LAMBERTINI, A., MARTELLI, L., and SEVERI, P., 2018. *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Seconda fase*. ARPAE Direzione Tecnica, Università di Bologna DiCAM, Regione Emilia-Romagna Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.
- BULUT, O. F., DURU, B., ÇAKMAK, Ö., GÜNHAN, Ö., DILEK, F. B., and YETIS, U., 2020. Determination of groundwater threshold values: A methodological approach. *Journal of Cleaner Production*, **253**, pp. 120001.
- CARBOGNIN, L., and TOSI, L., 1995. *Situazione altimetrica attuale del comprensorio veneziano ei suoi riflessi sull'ambiente lagunare*. Primo Convegno Del Gruppo Nazionale Di Geologia Applicata.



- CARMINATI, E., DOGLIONI, C., and SCROCCA, D., 2005. Magnitude and causes of long-term subsidence of the Po Plain and Venetian region. *Books*, **40**, pp. 10011-14211.
- CASTELLARIN, A., EVA, C., GIGLIA, G., VAI, G., RABBI, E., PINI, G., and CRESTANA, G., 1985. Analisi strutturale del fronte appenninico Padano. *Giornale di Geologia*, **47**(1-2), 3rd series, pp. 47-75.
- CASU, F., ELEFANTE, S., IMPERATORE, P., ZINNO, I., MANUNTA, M., DE LUCA, C., and LANARI, R., 2014. SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **7**(8), pp. 3285-3296.
- CERÓN, J. C., 1995. Estudio hidrogeoquímico del acuífero del Alto Guadalentín (Murcia). PhD: University of Granada, Granada, Spain, p. 265.
- CERÓN, J., and PULIDO-BOSCH, A., 1996. Groundwater problems resulting from CO<sub>2</sub> pollution and overexploitation in Alto Guadalentín aquifer (Murcia, Spain). *Environmental Geology*, **28**(4), pp. 223-228.
- CIGNA, F., and TAPETE, D., 2021. Sentinel-1 BigData Processing with P-SBAS InSAR in the Geohazards Exploitation Platform: An Experiment on Coastal Land Subsidence and Landslides in Italy. *Remote Sensing*, **13**(5), pp. 885.
- DE LUCA, C., CUCCU, R., ELEFANTE, S., ZINNO, I., MANUNTA, M., CASOLA, V., RIVOLTA, G., LANARI, R., and CASU, F., 2015. An on-demand web tool for the unsupervised retrieval of earth's surface deformation from SAR data: The P-SBAS service within the ESA G-POD environment. *Remote Sensing*, **7**(11), pp. 15630-15650.
- DSI, 2014. *Hydrogeological Study of the Gediz Watershed*. State Hydraulic Works of Turkey: Ankara, Turkey (in Turkish).
- EL-NAQA, A., 2010. Final Report Study of salt water intrusion in the Upper Aquifer in Azraq Basin. *IUCN-International Union for Conservation of Nature*.
- ESA 2021. User Guides - Sentinel-1 SAR - Interferometric Wide Swath - Sentinel Online - Sentinel (esa.int). <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> [6/22, 2021].
- EZQUERRO, P., GUARDIOLA-ALBERT, C., HERRERA, G., FERNÁNDEZ-MERODO, J. A., BÉJAR-PIZARRO, M., and BONI, R., 2017. Groundwater and subsidence modeling combining geological and multi-satellite SAR data over the alto guadalentín aquifer (SE Spain). *Geofluids*, **2017**.
- EZQUERRO, P., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., FERNÁNDEZ-MERODO, J., GUARDIOLA-ALBERT, C., STALLER, A., SÁNCHEZ-SOBRINO, J., and HERRERA, G., 2020. Improving multi-technique monitoring using Sentinel-1 and Cosmo-SkyMed data and upgrading groundwater model capabilities. *Science of The Total Environment*, **703**, 134757.
- FERNÁNDEZ, J., PRIETO, J. F., ESCAYO, J., CAMACHO, A. G., LUZÓN, F., TIAMPO, K. F., PALANO, M., ABAJO, T., PÉREZ, E., and VELASCO, J., 2018. Modeling the two-and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Scientific reports*, **8**(1), pp. 1-14.
- GALVE, J. P., PÉREZ-PEÑA, J. V., AZAÑÓN, J. M., CLOSSON, D., CALÓ, F., REYES-CARMONA, C., JABALOY, A., RUANO, P., MATEOS, R. M., and NOTTI, D., 2017. Evaluation of the SBAS InSAR service of the European space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP). *Remote Sensing*, **9**(12), 1291.
- GALLOWAY, D. L., and HOFFMANN, J., 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology: *Hydrogeology Journal*, **15**(1), pp. 133-154.
- GALLOWAY, D. L., HUDNUT, K. W., INGEBRITSEN, S., PHILLIPS, S. P., PELTZER, G., ROGEZ, F., and ROSEN, P., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, **34**(10), pp. 2573-2585.
- GIAMBASTIANI, B. M., ANTONELLINI, M., ESSINK, G. H. O., and STUURMAN, R. J., 2007. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *Journal of Hydrology*, **340**(1-2), pp. 91-104.
- GONZÁLEZ, P. J., and FERNÁNDEZ, J., 2011. Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry. *Geology*, **39**(6), pp. 551-554.
- MESTRE-QUEREDA, A., LOPEZ-SANCHEZ, J. M., BALLESTER-BERMAN, J. D., GONZALEZ, P. J., HOOPER, A., and WRIGHT, T. J., 2018. Evaluation of the Multilook Size in Polarimetric Optimization of Differential SAR Interferograms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **15**(9), pp. 1407-1411.
- PIERI, M., and GROPPA, G., 1981. Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy, Verlag nicht ermittelbar.
- RIGO, A., BÉJAR-PIZARRO, M., and MARTÍNEZ-DÍAZ, J., 2013. Monitoring of Guadalentín valley (southern Spain) through a fast SAR Interferometry method. *Journal of Applied Geophysics*, **91**, pp. 39-48.
- SIEBERT, S., BURKE, J., FAURES, J.-M., FRENKEN, K., HOOGEVEEN, J., DÖLL, P., and PORTMANN, F. T., 2010. Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, **14**(10), pp. 1863-1880.
- TEATINI, P., FERRONATO, M., GAMBOLATI, G., and GONELLA, M., 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, **42**(1).

- TERRADUE 2020. Tutorials — Geohazards Thematic Exploitation Platform 3.0 documentation (terradue.com). <https://docs.terradue.com/geohazards-tep/tutorials/index.html> [6/22, 2021].
- TOMÁS, R., ROMERO, R., MULAS, J., MARTURIÁ, J., MALLORQUI, J. J., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J., HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GONZÁLEZ, P., FERNÁNDEZ, J., DUQUE, S., CONCHA, A., COCKSLEY, G., CASTAÑEDA, C., CARRASCO, D., and BLANCO, P., 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain. *Environmental earth sciences*, **71**, pp. 163-181.
- TUBITAK-MAM, 2018. *Final Report of the Gediz River Basin Management Plan*. The Scientific and Technological Research Council of Turkey, Marmara Research Center, Institute for Environment and Cleaner Production. Gebze/KOCAELI, Turkey, 617 pp. (in Turkish).
- UNESCO, 2012. *World's Groundwater Resources Are Suffering from Poor Governance*. UNESCO Publishing: Paris, France.
- VITAGLIANO, E., RICCARDI, U., PIEGARI, E., BOY, J. P., and DI MAIO, R., 2020. Multi-component and multi-source approach for studying land subsidence in deltas. *Remote Sensing*, **12**(9), 1465.



## MONITORING CRITICAL INFRASTRUCTURE EXPOSED TO ANTHROPOGENIC AND NATURAL HAZARDS USING SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY

### MONITORIZACIÓ DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS EXPUESTAS A RIESGOS NATURALES Y ANTRÓPICOS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR DE SATÉLITE

Antonio Miguel Ruiz-Armenteros<sup>a,b,\*</sup>, José Manuel Delgado-Blasco<sup>a</sup>, Matus Bakon<sup>c,d</sup>, Milan Lazecky<sup>e,f</sup>, Miguel Marchamalo-Sacristán<sup>g</sup>, Francisco Lamas-Fernández<sup>h</sup>, Ana Ruiz-Constán<sup>i</sup>, Jesús Galindo-Zaldívar<sup>j</sup>, Carlos Sanz de Galdeano<sup>k</sup>, Sergio Martos-Rosillo<sup>l</sup>, Juraj Papco<sup>l</sup>, Daniele Perissin<sup>m,n</sup>, Joaquim J. Sousa<sup>o,p</sup>

<sup>a</sup> Grupo de investigación Microgeodesia Jaén, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas s/n, Edif. A3, 23071 Jaén, Spain. [amruiz@ujaen.es](mailto:amruiz@ujaen.es); [jdblasco@ujaen.es](mailto:jdblasco@ujaen.es)

<sup>b</sup> Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra (CEACTierra), Universidad de Jaén, 23071 Jaén, Spain

<sup>c</sup> insar.sk s.r.o., 08001 Presov, Slovakia. [matusbakon@insar.sk](mailto:matusbakon@insar.sk)

<sup>d</sup> Department of Environmental Management, University of Presov, 08001 Presov, Slovakia

<sup>e</sup> School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, United Kingdom. [M.Lazecky@leeds.ac.uk](mailto:M.Lazecky@leeds.ac.uk)

<sup>f</sup> IT4Innovations, VSB-TU Ostrava, Ostrava, Czechia

<sup>g</sup> Topography and Geomatics Lab., ETS ICCP, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain. [miguel.marchamalo@ump.es](mailto:miguel.marchamalo@ump.es)

<sup>h</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. [flamas@ugr.es](mailto:flamas@ugr.es)

<sup>i</sup> Instituto Geológico y Minero de España, 18006 Granada, Spain. [a.ruiz@igme.es](mailto:a.ruiz@igme.es); [s.martos@igme.es](mailto:s.martos@igme.es)

<sup>j</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. [jgalindo@ugr.es](mailto:jgalindo@ugr.es)

<sup>k</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), 18071 Granada, Spain. [csanz@ugr.es](mailto:csanz@ugr.es)

<sup>l</sup> Department of Theoretical Geodesy, Slovak Technical University STU Bratislava, Slovakia. [juraj.papco@stuba.sk](mailto:juraj.papco@stuba.sk)

<sup>m</sup> Raser Limited, Hong Kong, China. [daniele.perissin@sarproz.com](mailto:daniele.perissin@sarproz.com)

<sup>n</sup> CIRGEO, Università degli Studi di Padova, Padova, Italy

<sup>o</sup> Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal. [jj Sousa@utad.pt](mailto:jj Sousa@utad.pt)

<sup>p</sup> INESC Technology and Science (INESC-TEC), Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal

#### Abstract:

Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is a remote sensing technique very effective for the measure of small displacements of the Earth's surface over large areas at a very low cost as compared with conventional geodetic techniques. Advanced InSAR time series algorithms for monitoring and investigating surface displacement on Earth are based on conventional radar interferometry. These techniques allow us to measure deformation with uncertainties of 1 mm/year, interpreting time series of interferometric phases at coherent point scatterers (PS) without the need for human or special equipment presence on the site. By applying InSAR processing techniques to a series of radar images over the same region, it is possible to detect line-of-sight (LOS) displacements of infrastructures on the ground and therefore identify abnormal or excessive movement indicating potential problems requiring detailed ground investigation. A major advantage of this technology is that a single radar image can cover a major area of up to 100 km by 100 km or more as, for example, Sentinel-1 C-band satellites data cover a 250 km wide swath. Therefore, all engineering infrastructures in the area, such as dams, dikes, bridges, ports, etc. subject to terrain deformation by volcanos, landslides, subsidence due to groundwater, gas, or oil withdrawal could be monitored, reducing operating costs effectively. In this sense, the free and open access Copernicus Sentinel-1 data with currently up to 6-days revisit time open new opportunities for a near real-time land monitoring. In addition, the new generation of high-resolution radar imagery acquired by SAR sensors such as TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, and PAZ, and the development of multi-interferogram techniques has enhanced our capabilities in recent years in using InSAR as deformation monitoring tool. In this paper, we address the applicability of using spaceborne SAR sensors for monitoring infrastructures in geomatics engineering and present several cases studies carried out by our group related to anthropogenic and natural hazards, as well as monitoring of critical infrastructures.

**Key words:** InSAR, deformation monitoring, PS-InSAR, geomatics, subsidence, natural hazards, anthropogenic hazards

\* Corresponding Author: Antonio Miguel Ruiz-Armenteros, [amruiz@ujaen.es](mailto:amruiz@ujaen.es)

## Resumen:

La interferometría radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica de teledetección muy eficaz para medir pequeños desplazamientos de la superficie terrestre en grandes áreas a un coste muy pequeño en comparación con las técnicas geodésicas convencionales. Los algoritmos avanzados de series temporales InSAR para monitorizar e investigar el desplazamiento de la superficie terrestre se basan en la interferometría radar convencional. Estas técnicas nos permiten medir la deformación con incertidumbres de un milímetro por año, interpretando series temporales de fases interferométricas en retrodispersores puntuales coherentes (PS) sin necesidad de presencia humana o de equipos especiales en el sitio. Al aplicar técnicas de procesamiento InSAR a una serie de imágenes radar de la misma región, es posible detectar desplazamientos de infraestructuras proyectados en la línea de vista del satélite (line-of-sight o LOS) y, por lo tanto, identificar movimientos anormales o excesivos que indiquen problemas potenciales que requieran una investigación detallada del terreno. Una de las principales ventajas de esta tecnología es que una sola imagen radar puede cubrir un área importante de hasta 100 km por 100 km o más, ya que, por ejemplo, los datos de los satélites de banda C Sentinel-1 cubren una franja de 250 km de ancho. Por lo tanto, todas las infraestructuras civiles de la zona, como presas, diques, puentes, puertos, etc., sujetas a deformaciones del terreno por actividad volcánica, deslizamientos de tierra, hundimientos por extracción de agua subterránea, gas o petróleo, podrían ser monitorizados, reduciendo los costes operativos de manera efectiva. En este sentido, los datos Sentinel-1 de Copernicus, de acceso abierto, con hasta 6 días de tiempo de revisión actual abren nuevas oportunidades para una monitorización terrestre casi en tiempo real. Además, la nueva generación de imágenes radar de alta resolución adquiridas por sensores SAR como TerraSAR-X, COSMO-SkyMed y PAZ, y el desarrollo de técnicas multi-interferograma ha mejorado nuestras capacidades en los últimos años en el uso del InSAR como herramienta para el control de deformaciones. En este trabajo se aborda la aplicabilidad del uso de sensores SAR espaciales para la monitorización de infraestructuras civiles en ingeniería geomática y presentamos varios casos de estudio realizados por nuestro grupo relacionados con riesgos naturales y antrópicos, así como de monitorización de infraestructura crítica.

**Palabras clave:** InSAR, control de deformaciones, PS-InSAR, geomática, subsidencia, riesgos naturales, riesgos antrópicos

## 1. Introduction

Due to natural causes and human activities, the ground surface is constantly in motion. Many measurement techniques have been developed over time to study the Earth's surface deformation. Some of them, besides having different levels of accuracy, are time-consuming (e.g., classical surveys). In addition to classical surveys, the introduction of space-geodetic techniques like GNSS and the interferometric use of Synthetic Aperture Radar (InSAR) have offered new opportunities for precise deformation monitoring in geomatics engineering. In particular, using the InSAR technique large areas can be monitored providing ground displacements at relatively low cost when compared to leveling, for example.

Spaceborne InSAR is a well-known technology that has matured to a more and more standard tool as geomatic technique for measuring and monitoring the Earth's surface. Its use in certain applications is triggering its use in others (Ferretti 2014). This technique allows precise surface deformation measurements on large areas and high spatial density of measurement points, being one of the fastest developing research fields in remote sensing (Zhong *et al.* 2010). InSAR relies on the processing of two SAR images of the same portion of the Earth's surface obtained either from two slightly displaced passes of the SAR antenna at different times (repeat-pass interferometry), or from two antennas placed on the same platform and separated perpendicularly to the flight path (single pass SAR interferometry). However, despite the many successes of InSAR, problems due to changes in the scattering properties of the Earth's surface with time as well as the incidence angle of the radar look direction limit the applicability of the technique. This makes detection of slow deformation processes in particular, challenging to detect by standard InSAR techniques.

In the late 1990s, it was noticed that some radar targets maintain stable backscattering characteristics for a period of months or years (Usai 1997; Usai and Hanssen 1997), and the phase information from these stable targets (hereafter called Persistent Scatterers or PS) can be used, even over a long time period, profiting from a SAR scene archive in existence since 1991 (ERS-1) which allows the establishment of long time series of SAR images. This led to the development of time series SAR interferometry methodologies or, as they are also known, multi-interferogram techniques, considered nowadays standard tools for deformation measurements due to their ability to overcome the limitations of the conventional InSAR.

## 2. Spaceborne SAR Interferometry for remote monitoring of the Earth

InSAR, also referred to as SAR Interferometry, is the measurement of signal phase change over time. In recent years, spaceborne repeat-pass InSAR has received much attention for its ability to generate deformation maps with unprecedented accuracy (centimetre or millimetre level). SAR achieves relatively good resolution using a small radar antenna, which is an important issue when dealing with satellites that must be limited in size and power consumption. To achieve this high resolution, SAR uses the motion of the single radar antenna along a flight path (or orbit) to form a "synthetic antenna" that is much larger than the actual one. This improves the resolution of the radar along the trajectory (azimuth direction). To achieve a high resolution in the across track, or range direction, the radar uses a frequency modulated waveform and pulse compression to simulate a very short pulse, hence a high-resolution echo.

It is clear that the difficulties related to the estimation of surface deformation signals from a single SAR interferogram are essentially due to the presence of

decorrelation effects (contributing to the noise level), the impact of local topography on phase values and the presence of atmospheric phase components superimposed on the signal of interest. Unfortunately, using DInSAR, that is, a single interferogram, it is not possible to remove the atmospheric component. Thus, DInSAR should only be used on the understanding that deformation measurements are prone to errors arising from atmospheric circumstances. It can only measure total displacement between two points in time. Therefore, DInSAR is not able to distinguish between linear and non-linear motion. However, it is a powerful technique in describing the deformation pattern in many cases in geosciences. Nowadays, few days after any important earthquake the scientific community is able to show how the Earth was deformed which helps in modelling the coseismic deformation (see Marinkovic and Larsen 2016 as example). Despite these limitations, in the last two decades, DInSAR techniques have been demonstrating their potential as surface deformation measurement tools.

Recently, the capability of the multi-interferogram techniques has been considerably improved by using large stacks of SAR images acquired over the same area (Hooper *et al.* 2012). The use of multi-image datasets enables the identification of stable reflectors, the previously referred to as PS, which are points on the ground that consistently return stable signals to the satellite radar sensor. These PS allow ground displacement velocities to be measured with millimeter accuracy (Marinkovic *et al.* 2008; Adam *et al.* 2009; Peltier *et al.* 2010; Ferretti *et al.* 2011). PS typically correspond to objects on man-made structures such as buildings, bridges, dams, water-pipelines, antennae, as well as to stable natural reflectors (e.g., exposed rocks).

Unlike optical systems that rely on reflected solar radiation or thermal radiation emitted by Earth, imaging radar instruments work independently of light and heat (Rosen *et al.* 2000; Hanssen 2001). Therefore, SAR sensors can provide day-and-night imagery of Earth independently of weather conditions. In the last three decades, with particular emphasis on the last one, various space agencies have undertaken missions for Earth observation with microwave SAR sensors. The main spaceborne SAR sensors used for deformation monitoring include the ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/1B (C-band) from ESA (Europe), J-ERS-1, ALOS/PALSAR, and ALOS-2 (L-band) from JAXA (Japan), Radarsat-1 and Radarsat-2 C-band (CSA, Canada), TerraSAR-X and TanDEM-X (X-band) from DLR/Astrium (Germany), COSMO-SkyMed-1/4 constellation (X-band) from ASI/MiD (Italy), the Spanish PAZ (Hisdesat), and KOMPSAT-5 (X-band) (KARI, Korea). Among all of them, the Sentinel-1 is the first (civilian) sensor specifically designed for surface deformation monitoring over large areas with a free, full and open data policy adopted for the Copernicus programme.

The typical horizontal spatial resolution, obtained via current SAR satellites, ranges from 0.25 (e.g., TerraSAR-X in staring spotlight mode) to 150 m, and resolutions typically used for InSAR are between 3 (even lower) and 30 m. The high resolution SAR data of the new SAR sensors like TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, PAZ, and Radarsat-2 increase significantly the level of details visible in the SAR images. The detection and mapping of

buildings, city structures and infrastructure like roads and railways, dams, etc. is possible. These features are of interest for mapping and monitoring purposes.

Multi-interferogram techniques, as explained before, are extensions of conventional DInSAR aimed at addressing the problems caused by decorrelation and atmospheric delay. These techniques involve the simultaneous processing of multiple SAR acquisitions over the same area to allow for the correction of uncorrelated phase noise terms and hence, reduce errors associated with the deformation estimates. MT-InSAR is the collective term used within the InSAR community to distinguish between single interferogram DInSAR and the second generation of InSAR technologies. The first of these methods to appear, in 1999, was the Permanent Scatterer algorithm (PSInSAR™) (Ferretti *et al.* 2000, 2001). The interferogram is at the core of all MT-InSAR technologies and the main driver for their development was the need to overcome the errors introduced into signal phase values by atmospheric artifacts. These limitations are tackled by using phase behavior in time to select pixels where decorrelation noise is minimized. Then the non-deformation signal is estimated by a combination of modeling and filtering of the time series. The MT-InSAR algorithms fall into two broad categories, the first being Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR or PSI) and the second being the more general Small BAseline (SBAS) approach. Each of these sets of methods is designed for a specific type of scattering mechanism. PSI algorithms operate on a time series of interferograms all formed with respect to a single “master” SAR image. The detection of resolution cells exhibiting only small reflectivity changes is a key step in every PSI algorithm and is essentially done by assessment of the phase portion associated with noise. In order to isolate the phase noise, assumptions about the spatio-temporal behavior of all other phase contributions have to be made. While general principles apply for most of the phase contributions, the deformation often requires a specific modeling. In some approaches a functional time dependent model is assumed and fitted to the time series of every PS (Adam *et al.* 2003; Crosetto *et al.* 2003; Ferretti *et al.* 2001; Kampes 2005; Lyons and Sandwell 2003). Alternatively, one may assume the deformation to be spatially correlated (Hooper *et al.* 2004). Spatial filtering is applied to estimate the spatially-correlated terms, including the deformation, atmospheric, and orbit error phase, for each PS candidate. The spatially-correlated phase is subtracted and the residual contribution from DEM error in the remaining phase is modeled for the whole time series, with the residual between the phase and the model providing an estimate of the noise for the pixel. For resolution elements containing no dominant scatterer, phase variation due to decorrelation is often large enough to obscure the underlying signal. However, by forming interferograms only between images separated by a short time interval and with a small difference in look and squint angle, decorrelation is minimized, and for some resolution elements can be small enough that the underlying signal is still detectable. Pixels for which the filtered phase decorrelates little over short time intervals are the targets of SBAS methods (Berardino *et al.* 2002; Hooper 2008; Lanari *et al.* 2004). SBAS methods can achieve uncertainties similar to the PSI techniques, on the order of ~1 mm/year (Lanari *et al.* 2007), although this again depends on the number of images, the time over which the images are acquired and the distance from the



reference point or area. With the advent of an even more advanced MTI processing technique, that combines both PSI and SBAS methodologies (Hooper 2008; Ferretti *et al.* 2011; Perissin and Wang 2012a, 2012b) these sensors have been used to monitor deformation from a large array of natural and man-made structures including large scale structures such as dams and dikes. The several tests carried out using different types of structures have served to establish standard procedures for structures monitoring using interferometric techniques and allowed to conclude that C-band, despite its coarse spatial and temporal resolutions (Sentinel-1 is considerably improved this status), is capable of being used in monitoring major structures, including dams.

Regardless of the method used, all measurements are made in the satellite line-of-sight or LOS direction, that is, only the projection of the 3D ground deformation along the LOS direction can be measured. Furthermore, this technique only provides relative measurements referred spatially to a reference point or stable area selected in the processing crop, and temporally to a specific acquisition date inside the analyzed dataset. Only if ascending and descending data are available over the processed area in the same time windows, truly vertical and East-West displacements can be separately resolved. Once the data have been analyzed, it is possible to develop the history of movement across the area of interest (time series of deformation). This is achieved by sequentially calculating the relative displacement between an individual radar target and the reference point, throughout the entire period of the analysis. Thus, the deformation is relative in time and space. Much research has been done to study the accuracy, potentials and limitations of this technique with respect to a large variety of applications. Crosetto *et al.* (2016), Osmanoğlu *et al.* (2016) and Ho Tong Minh *et al.* (2020) offer a review of these multi-interferograms algorithms.

In conclusion, monitoring methods have different features and should be used in different situations. Airborne and spaceborne methods should be used for systematic monitoring of civil infrastructures, and in case of a suspicious results, more sensible/accurate methods should be used (sensors, ground-based methods, leveling), depending on the nature of the problem.

### 3. Case studies

In this section we present some case studies performed by the authors to show the feasibility of MT-InSAR and where this technology has been successfully applied for monitoring some areas and infrastructures.

#### 3.1. Dam monitoring

As a first case study, we show the feasibility of MT-InSAR techniques to dam deformation monitoring. These case studies belong to the ReMoDams initiative, a research Spanish project devoted to the application of MT-InSAR techniques for monitoring the structural stability of embankment dams from space using satellite radar data.

##### 3.1.1. La Viñuela dam (Malaga, Spain)

The Reservoir of La Viñuela is located on the Guaro River, in the municipality of La Viñuela (province of Málaga, southern Spain) (Fig. 1). It controls the waters of

the hydrographic network of the region of La Axarquía and was built to supply drinkable water to the region, to improve the irrigated lands as well as flood lamination. The Guaro River is born in Periana and receives waters from its tributaries, the Sabar, Benamargosa, and Salia Rivers.

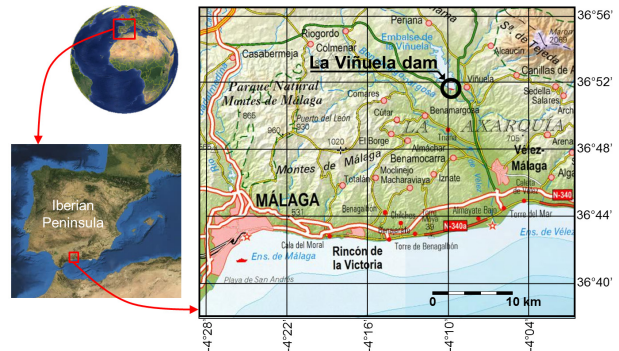


Figure 1: Location of La Viñuela dam in the province of Málaga (southern Spain).

The basin of La Viñuela reservoir has an own surface of 119 km<sup>2</sup>, an average yearly rainfall of 893 mm and an average yearly contribution of 25 km<sup>3</sup>. The reservoir is made of loose materials (embankment dam), having a coronation length of 460 m, and heights of 96 m over foundations and of 90 m over the riverbed. It presents a chute spillway with frontal lobe in arch with a pouring length of 30 m and a maximum flow of 382 m<sup>3</sup>/s. The bottom drainage consists of a detour tunnel with tow pipes discharging a maximum of 70 m<sup>3</sup>/s. The Reservoir of La Viñuela has a surface of 565 ha and a capacity of 170 hm<sup>3</sup>. The construction of the dam started on October 22<sup>nd</sup>, 1982 and finished in 1989, although it filled completely first in 1998.

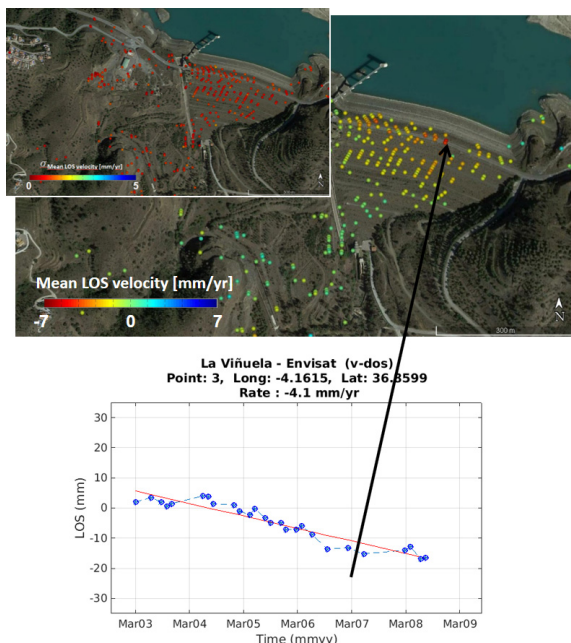
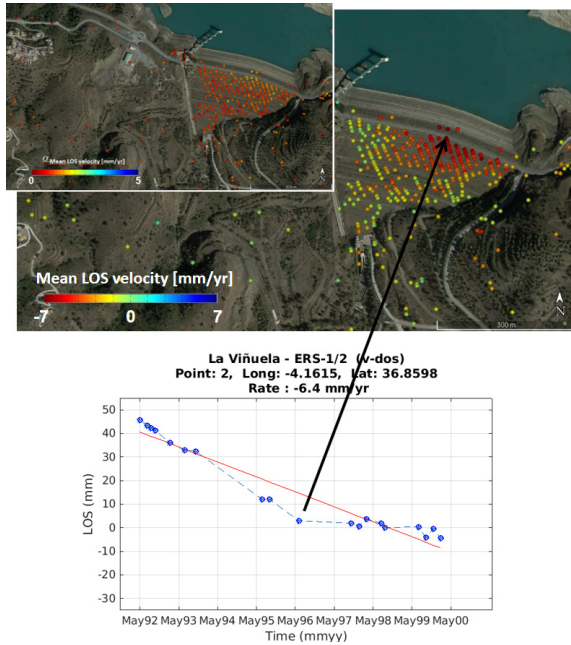
The dam was analyzed using C-band radar data (~5.7 cm wavelength) from the European satellites ERS-1/2, ERS-1/2, and Sentinel-1A/B (Ruiz-Armenteros *et al.* 2018a). 24 SLC ERS-1/2 SAR images were used, corresponding to descending orbits (track 51) acquired between May 5<sup>th</sup>, 1992 and January 28<sup>th</sup>, 2000 with an incident angle of 23° and a 5x25 m nominal spatial resolution. Due to ERS-2 on-board gyroscope failure on January 2001, only images until the end of 2000 were selected to avoid high Doppler centroid differences of more than the critical value of 700 Hz. The SLC Envisat ASAR dataset is composed of 27 images acquired from March 21<sup>st</sup>, 2003 to August 1<sup>st</sup>, 2008, along ascending orbits (track 459), with an incidence angle of 23° at the middle swath IS2, and a 5x25 m nominal pixel dimension. The Sentinel-1A/B SAR dataset is formed by 126 SLC IW images (86 Sentinel-1A and 40 Sentinel-1B) acquired in descending orbits from November 16<sup>th</sup>, 2014 to February 28<sup>th</sup>, 2018.

The ERS-1/2 and Envisat datasets were processed using StaMPS-MTI, combining the PSI and SBAS techniques. On the other side, Sentinel-1 data was processed using SARPROZ (Perissin 2015) and IT4S1 approach (ISCE+StaMPS/SALSIT) with the standard PSI technique.

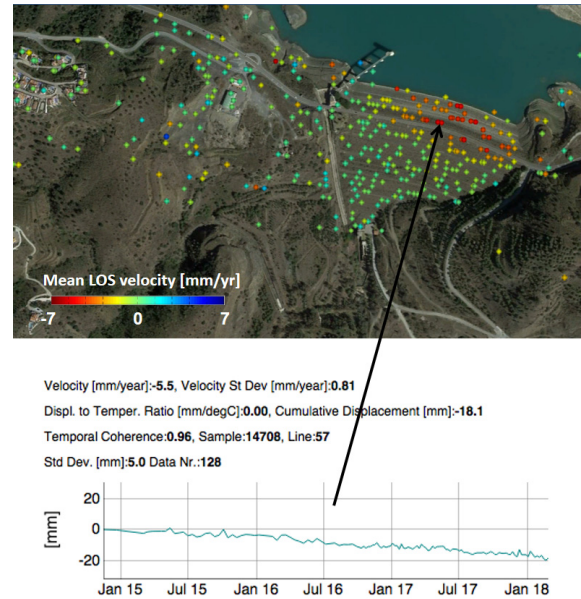
Figure 2 shows the mean LOS velocity maps derived from StaMPS-MTI for ERS-1/2 (May 1992-January 2000) and Envisat (March 2003-August 2008) processing. In the



case of ERS-1/2, a subsidence pattern can be clearly seen with maximum subsidence around -7 mm/year on the dam crest. In the Envisat period, the subsidence pattern is lower, with maximum subsidence in the order of -4 mm/year. Finally, for Sentinel-1 data, the standard PS-InSAR approach from SARPROZ with the linear model assumption for the deformation estimates confirmed that the investigated area of the dam body is prone to subsidence of up to -6 mm/year (LOS velocity) in the whole monitoring period (November 2014 – February 2018) (Fig. 3).



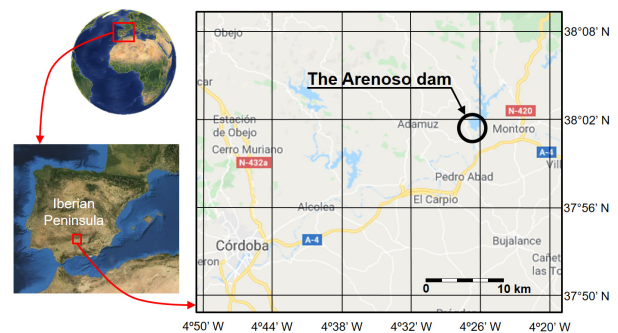
**Figure 2:** Mean LOS velocity and its standard deviation for ERS-1/2 (1992-2000) (a) and Envisat (2003-2008) (b) processing. One time-series, representative of the deformation, is plotted for each processing.



**Figure 3:** Mean LOS velocity for Sentinel-1A/B (2014-2018) processing using SARPROZ. One time-series representative of the deformation is plotted.

### 3.1.2. El Arenoso dam (Cordova, Spain)

The Arenoso dam (Montoro, Cordova, S Spain) is an embankment dam located in the Arenoso riverbed, a tributary of the Guadalquivir River with a capacity of 167 hm<sup>3</sup> and a basin of 405 km<sup>2</sup> (Fig. 4). The dam has a maximum height of 80 m, a crest length of 1.481 m and a coronation width of 11,30 m with impervious core, filters and rock fill shoulders. More than 3 million m<sup>3</sup> of materials were used for the construction, which started in April 2004 and finished in November 2006 with the first filling of the dam. It is used both for irrigation and energy production in the Guadalquivir basin. The Arenoso reservoir belongs to the Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

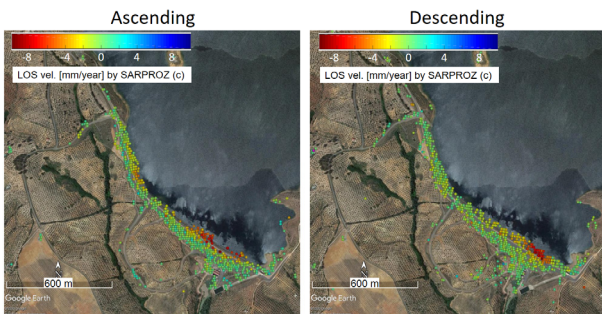


**Figure 4:** Location of The Arenoso dam in Montoro, province of Cordova (southern Spain).

In this case, we used Sentinel-1A/B C-band SAR data from the Interferometric Wide (IW) swath mode acquired using the Terrain Observation with Progressive Scan that allows wide area coverage with a size of 240 km x 170 km per image. We selected the vertical polarization VV and processed two independent sets of Sentinel-1A/B SAR images acquired along ascending and descending orbits. The ascending set is from Track 74 and sub-swath 3. It is composed by 194 SAR images (120 S1A and 74 S1B) from March 3<sup>rd</sup>, 2015 to February 28<sup>th</sup>, 2019. On the other side, the descending set belongs to Track 81 and sub-

swath 3 as well. It is composed by 188 (116 S1A and 72 S1B) SAR images acquired from November 16<sup>th</sup>, 2014 to March 1<sup>st</sup>, 2019. The incidence angles in both sub-swaths are close to 44°. The spatial resolution for these SLC IW images with this incidence angle is 3.4x22 m (range x azimuth) with a ground sampling of 3.3x13.9 m (range x azimuth). For processing the data, we used the standard linear PS-InSAR technique to generate time series of deformation as implemented in SARPROZ.

Due to the characteristics of the region, fully covered by olive-tree plantings, almost no PS pixels were detected in the area surrounding the dam body, but a considerable density of coherent PS points over the dam allows the establishment of a long-term MT-InSAR monitoring system. Figure 5 shows the mean LOS velocity maps for both ascending and descending datasets. The general picture is quite similar. According to the depicted patterns, both tracks indicate the presence of a subsiding sector in the crest of the dam reaching linear values of the order of  $-(8-10)$  mm/year which represent cumulative displacement in the LOS direction up to about  $-40$  mm in 4 years. As both LOS velocity maps show a similar pattern, it could indicate that the main movement of the dam is in the vertical direction with little horizontal component, what is coherent with dam typology. Combining both ascending and descending LOS velocity maps, the displacement vector can be decomposed in the true horizontal E-W and vertical components. This decomposition can be seen in Figure 6 confirming that the main movement component of the dam is in the vertical direction (Ruiz-Armenteros *et al.* 2021).



**Figure 5:** Mean LOS velocity for the ascending and descending datasets for The Arenoso dam in Montoro, province of Cordova (southern Spain), November 2014 - March 2019.

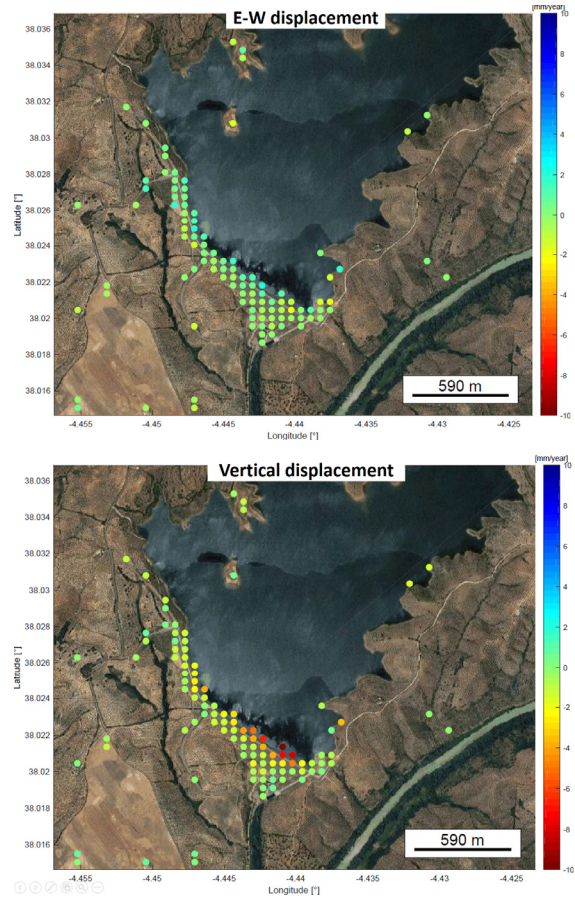
### 3.2. Urban and aquifers monitoring

Here we present two case studies centered in Valencia and Malaga (Spain) where some deformations were identified associated to aquifer overexploitation due to excessive use of groundwater, and others corresponding to local infrastructures.

#### 3.2.1. Valencia

For this case, we used two datasets from the European Space Agency remote sensing satellites ERS-1/2 and Envisat to detect ground deformation in the northern sector of the Valencia basin (Valencia city and its surroundings), in east Spain, using PS-InSAR. 35 ERS-1/2 SAR and 35 Envisat ASAR images were processed using the PSI standard approach with StaMPS. The ERS images were acquired between April 1993 and January 2000, along descending orbits (track 466), with an incidence angle of 23° and a 5x25 m nominal spatial

resolution. The Envisat images were acquired between March 2003 and August 2010, along descending orbits as zell (same track as ERS-1/2), with an incidence angle of 23° at the central middle swath IS2, and a 5x25 m nominal pixel dimension.



**Figure 6:** Mean velocity maps for the E-W and vertical displacements of the Arenoso dam in the period November 2014 - March 2019.

Figures 7 and 8 show the mean LOS velocities derived from ERS-1/2 (1993-2000) and Envisat (2003-2010) processing respectively. The ground motion estimated with PS-InSAR in the Valencia basin reveals some interesting subsidence patterns in three areas with rates up to  $-5$  mm/year (Ruiz-Armenteros *et al.* 2018b). The first is the Valencia harbor area (Fig. 9). In addition, some neighborhoods at the north and east of the harbor such as Benimaclet, Algirós, Poblados Marítimos, or the area of the Polytechnic University of Valencia show a subsiding behavior with a similar rate than in the harbor. The second area consists of a subsidence bowl located between W of Torrent and SE of Lorguilla villages (Fig. 10a). Particularly, it corresponds to a cultivated field area and also to industrial areas as those located in the north part (Oliveral Transmolbo) and in the east (NW of Torrente). Finally, the third area is located around 14 km NE of Valencia city, between L'Elia and San Antonio de Benagéber (Fig. 10b), and corresponds to residential areas. Most of the detected subsidence could be related to human induced activities such as excessive water consumption provoking over exploitation of aquifers and compaction of the ground. In any case, this is just a hypothesis and the causes of these subsidence patterns are being investigated. In the case of the harbor, some



subsidence correspond to areas of recent anthropic landfill gained to the sea to expand port facilities. Currently, these areas are also being monitored using Sentinel-1A/B to detect the most recent displacements.

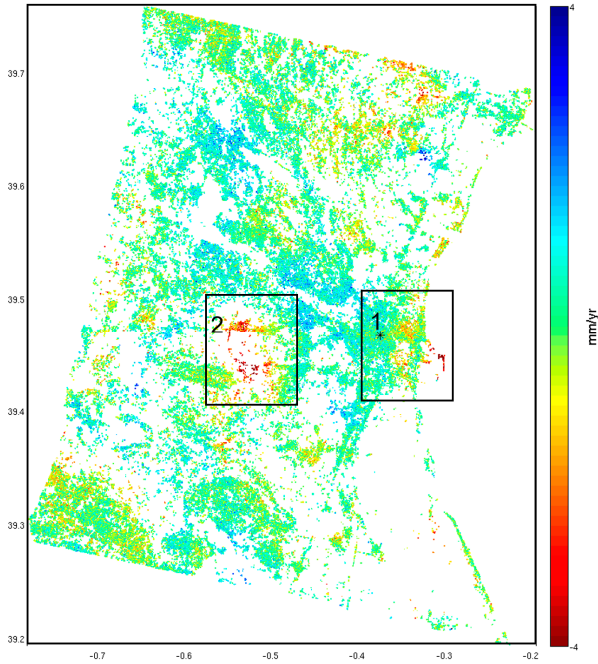


Figure 7: Mean LOS velocity from ERS-1/2 (1993-2000) in the Valencia basin.

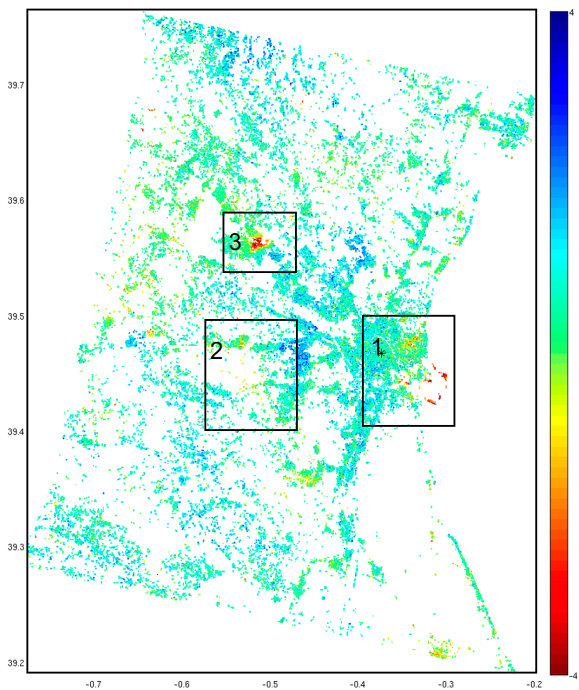


Figure 8: Mean LOS velocity from Envisat (2003-2010) in the Valencia basin.

### 3.2.2. Malaga province

In this case study, we analyzed the subsidence behavior of a coastal area in the province of Malaga (Costa del Sol), southern Spain, in the period 1992-2018 using C-band SAR interferometry. The area comprises several zones of interest where continuous deformation has

happened during the analyzed period. Using SAR data from ESA ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/B satellites, and MT-InSAR methods we detected and monitored subsidence in highly populated and industrial areas, airport, harbor, as well as local instabilities over a railway line and a highway. In a previous work (Ruiz-Constán *et al.* 2018), we reported a subsidence due to intensive use of groundwater in some populated towns in this area in the period 1992-2009, with maximum line-of-sight (LOS) rates of the order of  $-11$  mm/year. Using Sentinel-1A/B data, we confirmed the subsidence trend of previous period. Furthermore, we detected an increase in the deformation rates for the most recent period (2014-2018), suggesting that the overexploitation of the aquifers has not ceased.

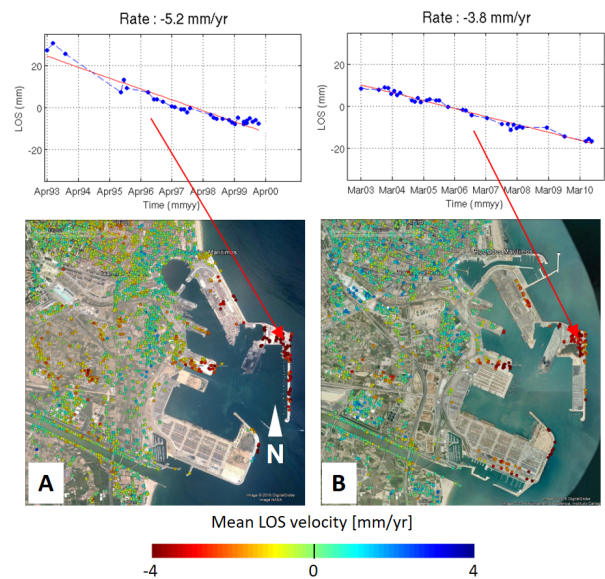


Figure 9: Mean LOS velocity from ERS-1/2 (A) and Envisat (B) in the Valencia harbor (right part of area 1 in Figures 7 and 8).

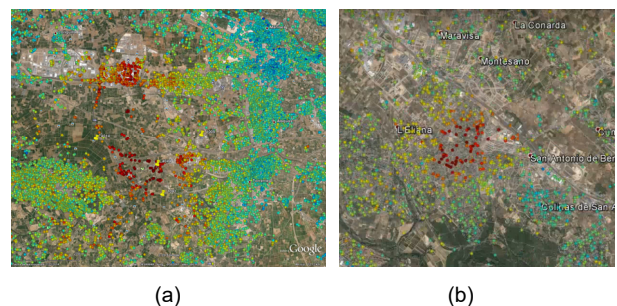
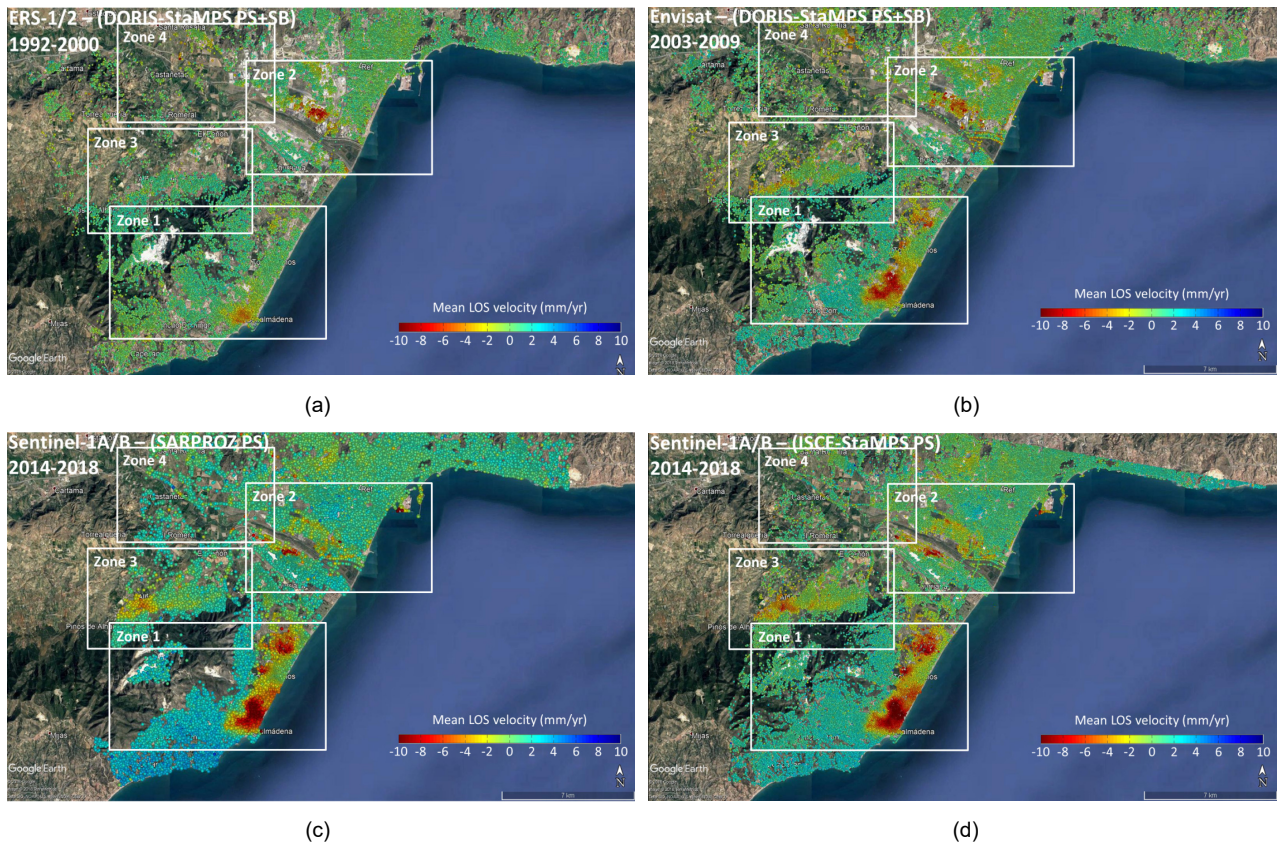


Figure 10: Mean LOS velocity from: a) ERS-1/2 between Torrent and Lorguilla villages (area 2 in Figure 7); b) Envisat between L'Elia and San Antonio de Benagéber villages (area 3 in Figure 8). The color bar is the same than in Figure 9.

The SAR dataset used in this case was composed of 176 images acquired by three C-band ( $\sim 5.7$  cm wavelength) satellites sensors, covering the total time period from May 1992 to February 2018. We used 30 ERS-1/2 SLC SAR images (ascending orbits, track 230) with an incident angle of  $23^\circ$  and a  $5 \times 25$  m nominal spatial resolution (azimuth x range), 20 Envisat ASAR images (ascending orbits - track 230), acquired with an incidence angle of  $23^\circ$  at the middle swath IS2, and a  $5 \times 25$  m nominal pixel dimension (azimuth x range), and 126 Sentinel-1A/B IW SLC SAR images (86 Sentinel-1A and 40 Sentinel-1B,

acquired in descending orbits) with an incidence angle of 37-39° in the center of sub-swath 2 and a pixel spacing of 2.3x14.1 m (range x azimuth). ERS-1/2 and Envisat datasets were processed using StaMPS, more specifically its extended version (StaMPS-MTI) that includes the combination of PSI and SABS. Sentinel-1A/B data were processed using the PS-InSAR method implemented in SARPROZ and also using the IT4S1 approach, where the data were specifically preprocessed using the InSAR Scientific Computing Environment (ISCE) and afterwards, the interferometric combinations were prepared for PSI processing using StaMPS (Ruiz-Armenteros *et al.* 2018c).

Figure 11 shows the mean LOS velocity maps derived from ERS-1/2 (1992-2000), Envisat (2003-2009), Sentinel-1A/B SARPROZ (2014-2018), and Sentinel-1A/B ISCE-StaMPS processing, related to the reference area located in the city of Málaga. In general, we found different subsiding areas but with different deforming rates depending on the analyzed period. The first area (zone 1 in Figure 11) corresponds to Torremolinos and Benalmádena towns close to the coast where we already presented the results of a subsidence bowl in this area for the period 1992-2009. Extending the analysis until 2018, we detected that the subsidence bowl has increased for the period 2014-2018, which denotes that an intensive use of the underground water could be still taking place.



**Figure 11:** Mean LOS velocity maps for the study area. a) ERS-1/2 (1992-2000); b) Envisat (2003-2009); c) Sentinel-1A/B SARPROZ (2014-2018); d) Sentinel-1A/B ISCE-StaMPS.

The second area (zone 2 in Figure 11) reveals the subsidence occurred in the industrial area (Polígono Industrial Guadalhorce) located southwest of Malaga city. This can be clearly seen in the ERS-1/2 and Envisat periods but lately, it seems to be displaced to the south as it is evidenced by the Sentinel-1A/B analysis, affecting even the Malaga international airport (Málaga-Costa del Sol airport). In addition, we detected some subsidence in the harbor during the Envisat period, having been stabilized at a later time as it is evidenced by the Sentinel-1A/B analysis. However, a new small area appeared to be prone to subsidence, corresponding to the most recent reclaimed land for expanding port facilities.

Finally, the third area (zone 3 in Figure 11), revealed another subsidence bowl located in a residential area located in Alhaurín de la Torre village. As with Torremolinos-Benalmádena area, the deformation in Alhaurín de la Torre appears to be increasing with time as

revealed by the evolution of the subsidence pattern during the three analyzed periods. Additionally, we detected a small subsidence, slightly with ERS-1/2 and increased with Envisat, between the north of Castañetas and east of Santa Rosalía, two neighborhoods of Málaga city (20 km from the center) located in the district of Campanillas and very close to the banks of the Guadalhorce River (zone 4 in Figure 11). This subsidence now appears to have been stabilized in the Sentinel-1A/B period. Furthermore, during the last analyzed period (2014-2018), some instabilities were detected in the railway line and in a highway near Málaga.

#### 4. Conclusions

In this work, we present the applicability of satellite radar interferometry for deformation studies in geomatics engineering. Today, InSAR technology can be considered



a consolidated technique whose effectivity for deformation studies has been widely proved in many cases. For infrastructure monitoring, if there is SAR data available of the study area, the technique is demonstrated to be of high value at a very low cost as compared with classical geodetic monitoring techniques. In case of other geotechnical or geodetic data are available, it can be successfully complemented.

We also illustrate the potential of SAR long time series scenes and the MT-InSAR technique for deformation monitoring in some important infrastructures such as dams, ports, transport lines, and urban constructions where the authors have identified deformation areas using medium resolution C-band SAR data from ERS-1/2, Envisat and Sentinel-1A/B satellites. The continuous processing of InSAR information could be successfully integrated in regular structural monitoring programs as a component of the implementation of early warning systems.

### Acknowledgements

ERS-1/2 and Envisat datasets were provided by the European Space Agency (ESA). Sentinel-1A/B data were

freely provided by ESA through Copernicus Programme. Data have been processed by DORIS (TUDelft), StaMPS (Andy Hooper), SARPROZ (Copyright (c) 2009-2020 Daniele Perissin), and SNAP (ESA). The satellite orbits are from TUDelft and ESA, as well as from the ESA Quality Control Group of Sentinel-1. Research was supported by [ESA Research and Service Support] for providing hardware resources employed in this work; [Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness] under ReMoDams project ESP2017-89344-R (AEI/FEDER, UE); [University of Jaén (Spain)] under PAIUJA-2021/2022 and CEACTEMA; [Junta de Andalucía (Spain)] under RNM-282 research group; [ERDF through the Operational Programme for Competitiveness and Internationalisation - COMPETE 2020 Programme] within project «POCI-01-0145-FEDER-006961»; [National Funds through the FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Portuguese Foundation for Science and Technology)] as part of project UID/EEA/50014/2013; [The Ministry of Education, Youth and Sports from the National Programme of Sustainability (NPU II)] under project «IT4Innovations excellence in science - LQ1602» (Czech Republic); and [Slovak Grant Agency VEGA] under projects No. 2/0100/20.

### References

- ADAM, N., KAMPES, B., EINEDER, M., WORAWATTANAMATEEKUL, J., and KIRCHER, M., 2003. The development of a Scientific Permanent Scatterer System. *ISPRS Hannover Workshop Proceedings*.
- ADAM, N., PARIZZI, A., EINEDER, M., and CROSETTO, M., 2009. Practical persistent scatterer processing validation in the course of the Terrafirma project. *Journal of Applied Geophysics*, **69**(1), pp. 59–65.
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R., and SANSOSTI, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(11), pp. 2375–2383.
- CROSETTO, M., ARNAUD, A., DURO, J., BIESCAS, E., and AGUDO, M., 2003. Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data. *Proc., 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., DEVANTHÉRY, N., and CRIPPA, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, May, pp. 78-89.
- FERRETTI, A., PRATI, C., and ROCCA, F., 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**(5), pp. 2202-2212.
- FERRETTI, A., PRATI, C., and ROCCA, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(1), pp. 8-20.
- FERRETTI, A., TAMBURINI, A., NOVALI, F., FUMAGALLI, A., FALORNI, G., and RUCCI, A., 2011. Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring. *Energy Procedia*, **39**(1), pp. 8-20.
- FERRETTI, A., 2014. Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space, *EAGE Publications*.
- HANSEN, R.F., 2001. *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 pp.
- HOOPER, A., ZEBKER, H., SEGALL, P. and KAMPES, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, **31**(23). DOI:10.1029/2004GL021737
- HOOPER, A., 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, **35**, L16302.
- HOOPER A., BEKAERT D., SPAANS K., and ARIKAN M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, **514**, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
- HO TONG MINH, D., HANSEN, R., and ROCCA, F., 2020. Radar Interferometry: 20 years of Development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, **12**, 1364. DOI:10.3390/rs12091364
- KAMPES, B., 2005. *Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry*. Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

- LANARI, R., MORA, O., MANUNTA, M., MALLORQUI, J.J., BERARDINO, P., and SANSOSTI, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **42**(7), pp. 1377–1386.
- LANARI, R., CASU, F., MANZO, M., ZENI, G., BERARDINO, P., MANUNTA, M., and PEPE, A., 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics*, **164**(4), pp. 637–661.
- LYONS, S., and SANDWELL, D., 2003. Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research*, **108**(B1), pp. 2047–2070.
- MARINKOVIC, P., KETELAAR, V.B.H., VAN LEIJEN, F.J., and HANSSEN, R.F., 2008. InSAR quality control: analysis of five years of corner reflector time series. In: *Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07'*, Frascati, Italy, 26 Nov-30 Nov 2007, Noordwijk, pp. 1-8. ESA Communication Production Office.
- MARINKOVIC, P., and LARSEN, Y., 2016. Mapping and analysis of the Central Italy Earthquake (2016) with Sentinel-1 A/B interferometry. *Zenodo*. DOI 10.5281/zenodo.61133
- OSMANOĞLU, B., SUNAR, F., WSOWINSKI, S., and CABRAL-CANO, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, May, pp. 90-102.
- PELTIER, A., BIANCHI, M., KAMINSKI, E., KOMOROWSKI, J.-C., A. RUCCI, and STAUDACHER, T., 2010. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. *Geophysical Research Letters*, **37**, L12301. DOI: 10.1029/2010GL043846
- PERISSIN, D. and WANG, T., 2012a. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **50**, pp. 271-280.
- PERISSIN, D. and WANG, T., 2012b. Time-series InSAR applications over urban areas in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **4**(1), pp. 92-100.
- PERISSIN, D., 2015. "SARPROZ software". SARPROZ © – The SAR PROcessing tool by periZ. Available: <https://www.sarproz.com/> [7/02, 2021]
- ROSEN, P., HENSLEY, S., JOUGHIN, I., LI, F., MADSEN, S., RODRIGUEZ, E., and GOLDSTEIN, R., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. In: *Proceedings of the IEEE*, **88**(3), pp. 333–382.
- RUIZ-ARMENTEROS, A.M., LAZECKY, M., HLAVÁČOVÁ, I., BAKOŇ, M., DELGADO, J.M., SOUSA, J.J., LAMAS-FERNÁNDEZ, F., MARCHAMALO, M., CARO-CUENCA, M., PAPCO, J., and PERISSIN, D., 2018a. Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). *Procedia Computer Science*, **138**, pp. 346-353. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.049
- RUIZ-ARMENTEROS, A.M., DELGADO, J.M., BALLESTEROS-NAVARRO, B.J., LAZECKY, M., BAKON, M., and SOUSA, J.J., 2018b. Deformation Monitoring of the Northern Sector of the Valencia Basin (E Spain) Using PS-InSAR (1993–2010). *Proceedings of IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2244-2247.
- RUIZ-ARMENTEROS, A.M., LAZECKY, M., RUIZ-CONSTÁN, A., BAKOŇ, M., DELGADO, J.M., SOUSA, J.J., GALINDO-ZALDÍVAR, J., SANZ DE GALDEANO, C., CARO-CUENCA, M., MARTOS-ROSILLO, S., JIMÉNEZ-GAVILÁN, P., and PERISSIN, D., 2018c. Monitoring continuous subsidence in the Costa del Sol (Málaga province, southern Spanish coast) using ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/B SAR interferometry. *Procedia Computer Science*, **138**, pp. 354-36. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.050
- RUIZ-ARMENTEROS, A.M., MARCHAMALO-SACRISTÁN, M., BAKON, M., LAMAS-FERNÁNDEZ, F., DELGADO, J.M., SÁNCHEZ-BALLESTEROS, V., PAPCO, J., GONZÁLEZ-RODRIGO, B., LAZECKY, M., PERISSIN, D., and SOUSA, J.J., 2021. Monitoring of an embankment dam in southern Spain based on Sentinel-1 Time-series InSAR. *Procedia Computer Science*, **181**, pp. 353-359. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.178
- RUIZ-CONSTÁN, A., RUIZ-ARMENTEROS, A.M., MARTOS-ROSILLO, S., GALINDO-ZALDÍVAR, J., LAZECKY, M., GARCÍA, M., SOUSA, J.J., SANZ DE GALDEANO, C., DELGADO-BLASCO, J.M., JIMÉNEZ-GAVILÁN, P., CARO-CUENCA, M., and LUQUE-ESPINAR, J.A., 2018. "SAR interferometry monitoring of subsidence in a detritic basin related to water depletion in the underlying confined carbonate aquifer (Torremolinos, southern Spain)". *Science of the Total Environment*, **636**, pp. 670-687.
- USAI, S., 1997. The use of man-made features for long time scale INSAR. *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote sensing — A scientific vision for sustainable development, 1997. IEEE International*, **4**, pp. 1542–1544.
- USAI, S., and HANSSEN, R., 1997. Long time scale INSAR by means of high coherence features. *3rd ERS Symposium on Space at the service of our Environment*, Florence, Italy, 14–21 March, European Space Agency.
- ZHONG, L., JIXIAN, Z., YONGHONG, Z., and DZURISIN, D., 2010. Monitoring and characterizing natural hazards with satellite InSAR imagery. *Journal Annals of GIS*, **16**(1), pp. 55–66.

## MEJORANDO LA INTERPRETACIÓN DE SERIES TEMPORALES USANDO APRENDIZAJE NO SUPERVISADO

### IMPROVING THE INTERPRETABILITY OF DINSAR TIME SERIES USING UNSUPERVISED LEARNING

Jaime Sánchez

Laboratorio de Topografía y Geomática, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Prof. Aranguren, 3, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. [jsanchez@detektia.com](mailto:jsanchez@detektia.com)

#### Abstract:

DInSAR technology provides high density of information about the temporal ground and infrastructure deformation rate with millimetre precision and without the need of ground instrumentation. DInSAR analyses the information within the radar phase and amplitude of a series of Synthetic Aperture Radar images. These images are acquired over large areas at the same location and at different dates to obtain the deformation time series on points showing low phase noise. It allows measuring surface movements and deformation with extensive area coverage, having lower cost per area compared to conventional techniques and the possibility of obtaining data before, during and after the event that is being studied. Therefore, DInSAR technology possesses great advantages over traditional technologies and could act in some cases a substitute for them for measuring millimetric ground and infrastructure movements. In many cases, the large volume of output points often difficult the manual inspection of the resultant dataset. Appropriate postprocessing methodologies are needed to properly interpret the data facilitating the objective interpretation of the results and the decision-making. This paper addresses this interpretation problems by 1) analysing the results of applying different data mining procedures to a case study in Madrid and 2) creating a systematic workflow useful for a preliminary analysis of the data. Principal Component Analysis is applied to reduce the dimensionality of the problem while minimizing the information loss and time series clustering and different unsupervised learning algorithms are used to classify the data based on similar characteristics.

**Key words:** geodesy, principal component analysis, interferometric synthetic aperture radar, DInSAR, unsupervised learning, clustering

#### Resumen:

La tecnología DInSAR provee una gran cantidad de información sobre la deformación a lo largo del tiempo del terreno y las infraestructuras con precisión milimétrica y sin la necesidad de usar instrumentación de campo. Durante el procesamiento DInSAR se analiza la información contenida en la fase y la amplitud de una serie de imágenes obtenidas mediante un Radar de Apertura Sintética. Estos cubrirán la misma área en distintos momentos para de este modo poder seleccionar los píxeles que poseen menor ruido en la fase permitiendo la medición de movimientos superficiales a lo largo de varios kilómetros cuadrados de área y de manera más económica que mediante métodos convencionales y teniendo además la posibilidad de obtener datos anteriores, contemporáneos o posteriores al evento estudiado. Por todo esto, el procesamiento DInSAR posee grandes ventajas sobre tecnologías tradicionales para medir deformaciones y movimientos milimétricos tanto del suelo como de infraestructuras. En muchos casos, el gran volumen de datos obtenido dificulta la inspección manual de estos. Lo que hace necesario el uso de metodologías apropiadas que simplifiquen la interpretación los datos facilitando así también la toma de decisiones. Este artículo intenta afrontar esos problemas 1) analizando los resultados de aplicar diferentes estrategias de minería de datos 2) creando un flujo de trabajo automatizado que facilite un análisis preliminar de los datos. Aplicando Análisis de Componentes Principales para reducir la dimensionalidad del problema y usando algoritmos de clusterización para agrupar los puntos por características similares.

**Palabras clave:** geodesia, análisis de componentes principales, radar de apertura sintética, DInSAR, aprendizaje no supervisado, clusterización

### 1. Introducción

El envejecimiento y el deterioro de infraestructuras es un problema global que provoca grandes pérdidas económicas debidas a la falta de mantenimiento preventivo y que, en último término, puede provocar la pérdida de vidas humanas. Las infraestructuras pueden modificar su comportamiento durante su vida útil, debido al deterioro de materiales, cambios en las cargas, condiciones ambientales, errores de diseño y construcción. Además, otros fenómenos y procesos,

como terremotos, cambios del nivel o del flujo de agua subterránea por sobreexplotación acuíferos o la ejecución de grandes obras subterráneas en entornos urbanos pueden provocar la deformación de la superficie de la Tierra afectando de manera más o menos grave a las infraestructuras que se encuentran en superficie (Bischoff *et al.* 2020; Scoular *et al.* 2020).

Para prevenir, anticipar y reducir los daños y el deterioro de infraestructuras es esencial desarrollar sistemas que permitan detectar de forma temprana los movimientos y deformaciones milimétricas tanto de la superficie del



terreno como de la infraestructura en sí. El sector de la ingeniería civil posee la necesidad clara de cuantificar el estado actual y futuro de todo tipo de infraestructuras en grandes áreas a través de la monitorización avanzada de su salud estructural. Los procedimientos más habituales para controlar movimientos y deformaciones en obras de ingeniería como son la topografía de precisión (nivelación), los inclinómetros, acelerómetros o el DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial) no son económica o técnicamente viables en grandes áreas y, en la mayoría de los casos, no dan respuesta a las necesidades actuales de monitorización continua de grandes obras de ingeniería civil. En este contexto el desarrollo de nuevos sistemas eficientes de control y seguimiento de los movimientos milimétricos en infraestructuras que permitan analizar su estado, anticipar su comportamiento y generar un sistema de alerta temprana (García *et al.* 2020) son clave en un sector de tanta importancia.

Las técnicas basadas en interferometría radar satelital como el DInSAR son métodos que han avanzado de forma notable en los últimos años (Crosetto *et al.* 2016) y que permiten monitorizar masivamente movimientos milimétricos en la superficie del terreno e infraestructuras sin necesidad de instrumentación en tierra. Los cambios en la elevación y desplazamiento en planimetría de la superficie terrestre se registran mediante el tratamiento de la fase de la señal radar, utilizando la interferometría de pares de imágenes obtenidas mediante un Radar de Apertura Sintética (SAR) tomadas en la misma zona en distintas fechas, pudiendo llegar a conseguir la detección de movimientos con precisión milimétrica al trabajar con series temporales lo suficientemente largas. La tecnología DInSAR hace posible identificar puntos de respuesta estable o de "Persistent Coherence", los cuales pueden ser monitoreados sistemáticamente a lo largo del tiempo sobre grandes áreas e identificar deformaciones superficiales que ocurren en el terreno en orden de milímetros tanto en movimientos verticales, así como en desplazamientos horizontales.

La técnica DInSAR ha demostrado la capacidad de medir con éxito pequeños desplazamientos de estructuras con precisión milimétrica en muchos estudios científicos (Gascón *et al.* 2013; Herrera *et al.* 2013; Karila *et al.* 2005). La técnica DInSAR aplicada a la medición de la subsidencia superficial tiene varias ventajas, incluyendo una amplia cobertura de área dentro de una sola imagen (de miles de km<sup>2</sup>), menor coste por m<sup>2</sup> en comparación con las técnicas convencionales, y la posibilidad de obtener datos antes, durante y después de la construcción o evento que se está estudiando (Tomás *et al.* 2014). Por lo tanto, la tecnología DInSAR es una tecnología emergente con grandes ventajas sobre las tecnologías tradicionales (y en muchos casos un sustituto de ellas) para medir los movimientos milimétricos en obras e infraestructuras.

A pesar de todas estas ventajas que posee el DInSAR sobre los métodos geotécnicos y topográficos tradicionales, la correcta interpretación y análisis del gran volumen de información que genera esta tecnología es a día de hoy un reto importante al que se enfrenta el presente proyecto de investigación. El resultado del DInSAR son nubes de puntos densas sobre grandes áreas en las que cada punto describe la historia de las deformaciones en esa localización específica. La enorme

cantidad de datos disponibles tanto en la dimensión espacial como temporal hacen que sea muy complicada la interpretación objetiva de la información. Es por ello, que la integración de técnicas que permitan mejorar la interpretación de los resultados y anticipar el comportamiento futuro del terreno e infraestructuras es clave para que esta tecnología ayude a la toma de decisiones tanto en la construcción de infraestructuras como en el diseño de las tareas preventivas y de mantenimiento.

## 2. Procesado DinSAR

El preprocesamiento de las imágenes SAR obtenidas con el sensor radar del satélite Envisat tendrá como objetivo corregir las imágenes para así seleccionar los píxeles que representan el mismo punto de la superficie de estudio y así poder crear después pares interferométricos.

La retrodispersión o retrorreflexión en la que se basa esta técnica es un fenómeno físico en el cual las ondas que inciden en un material en un ángulo determinado son reflejadas en el mismo ángulo, volviendo a la fuente que las produjo. De este modo, a partir del análisis de la fase contenida en los ecos que estos generen en el radar satelital obtendremos las series temporales de posiciones para los distintos reflectores que se encuentren en la zona, así como las velocidades medias para el periodo estudiado.

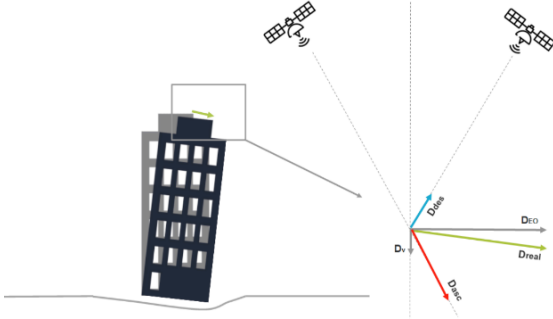
Existen dos grandes familias de algoritmos en función del tipo de retrorreflectores que usemos, los algoritmos PSDInSAR, que deben su nombre al uso de reflectores persistentes (Persistent Scatterers, Ferretti *et al.* 2001) que suelen ser píxeles individuales caracterizados por una ratio entre señal y ruido muy alto; este tipo de puntos es abundante en zonas urbanas donde existen gran cantidad de objetos estables con una alta reflectividad. Por otro lado, podemos usar un grupo de píxeles más ruidoso pero lo suficientemente homogéneo como para poder usar un análisis estadístico que nos permita recuperar información de la fase, estos grupos se conocen como reflectores distribuidos (Distributed Scatterers; Berardino *et al.* 2002) y son la base de los algoritmos DSInSAR, mucho más útiles para zonas con abundante vegetación. En nuestro caso se usará una técnica PSDInSAR denominada Interferometría de Retrorreflectores Persistentes (Persistent Scatterer Interferometry o PSI).

Uno de los mayores inconvenientes de esta forma de adquisición de datos es que las deformaciones medidas se encuentran en la dirección de la línea de visión del satélite, por lo que, para obtener la deformación vertical y horizontal del terreno, será necesario procesar dos geometrías de adquisición distintas (Fig. 1), ascendente cuando el satélite se mueve hacia el norte y descendente cuando lo hace hacia el sur, para después proyectar las deformaciones sobre los ejes deseados que en nuestro caso serán arriba-abajo y este-oeste.

## 3. Aprendizaje no supervisado

El aprendizaje no supervisado es una rama del aprendizaje automático que permite lidiar con datos no etiquetados (Kanevski *et al.* 2009). En nuestro caso, lo usaremos para generar áreas (agrupaciones de puntos)

donde el comportamiento de la deformación del terreno o infraestructura es similar. Este tipo de procesos son muy útiles para detectar la dinámica general de movimiento de una zona amplia. Por otra parte, también puede servir como base para entrenar modelos detectores de anomalías que puedan ser usados como base para crear un sistema de alerta temprana ante catástrofes.



**Figura 1:** Esquema de la descomposición de movimientos a través de la combinación de geometría ascending y descending en movimientos en plano vertical y planimetría Este-Oeste. Donde Dreal es el movimiento real del punto analizado, Ddesc es el movimiento en LOS en geometría descending, Dasc es el movimiento en LOS en geometría ascending. Dv y Deo son los movimientos descompuestos en el eje vertical y en planimetría Este-Oeste.

En este trabajo se han explorado dos tipos de algoritmos de aprendizaje no supervisado usando como datos de partida las series temporales de deformación obtenidas con DInSAR, Análisis de Componentes Principales y clusterización. El primero de estos es un procedimiento utilizado para reducir la dimensión de los datos a la vez que se intenta minimizar la pérdida de información que ya ha sido incorporado con éxito en rutinas de procesamiento de datos DInSAR (Bonì *et al.* 2016) mientras que los algoritmos de clusterización son modelos capaces de dividir los puntos en un número dado de grupos en función de las características de estos.

### 3.1. Análisis de Componentes Principales

El algoritmo PCA se define como una transformación lineal capaz de expresar los puntos en una nueva base ortonormal donde la primera componente principal será el vector que maximiza la varianza de la proyección escalar del conjunto de datos.

La  $n$ -ésima componente principal se define a su vez como la que maximice la varianza al proyectar los puntos sobre su dirección y a su vez sea ortogonal a las  $N-1$  componentes anteriores (Jolliffe 2002).

En nuestro caso expresaremos las series temporales obtenidas como vectores  $x_i$  donde las coordenadas serán la deformación de ese punto en una fecha concreta, estos vectores compondrán las filas de una matriz  $X$ . De esta manera, la primera componente principal  $w_1$  será un vector que cumpla la Ec. (1):

$$w_1 = \arg \max_{\|w\|=1} \{\sum_i (x_i \cdot w)\} = \arg \max_{\|w\|=1} \{w^T X^T X w\} \quad (1)$$

Mientras que las demás componentes se obtienen sustrayendo las componentes anteriores a  $X$  (Ecs. 2 y 3):

$$\hat{X}_k = X - \sum_{s=1}^{k-1} X w_s w_s^T \quad (2)$$

$$w_k = \arg \max_{\|w\|=1} \{\|\hat{X}_k w\|^2\} \quad (3)$$

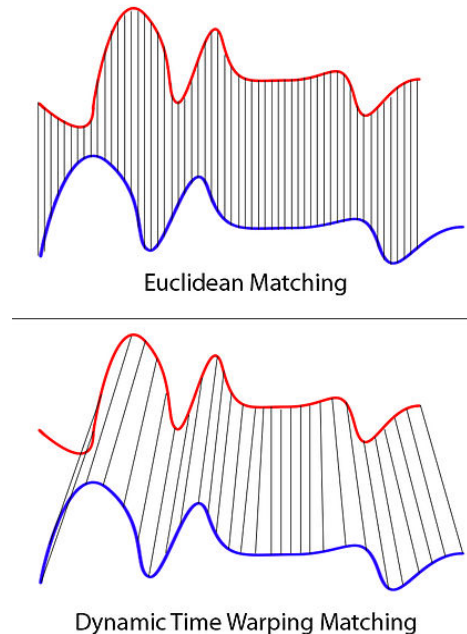
Una peculiaridad de esta transformación es que diagonaliza la matriz de covarianzas de los datos, ya que las componentes principales no poseen correlación entre sí.

### 3.2. Algoritmos de clusterización

Para la generación de los clústeres se ha utilizado *k-means* (Elkan 2003), este es un algoritmo basado en centroides que agrupa los datos en un número  $k$  clústeres, donde cada uno de estos estará representado como un vector central y cada punto pertenece al clúster con el centro más cercano. El problema de optimización se define entonces como encontrar los centros de los clústeres que minimicen la distancia media cuadrada entre un punto y su clúster.

Al igual que en el apartado anterior, tomaremos los valores de las series temporales como las coordenadas que definen a cada punto. El cálculo de las distancias necesarias para la clasificación se realizará usando dos métricas distintas, comparando así la clasificación obtenida usando una distancia euclídea con la obtenida al asignar la distancia entre dos series temporales mediante el algoritmo de *Dynamic Time Warping* (DTW, Salvador and Chan 2007).

Este algoritmo se usa en análisis de series temporales como criterio para establecer la similitud entre dos series, para ello crea una correspondencia entre los puntos de una y otra serie (Fig. 2) para así poder identificar patrones similares en ambas series pese a que sucedan en momentos distintos y estén ligeramente distorsionados.



**Figura 2:** Diferencias entre la métrica euclídea y DTW aplicados a dos series temporales. La métrica euclídea será la suma de las diferencias al cuadrado para los valores de cada fecha de ambas series temporales mientras que con DTW se calculará una distancia basada en el emparejamiento óptimo de los valores de las series temporales.

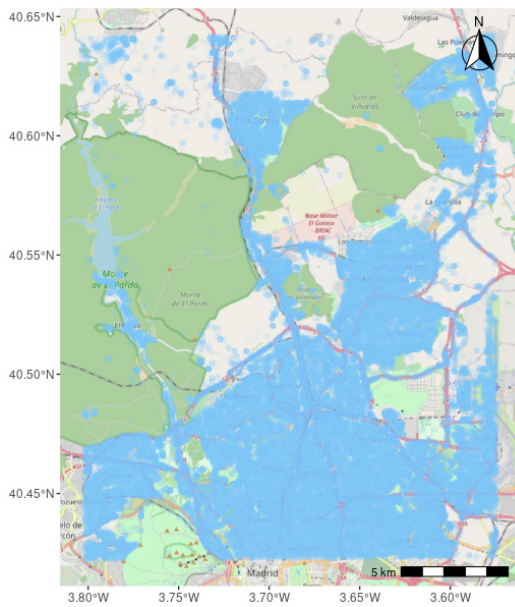
Para comparar el desempeño de los distintos modelos y los distintos parámetros, se calculará el error medio cuadrático cometido al clasificar las series, Ec. (4):

$$SSE = \sum_{j=1}^N \sum_{x_i \in cluster_j}^{N_{puntos}} dist(x_i, cluster_j)^2 \quad (4)$$

Donde  $x_i$  será el vector que represente a la  $i$ -ésima serie temporal y  $cluster_j$  será el vector que contenga el centroide del  $j$ -ésimo clúster.

#### 4. Resultados

La zona de estudio elegida se encuentra al Norte de Madrid (Fig. 3). Con una extensión de casi 500km<sup>2</sup>, cubre un gran acuífero terciario detrítico sobre el que se encuentra gran parte de la zona metropolitana como el territorio al Noroeste de esta, donde se encuentran dos zonas de pozos cercanas a Fuencarral y Pozuelo de Alarcón, que presentan deformaciones cuasi elásticas debido a las fases de carga y descarga de los acuíferos (Ezquerro *et al.* 2014).

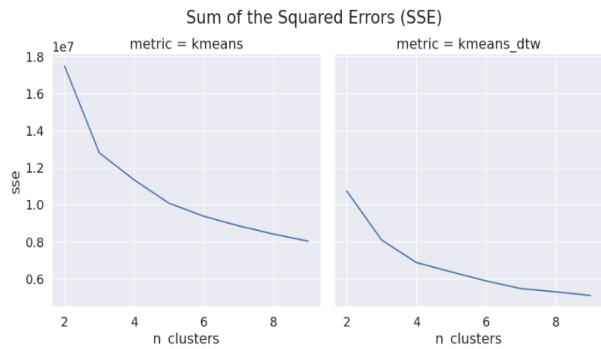


**Figura 3:** Zona de estudio que incluye parte del Norte de la zona metropolitana de Madrid. En azul se señalan los puntos que poseen serie temporal DInSAR.

Superpuestas al mapa se encuentran las localizaciones de los puntos pertenecientes al procesado PSDInSAR, realizado a partir de 31 imágenes ENVISAT tomadas con *Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) Image Mode (IM)* entre 2003 y 2010. En total se han obtenido más de 100.000 puntos repartidos mayoritariamente por las zonas urbanas, debido a la mayor densidad de reflectores.

#### 4.1. Algoritmos de clusterización

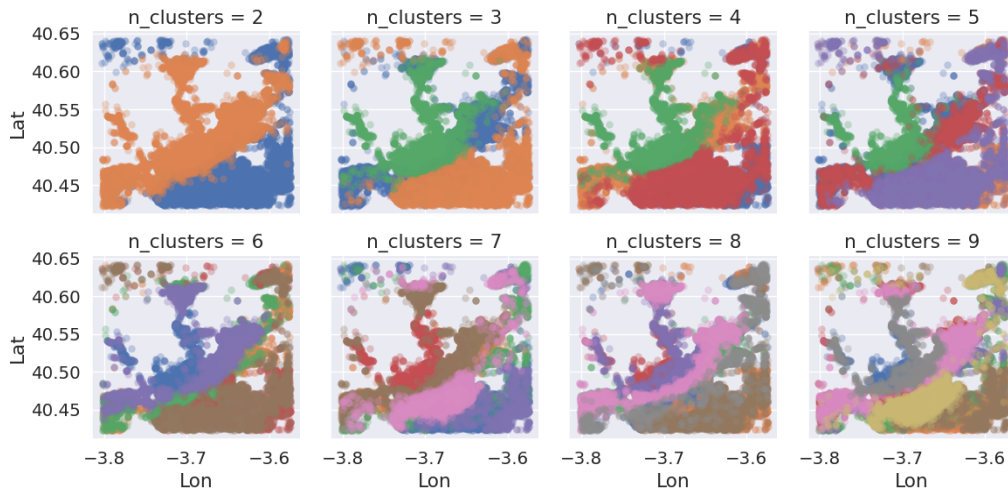
La relación entre el error SSE y el número de clústeres nos permite seleccionar de forma casi automática el número de clústeres idóneo para analizar los resultados DInSAR (Fig. 4) al realizar procesados con distinto número de clústeres (Figs. 5 y 6). Este suele establecerse en el *codo* de la curva, cuando el beneficio por aumentar el número de clústeres se reduce ampliamente, que será aproximadamente 4 en nuestro caso.



**Figura 4:** Suma de Errores Cuadrados para las clasificaciones desde 2 a 9 clústeres. (Izquierda) Resultados para la métrica euclídea. (Derecha) Resultados para DTW.

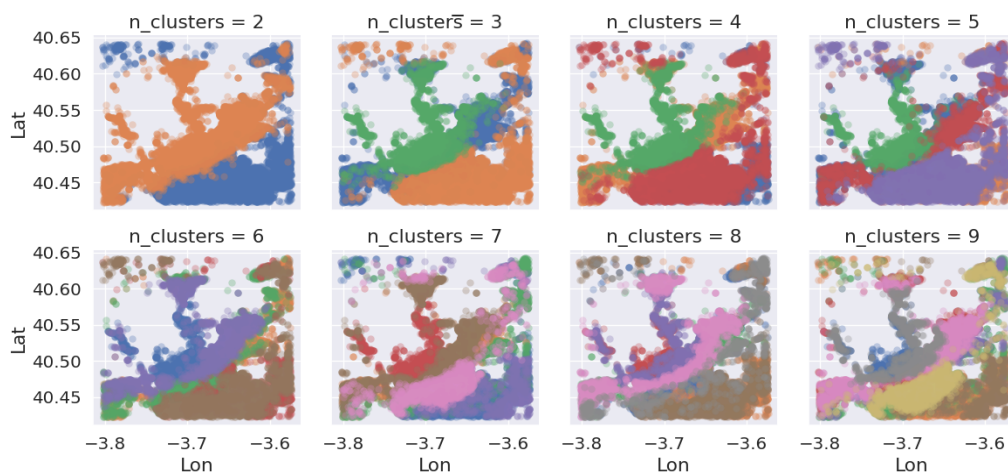
Los resultados (Figs. 7 y 8) muestran como las técnicas empleadas permiten separar, sin necesidad de disponer de información previa de la zona de estudio, los diferentes patrones de deformación del terreno presentes en el área analizada.

En el caso de estudio analizado no se observan diferencias importantes entre la utilización de la clasificación obtenida usando una distancia euclídea con la obtenida al asignar la distancia entre dos series temporales mediante el algoritmo de Dynamic Time Warping.

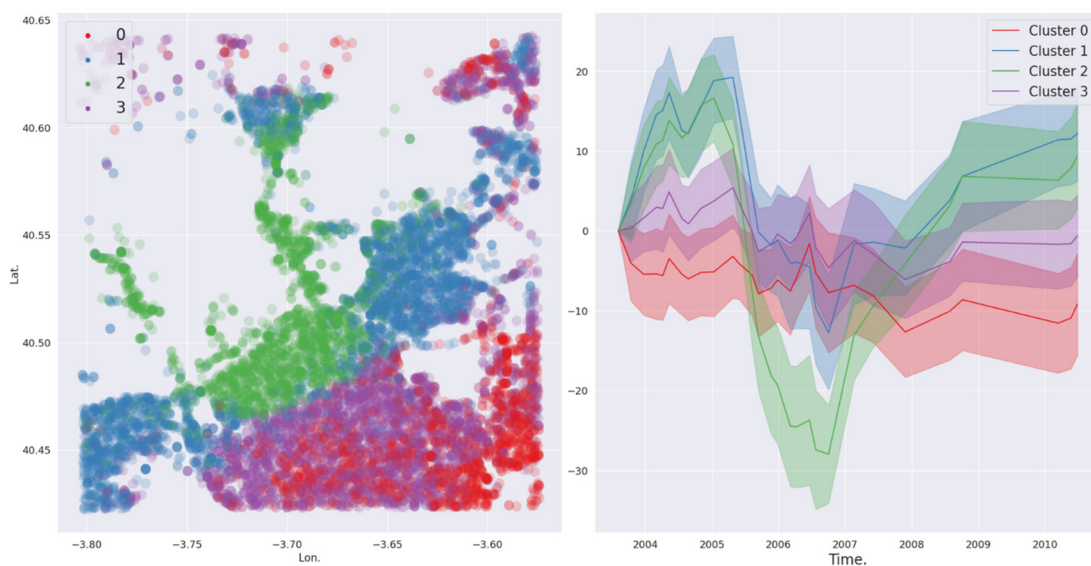


**Figura 5:** Clasificación de la zona de estudio utilizando el algoritmo kmeans con distinto número de clústeres y métrica euclídea para el cálculo de distancias.

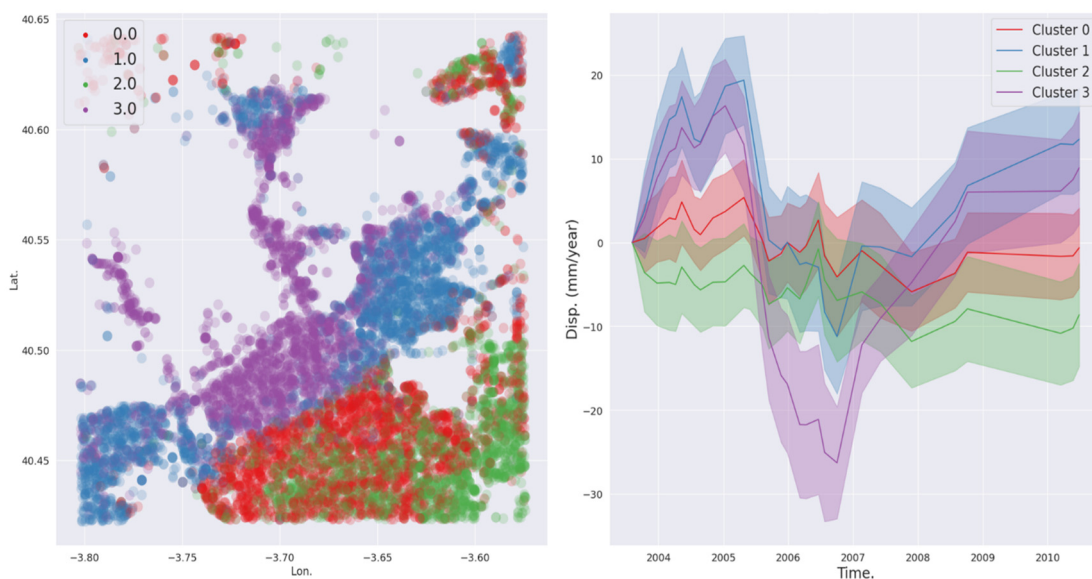




**Figura 6:** Clasificación de la zona de estudio utilizando el algoritmo kmeans con distinto número de clústeres y métrica DTW para el cálculo de distancias.



**Figura 7:** Clasificación de la zona de estudio utilizando el algoritmo kmeans con 4 clústeres y métrica euclídea para el cálculo de distancias, así como el comportamiento promedio de cada clúster. El clúster 2 agrupa los puntos más afectados por los ciclos de carga y descarga de los acuíferos y engloba las zonas de pozos de Fuencarral y Pozuelo de Alarcón.



**Figura 8:** Clasificación de la zona de estudio utilizando el algoritmo kmeans con 4 clústeres y métrica DTW para el cálculo de distancias, así como el comportamiento promedio de cada clúster. El clúster 3 agrupa los puntos más afectados por los ciclos de carga y descarga de los acuíferos y engloba las zonas de pozos de Fuencarral y Pozuelo de Alarcón.

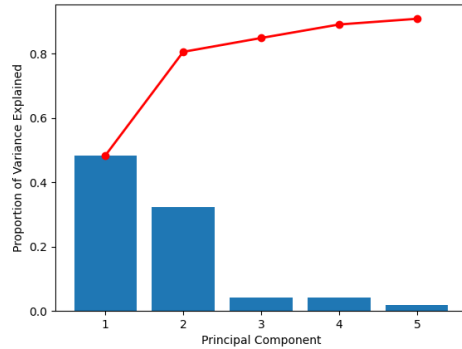


## 4.2. Análisis de Componentes Principales

El único parámetro que nos permite elegir este algoritmo es el número de componentes principales que queremos elegir para representar las dimensiones de nuestros datos de salida.

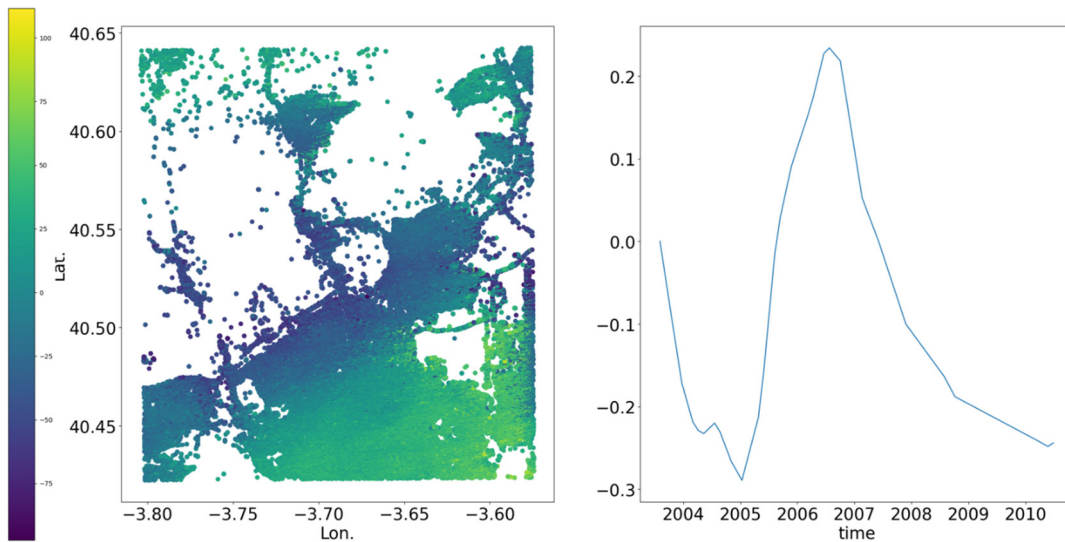
Para poder valorar cuánta información aporta cada dimensión que añadimos, usaremos la varianza explicada por cada componente (Fig. 9). En ella se puede comprobar que, en nuestro caso, no tiene sentido utilizar más de dos componentes principales, puesto que las dos primeras componentes poseen más del 80% de la varianza de los datos y añadir las siguientes componentes no supone una mejora significativa.

En las Figuras 10 y 11 se puede visualizar a la izquierda, la aportación de cada punto a la primera y segunda componente principal mientras que, en la derecha se podrá ver la serie temporal que representa a dicha componente.

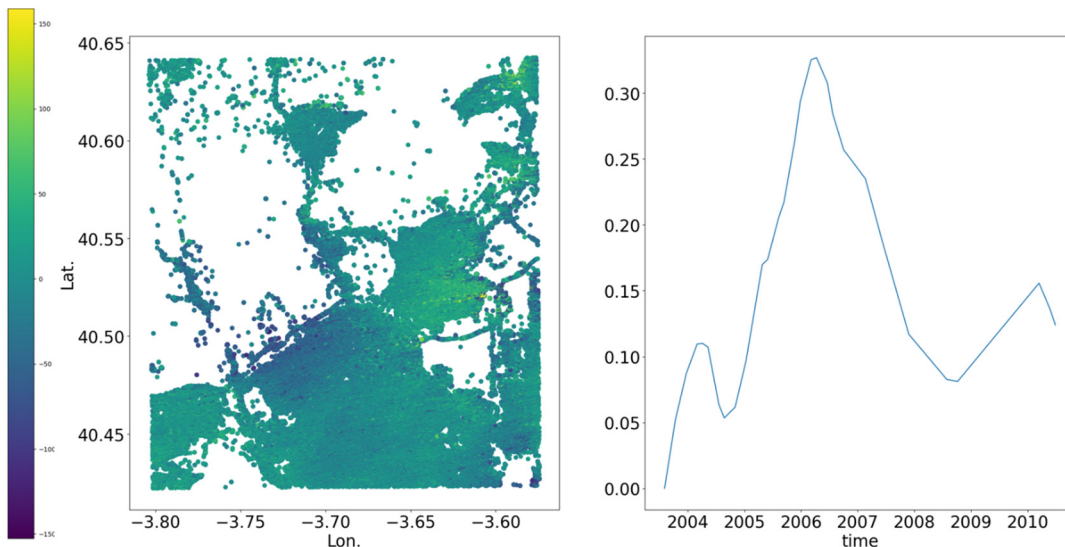


**Figura 9:** Gráfico de sedimentación de los resultados. Las barras representan el porcentaje de varianza explicada por cada componente principal y la línea es el valor acumulativo.

Los resultados de la aplicación de PCA sobre la base de datos de deformaciones DInSAR muestra también de forma visual, y sin necesidad de disponer información previa del área estudiada, el comportamiento del terreno (de levantamiento y subsidencia) en el periodo temporal analizado.



**Figura 10:** A la izquierda Coeficiente de cada punto en la primera componente principal mientras que, en la derecha se puede ver la serie temporal de desplazamientos de esta componente, calculada como la suma ponderada de todas las series temporales usando como peso el coeficiente asignado a cada punto.



**Figura 11:** A la izquierda Coeficiente de cada punto en la segunda componente principal mientras que, en la derecha se puede ver la serie temporal de desplazamientos de esta componente, calculada como la suma ponderada de todas las series temporales usando como peso el coeficiente asignado a cada punto.

## 5. Discusión

En este artículo se ha tratado de crear un procedimiento sistemático que facilite la interpretación de los datos obtenidos en procesados DInSAR, para ello se han utilizado dos procedimientos de aprendizaje no supervisado que apenas requieren ajuste a los hiperparámetros de los modelos.

Además, se ha podido comprobar la eficacia de estos métodos con un caso de uso real al poder extraer información del procesado sin necesidad de ningún tipo de información auxiliar.

No se han encontrado diferencias significativas entre las métricas usadas en la clusterización, en el futuro se intentará probar el sistema más distintos casos de estudio con comportamientos distintos en los que usar DTW suponga una ventaja.

En el caso del Análisis de Componentes Principales, se ha conseguido reducir notablemente la dimensión de los datos de 31 a 2, manteniendo gran parte de la información de los puntos, algo que se intentará usar como primera fase de distintos modelos de aprendizaje automático.

## References

- BERARDINO, P., G. FORNARO, R. LANARI, and E. SANSOSTI., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(11), pp. 2375-2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- BISCHOFF, C. A., GHAIL, R. C., MASON, P. J., FERRETTI, A, and DAVIS, J. A., 2002. Revealing Millimetre-Scale Ground Movements in London Using SqueeSAR™. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **53**(1), pp. 3-11. DOI: 10.1144/qjegh2018-075.
- BONI, R., PILLA, G., and MEISINA, C., 2016. Methodology for Detection and Interpretation of Ground Motion Areas with the A-DInSAR Time Series Analysis. *Remote Sensing*, **8**, 686. DOI: 10.3390/rs8080686.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., DEVANTHÉRY, N., and CRIPPA, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, pp. 78-89.
- ELKAN, C., 2003. Using the triangle inequality to accelerate k-means. In *Proceedings of the 20th international conference on Machine Learning ICML-03*, pp. 147-153.
- EZQUERRO, P., HERRERA, G., MARCHAMALO, M., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., and MARTÍNEZ, R., 2014. A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology*, **519**, pp. 1192-1204. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.040
- FERRETTI, A., PRATI, C. and ROCCA, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(1), pp. 8-20. DOI: 10.1109/36.898661.
- GARCÍA, A. J., GONZÁLEZ-RODRIGO, B., MARTINEZ, S., MARTINEZ, R., and MARCHAMALO, M., 2021. Building health monitoring in the old town of Madrid: applicability of SAR Imagery to the monitoring of underground works through classification indexes. *International Journal of Digital Earth*, **14**(3), pp. 271-287. DOI: 10.1080/17538947.2020.1815878
- GASCÓN, B., BRU, G., CAMACHO, A. G., AVELLANEDA, M., PRIETO, J. F., GONZÁLEZ, P. J., HERRERA, G., TIAMPO, K. F., NAVARRO, J.A., and MORALES, 2013. Ladera Inestable en Leintz-Gatzaga. Estudio Geotécnico y Control del Deslizamiento con Técnicas Terrestres y Espaciales. Universidad Politécnica de Cataluña
- GOLD, O., and SHARIR, M., 2018. Dynamic time warping and geometric edit distance: Breaking the quadratic barrier. *ACM Transactions on Algorithms (TALG)*, **14**(4), pp. 1-17. DOI: 10.1145/3230734
- HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GARCÍA-DAVALILLO, J. C., GUERRERO, J., NOTTI, D., GALVE, J. P., FERNÁNDEZ-MERODO, J.A., and COOKSLEY, G., 2013. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, **128**, pp. 31-43. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.020
- HOOPER, A., ZEBKER, H., SEGALL, P., and KAMPES, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, **31**(23).
- JOLLIFFE, I., 2002. *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/b98835.
- KANEVSKI, M., POZDNUKHOV, A., and TIMONIN, V., 2008. Machine learning algorithms for geospatial data. Applications and software tools.
- KARILA, K., KARJALAINEN, M., and HYYPÄ, J., 2005. Urban land subsidence studies in Finland using synthetic aperture radar images and coherent targets. *Photogramm. J. Finland*, **19**, pp. 43-53.
- SALVADOR, S., AND CHAN, P., 2007. Toward accurate dynamic time warping in linear time and space. *Intelligent Data Analysis*, **11**(5), pp. 561-580.

- SCOULAR, J., GHAIL, R., MASON, P., LAWRENCE, J., BELLHOUSE, M., HOLLEY, R., and MORGAN, T., 2020. Retrospective InSAR analysis of East London during the construction of the Lee Tunnel. *Remote Sensing*, **12**(5), 849. DOI: 10.3390/rs12050849
- TOMÁS, R., ROMERO, R., MULAS, J., MARTURIÀ, J. J., MALLORQUÍ, J. J., LOPEZ-SANCHEZ, J. M., HERRERA, G., GUTIÉRREZ, F., GONZÁLEZ, P. J., FERNÁNDEZ, J., DUQUE, S., CONCHA-DIMAS, A., COCKSLEY, G., CASTAÑEDA, C., CARRASCO D., and BLANCO P., 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental earth sciences*, **71**(1), 163-181.



## DETECCIÓN DEL INICIO DE REACTIVACIÓN VOLCÁNICA EN LA ISLA DE LA PALMA, ISLAS CANARIAS, Y ESTUDIO DE SU EVOLUCIÓN TEMPORAL

### DETECTION OF THE VOLCANIC UNREST ONSET ON LA PALMA ISLAND, CANARY ISLANDS, AND STUDY OF ITS TIME EVOLUTION

Joaquín Escayo<sup>a</sup>, José Fernández<sup>a,\*</sup>, Zhongbo Hu<sup>b</sup>, Antonio G. Camacho<sup>a</sup>, Sergey V. Samsonov<sup>c</sup>, Juan F. Prieto<sup>d</sup>, Kristy F. Tiampo<sup>e</sup>, Mimmo Palano<sup>f</sup>, Jordi J. Mallorquí<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Geociencias (CSIC, UCM), C/ del Doctor Severo Ochoa 7, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. [jescayo@ucm.es](mailto:jescayo@ucm.es); [jft@mat.ucm.es](mailto:jft@mat.ucm.es); [antonio.camacho@mat.ucm.es](mailto:antonio.camacho@mat.ucm.es)

<sup>b</sup> CommSensLab-Universitat Politècnica de Catalunya, D3-Campus Nord-UPC, C/ Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España. [zhongbo.hu@tsc.upc.edu](mailto:zhongbo.hu@tsc.upc.edu); [mallorqui@tsc.upc.edu](mailto:mallorqui@tsc.upc.edu)

<sup>c</sup> Canada Centre for Mapping and Earth Observation, Natural Resources Canada, 560 Rochester Street, ON K1A 0E4, Ottawa, Canadá. [sergey.samsonov@canada.ca](mailto:sergey.samsonov@canada.ca)

<sup>d</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. [juanf.prieto@upm.es](mailto:juanf.prieto@upm.es)

<sup>e</sup> Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), 216UCB, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO, 80309 USA. [kristy.tiampo@colorado.edu](mailto:kristy.tiampo@colorado.edu)

<sup>f</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo - Sezione di Catania, Piazza Roma 2, 95125 Catania, Italia. [mimmo.palano@ingv.it](mailto:mimmo.palano@ingv.it)

#### Abstract:

The island of La Palma is one of those with the highest potential risk in the Canary archipelago, therefore it is important to carry out an in-depth study to define its state of volcanic activity. This has been done using satellite radar observations and a state-of-the-art original interpretation technique. Both things have made it possible to detect the beginning of the volcanic reactivation on the island of La Palma, probably decades before a possible eruption. Its temporal evolution shows a changing spatial and temporal nature of volcanic deformation with great spatial resolution and over a prolonged period of time (2009-2020), providing information on the dynamic nature of the associated processes. The geodetic techniques used allow detecting the fluid migration induced by the injection of magma in depth and identifying the existence of dislocation sources under the Cumbre Vieja volcano that could be associated with future landslides, making it necessary to continue with the monitoring of this reactivation process using these and other techniques.

**Key words:** La Palma, geodesy, volcanoes, 3D modelling, remote sensing

#### Resumen:

La isla de La Palma es de las de mayor riesgo potencial del archipiélago canario, siendo por tanto importante realizar un estudio en profundidad que permita definir su estado de actividad volcánica. Esto se ha realizado usando observaciones radar de satélite y una técnica de interpretación original de última generación. Ambas cosas han permitido detectar el inicio de la reactivación volcánica en la isla de La Palma, probablemente décadas antes de una posible erupción. Su evolución temporal muestra una naturaleza cambiante de la deformación volcánica, tanto espacial como temporalmente. El uso de imágenes radar permite obtener resultados con una gran resolución espacial y en un periodo de tiempo prolongado (2009-2020), obteniendo información sobre la naturaleza dinámica de los procesos asociados. Las técnicas geodésicas empleadas permiten detectar la migración de fluidos inducida por la inyección de magma en profundidad e identificar la existencia de fuentes de dislocación bajo el volcán Cumbre Vieja que podrían estar asociadas con futuros deslizamientos, siendo por tanto necesario continuar con la monitorización de este proceso de reactivación utilizando estas y otras técnicas.

**Palabras clave:** La Palma, geodesia, volcanes, modelización 3D, teledetección

### 1. Introducción

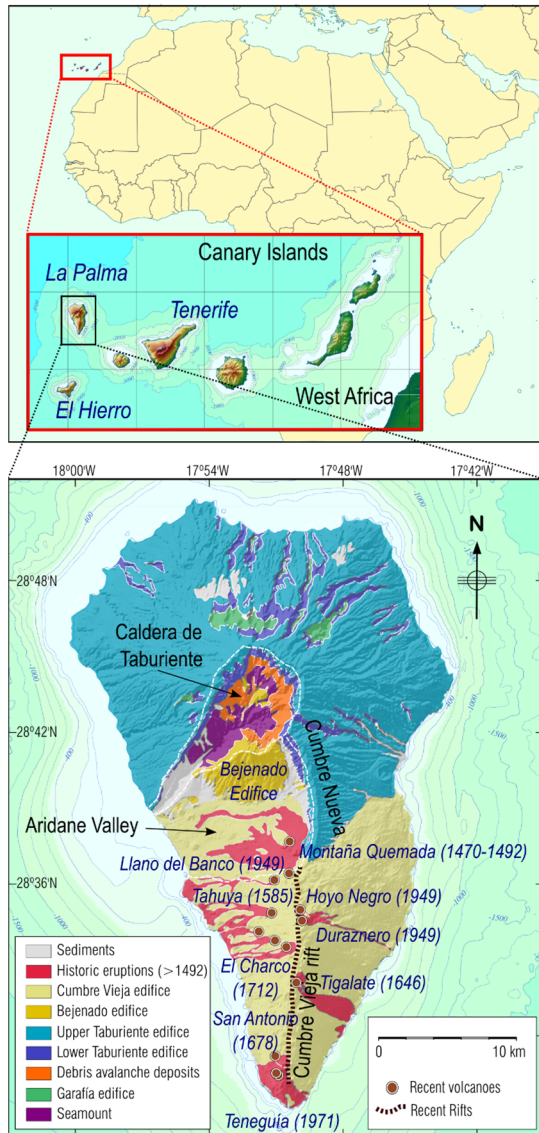
Durante las últimas dos décadas se han observado episodios de reactivación volcánica en las Islas Canarias,

incluyendo la sismicidad anómala en Tenerife en 2004-2005, la erupción en El Hierro en 2011-2012 o la reciente sismicidad detectada en La Palma en 2017 y 2018 (Fernández *et al.* 2015; Martí *et al.* 2013, 2009). Considerando el riesgo que este tipo de actividad supone

\* Corresponding Author: José Fernández, [jft@mat.ucm.es](mailto:jft@mat.ucm.es)

a la población y la economía, se hace necesario un estudio en profundidad para definir el estado de reactivación volcánica de las diferentes islas del archipiélago.

Las islas situadas más al oeste, las más jóvenes del archipiélago canario, son El Hierro y La Palma (Fig. 1). La Palma ha estado volcánicamente activa desde hace, por lo menos, 4 Ma. Está compuesta por dos unidades volcánicas principales: un gran complejo volcánico en el norte (complejo volcánico norte, NVC) que es la más antigua y posee morfología circular, y un rift volcánico más joven desarrollado en la zona sur de la isla y conocido como complejo de Cumbre Vieja (CV).



**Figura 1:** Localización geográfica de La Palma (panel superior) y sus principales elementos geológicos (panel inferior) (Fernández *et al.* 2021).

El NVC es el resultado de la superposición de varios edificios volcánicos basálticos. El edificio más antiguo consiste en cuerpo volcánico submarino cuya edad está comprendida entre 3 y 4 Ma (Staudigel *et al.* 1986), que tiene superpuestas tres grandes estructuras volcánicas subaéreas que se formaron desde 1.7 Ma a 0.4 Ma (Ancochea *et al.* 1994; Carracedo *et al.* 2001): el edificio de Garafía (1.7 a 1.2 Ma), el edificio de Taburiente-Cumbre

Nueva, T-CN (1.2-0.4 Ma), y el edificio de Bejenado (0.56-0.49 Ma) (Fig. 1). NVC alcanza los 2426 m de altura. Grandes deslizamientos de ladera y fenómenos erosivos han afectado a NVC, exponiendo parte de la estructura submarina, cuerpos plutónicos y diques que constituyen las raíces de los edificios en el fondo de la Caldera de Taburiente. La parte submarina de la isla está inclinada y elevada unos 300 m de altitud, bajo los edificios de Garafía y Taburiente y ahora se pueden ver en la base de la caldera de Taburiente. El edificio T-CN, que cubre los más antiguos, en su primera fase morfológica (1.2-0.8 Ma) tiene forma circular, lo que hace que la isla adopte esta forma en la zona norte. Sin embargo, en su segunda fase (0.8-0.4 Ma) su morfología es aproximadamente igual a la del rift N-S de CN.

La segunda mayor estructura volcánica de la isla es el edificio CV cuya actividad comenzó posteriormente a los edificios anteriores. El rift tiene una orientación N-S, como en el caso de CN, con una altitud máxima 1950 m y una longitud subaérea de aproximadamente 17 km que se extiende varios kilómetros en el fondo marino (Urgeles *et al.* 1999). La actividad volcánica más reciente en la isla se concentra en este edificio volcánico, incluyendo las seis erupciones históricas recientes que han tenido lugar en los últimos 500 años. Uno de los últimos eventos fue la erupción de San Juan en 1949 cuando se registró actividad eruptiva en tres conos volcánicos: Duraznero, Llano del Blanco y Hoyo Negro (Fig. 1). La última erupción sub-aérea en La Palma (y en las Islas Canarias) fue en 1971 y ocurrió en el volcán Teneguía, hace aproximadamente 50 años (Fig. 1). Las reactivaciones volcánicas en La Palma, y especialmente en el área de CV, también se han asociado con deslizamientos de ladera y riesgos de tsunamis (Ward and Day 2001). Torres-González *et al.* (2020) encontraron evidencias de una intrusión magmática localizada a unos 25 km de profundidad en La Palma, basándose en el análisis de la sismicidad y anomalías geoquímicas durante el periodo de 2017-2018, aunque no detectaron deformación superficial con GNSS continuo. Esto, junto con los riesgos asociados a una posible reactivación volcánica, motivaron el estudio de la deformación superficial utilizando para ello técnicas de interferometría radar de apertura sintética (DInSAR).

Históricamente, la sismicidad ha sido el primer precursor detectado en procesos de reactivación volcánica en las Canarias, mientras que la deformación superficial detectada durante episodios de reactivación no ha sido importante (Fernández *et al.* 2015, 2021). En El Hierro, en 2011, se detectaron deformaciones del orden de la decena de centímetros unos meses antes de la erupción. En Tenerife, durante la activación de 2004-2005, la deformación observada fue del orden de 2-3 cm, con una baja relación señal/ruido (Fernández *et al.* 2015). Obtener deformaciones a partir de técnicas DInSAR es complicado en entornos como La Palma, ya que la existencia de grandes desniveles hace que los efectos atmosféricos tengan especial importancia, requiriendo el uso de técnicas avanzadas para poder corregir su contribución de los valores de deformación. El uso de datos GNSS se ve limitado por la dificultad de realizar campañas con un gran número de puntos de observación (Escayo *et al.* 2020; Fernández *et al.* 2018), así como la pequeña magnitud de los desplazamientos (Fernández *et al.* 2017). En La Palma, como también ocurre en otras muchas islas volcánicas, la localización de las

deformaciones asociadas a posibles reactivaciones no son conocidas a priori y pueden variar con el tiempo. Esto hace que las redes GNSS con una baja densidad espacial puedan resultar de poca utilidad para la detección de deformaciones de pequeña magnitud, principalmente en las etapas iniciales de una reactivación (Escayo *et al.* 2020; Torres-González *et al.* 2020).

Para solventar estas limitaciones se emplean las técnicas DInSAR, ya que permiten la obtención de mapas de deformación con una gran resolución espacial (tamaños de píxel habituales de 1x1 m para banda X y 5x20 para banda C) y con alta precisión (los análisis de series temporales son capaces de determinar velocidades medias anuales con precisiones milimétricas). Además, mediante el uso de técnicas avanzadas, p.e. modelos climáticos globales como el caso de ERA5, podemos realizar un correcto filtrado atmosférico. Todo esto, combinado con un modelo de inversión avanzado (Camacho *et al.* 2020), que es capaz de hacer una inversión considerando múltiples fuentes de deformación, obteniendo la localización, tamaño y configuración tridimensional sin hacer ninguna hipótesis a priori del número, naturaleza o forma de la fuente. Adicionalmente, los resultados se discutirán considerando la estructura cortical tridimensional de la isla determinada a partir de observaciones gravimétricas.

## 2. Resultados

### 2.1. DInSAR

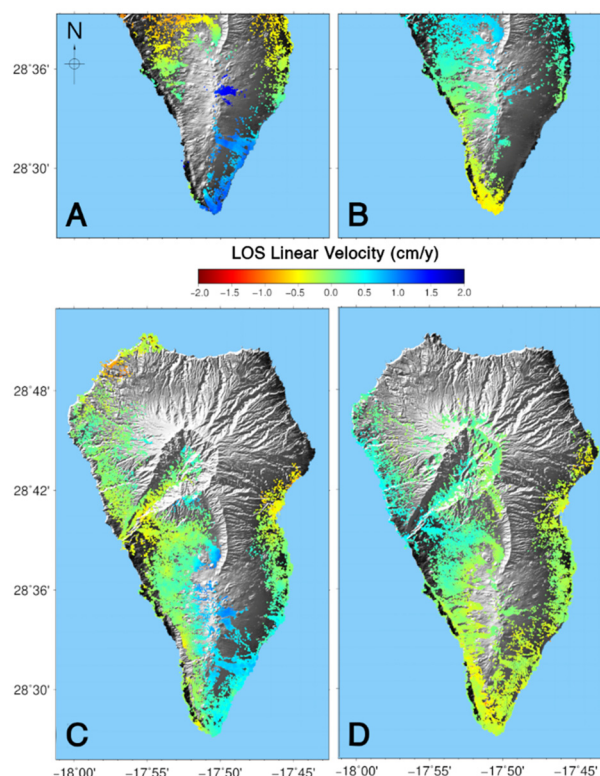
El estudio DInSAR se realizó utilizando imágenes Single Look Complex (SLC) adquiridas por diferentes satélites de banda C. Se consideran tres periodos de tiempo: 2006- 2010 donde se utilizó el satélite ENVISAT; 2010-2017 utilizando imágenes de satélite RADARSAT-2; y 2017-2020 donde se utilizó la constelación de satélites Sentinel-1. Los satélites ENVISAT y la constelación Sentinel-1 fueron puestos en órbita por la Agencia Espacial Europea (ESA) mientras que el satélite RADARSAT-2 fue puesto en órbita por la Agencia Espacial Canadiense (CSA). Todos los datos utilizados en este trabajo fueron suministrados por las respectivas agencias espaciales. Para eliminar la contribución a la fase debida por la topografía se utilizó un modelo digital del terreno de alta resolución generado a partir de los datos del MDT05 proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) descargados desde el centro de descargas del CNIG.

Para obtener los desplazamientos en la línea de visión (o Line of Sight, LOS) del satélite se utilizó la técnica "Coherent Pixel Technique" (CPT) (Blanco-Sánchez *et al.* 2008) para los conjuntos de datos de ENVISAT y Sentinel-1. Se aplicó una selección de píxeles por coherencia (técnica similar al SBAS) aplicando un multilook sobre la imagen de 5x25 muestras (obteniendo así una resolución cercana a los 100x100 m). Para seleccionar los píxeles con suficiente calidad de fase se aplicó un umbral de coherencia de 0.4 sobre la coherencia media generada a partir de todos los interferogramas. Para eliminar los efectos atmosféricos (Atmospheric Phase Screen) presentes en la isla se utilizaron dos técnicas diferentes dependiendo del sensor: para ENVISAT se utilizó un filtrado espacio-temporal mientras que para Sentinel-1 se generaron mapas de APS sintéticos a partir de los datos de los

modelos globales de ERA5 (Hu and Mallorquí 2019), permitiendo una estimación más precisa de los efectos atmosféricos.

Para el conjunto de datos de RADARSAT-2 se utilizó el software MSBAS (Samsonov and D'Oreye 2017) con una ventana de multilook de 4x8 muestras, permitiendo una resolución de aproximadamente 40x40 m. Para la estimación del APS se calculó una correlación entre topografía y efecto atmosférico, usando el modelo digital del terreno.

En este trabajo se intentó disponer de la mayor cantidad de datos posible para el procesado, obteniendo órbitas ascendentes y descendentes para los satélites ENVISAT y la constelación Sentinel-1, mientras que para el satélite RADARSAT-2 únicamente se disponía de suficientes imágenes para el análisis DInSAR en la órbita descendente. Para todos los casos se calcularon las velocidades medias en LOS (Fig. 2), y en el caso de ENVISAT y Sentinel-1 se obtuvieron también las series temporales para cada uno de los tres periodos estudiados. Con el fin de validar los resultados obtenidos se compararon los valores de diferentes puntos GNSS de los que se disponían datos con los píxeles más cercanos obtenidos mediante DInSAR mostrando diferencias para las velocidades medias anuales inferiores a 4 mm/y en el caso de ENVISAT y 2 mm/y para Sentinel-1, lo que consideramos es una buena concordancia entre ambas técnicas. Las velocidades medias de RADARSAT-2 no se utilizaron para su inversión puesto que únicamente se disponía de una geometría de adquisición, lo que resultaba insuficiente para obtener una buena inversión.



**Figura 2:** Velocidades medias anuales para los diferentes periodos estudiados: A) Periodo 2006-2010 en órbita ascendente; B) Periodo 2006-2010 en órbita descendente; C) Periodo 2017-2020 en órbita ascendente; D) Periodo 2017-2020 en órbita descendente. Modificado de Fernández *et al.* (2021).



## 2.2. Inversión

Los datos de velocidades medias de deformación para los tres periodos fueron modelados para estimar la naturaleza, localización y geometría de las fuentes causantes utilizando la metodología de inversión de Camacho *et al.* (2020). El resultado del ajuste libre de los datos disponibles en LOS, para cada periodo considerado, permite obtener las fuentes de deformación como conjuntos de celdas 3D para los cuales el software de inversión ajusta automáticamente y asigna su tipo (cambios de presión, o diferentes tipos de dislocaciones: desgarre/direccional, deslizamiento y extensional/compresional), su magnitud (MPa para cambios de presión y centímetros para dislocaciones) y su posición y orientación (ángulos de los planos de dislocación).

Las fuentes modeladas se han representado en la Figura 3 para los periodos 2006-2010 y 2017-2020, coloreadas según su naturaleza. Dado que la cobertura espacial de los resultados DInSAR se ve afectada por la decorrelación temporal, para asegurar que el conjunto de datos disponía de suficiente densidad espacial para ser invertido se calcularon los valores LOS de las órbitas ascendentes y descendentes para las fuentes modeladas utilizando los modelos para cada tipo de fuente (Camacho *et al.* 2020) y se compararon los valores obtenidos con los observados. El ajuste entre ambos resultados es bastante bueno para ambas geometrías y los residuos (diferencia entre observado-modelado) tienen valores RMS inferiores a 0.4 cm/y.

En el caso del periodo 2010-2017 (datos del satélite RADARSAT-2) únicamente se dispone de velocidades medias para la órbita descendente y en su cálculo se ha utilizado un método para estimación del APS y su posterior filtrado que no es lo suficientemente preciso para un caso como La Palma, donde la topografía y ubicación hacen que presente un fuerte efecto atmosférico difícilmente modelable únicamente a partir de datos de elevación. Uno de los efectos que contribuyen a esto es el viento, que debido a que tiene una dirección predominante hace que la humedad se concentre en una de las costas de la isla. Los resultados de la inversión se muestran fuertemente afectados por estos aspectos y por ello no los hemos incluido en nuestro estudio.

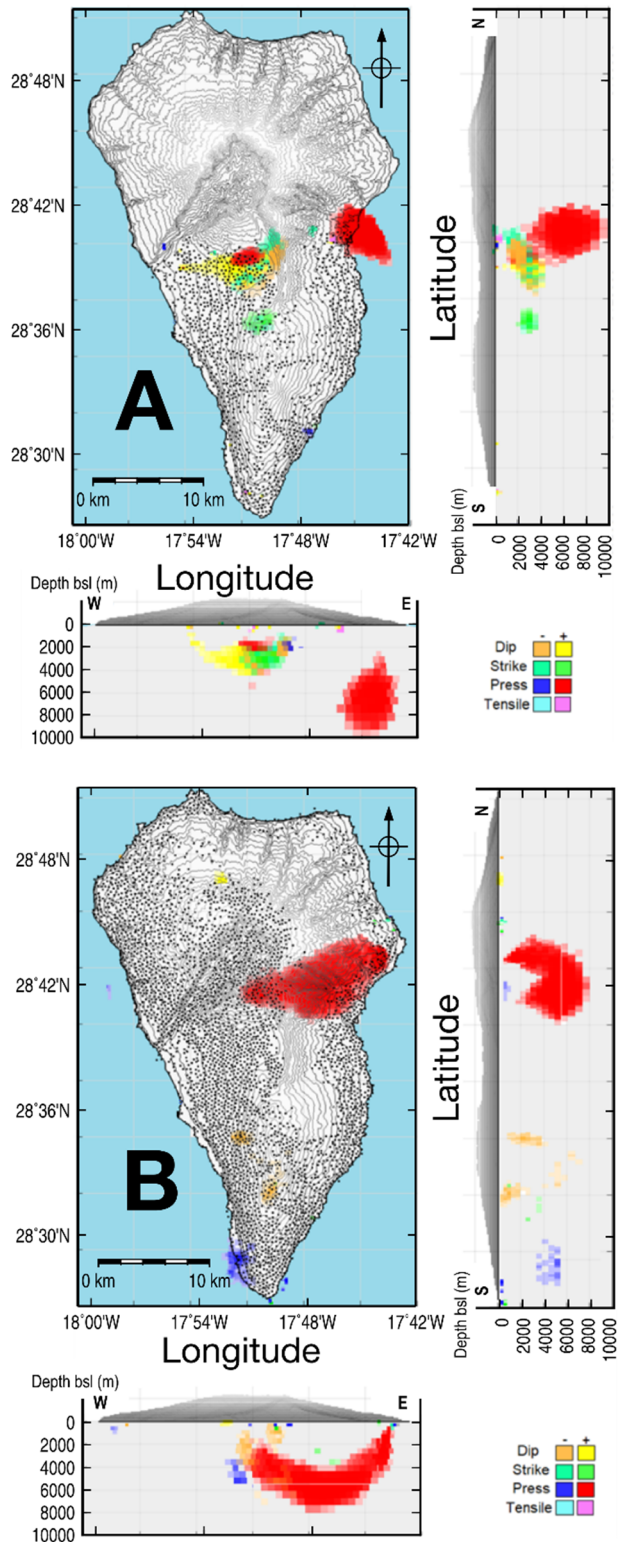
Para el periodo 2017-2020 hemos sido capaces de estudiar la evolución temporal de las fuentes modeladas. La evolución temporal de las fuentes positivas de presión para el periodo 2017-2020 se muestra en la Figura 4. Este tipo de análisis no ha sido posible para el periodo 2006-2010 debido al bajo número de imágenes y la pobre distribución temporal de que dispone el satélite ENVISAT.

## 2.3. Gravimetría estructural

Es necesario disponer de cierta información básica, como por ejemplo la estructura cortical de la isla, para poder discutir los resultados de la inversión del campo de deformación. Utilizaremos la distribución de densidades 3D por debajo de la superficie de la isla obtenido a partir de mediciones gravimétricas.

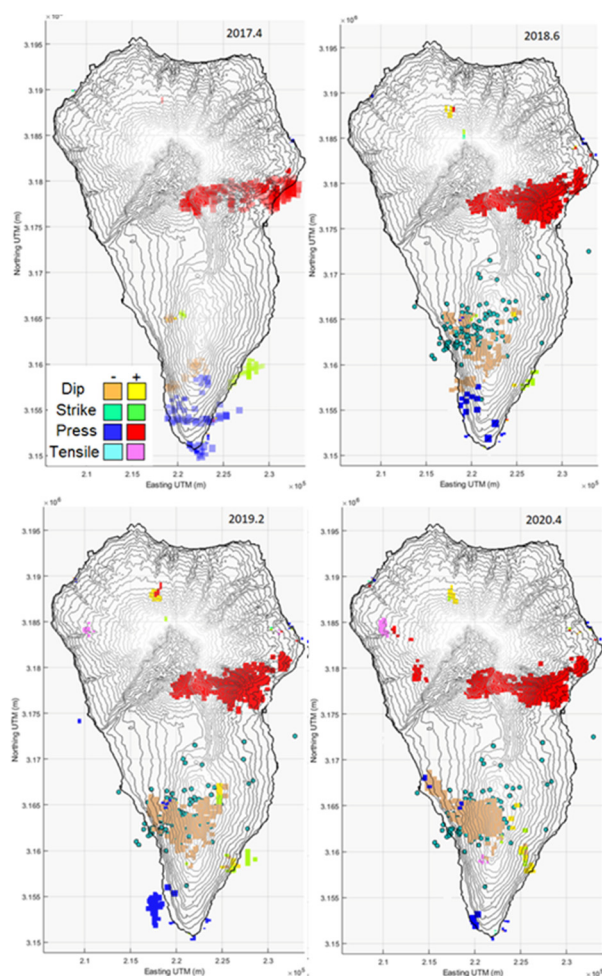
Utilizando datos de campañas gravimétricas que cubren la superficie de la isla (Camacho *et al.* 2009; Prieto *et al.* 2009), y la metodología descrita en Camacho *et al.* (2011) hemos obtenido un modelo tridimensional para las

anomalías en la distribución de densidad para la corteza de la isla. Los resultados se muestran en la Figura 5.



**Figura 3:** Ajuste del modelo para las fuentes de presión: A) Fuentes para el periodo 2006-2010; B) Fuentes para el periodo 2017-2020. En ambos casos se incluyen vistas zenital, E-W vertical y N-S vertical de las fuentes significativas. En la escala se representan los tipos de fuente y su magnitud. Modificado de Fernández *et al.* (2021).





**Figura 4:** Evolución temporal de las fuentes obtenidas a partir del modelo para el periodo 2017-2020. Se han obtenido a partir de las series temporales en ambas geometrías (ascendente y descendente) y representado para diferentes fechas del periodo 2017-2020. Los círculos verdes representan la localización de los terremotos ocurridos durante los dos ejambres sísmicos registrados (octubre 2017 y febrero 2018). Modificado de Fernández *et al.* (2021).

La característica más destacable del modelo de inversión es un gran cuerpo central de gran densidad localizado debajo de NVC (Fig. 1) y que representa la existencia de un denso cuerpo intrusivo que contrasta con el material de baja densidad que lo rodea (material eruptivo no compactado con alto grado de vesiculación, fracturas o poros). Esta es la zona donde los diques radiales que alimentan el complejo del cuerpo volcánico submarino de Garafía y el edificio de T-CN convergen (Ancochea *et al.* 1994) y se localiza el cuerpo plutónico relativamente denso que no llegó a alcanzar la superficie.

La mitad sur de la isla, que principalmente consiste en el edificio CV (125 ka hasta la actualidad), esta caracterizado por mínimos distribuidos por las principales estructuras del rift. Se detectan mínimos significativos a profundidades de 1000-2000 m bajo del nivel del mar por debajo de la pendiente oeste del CV y distribuidas de manera escalonada con un azimuth de N130°E. Esto se interpreta como asociado a proceso activo y lento de dislocación (Camacho *et al.* 2009).

### 3. Discusión y conclusiones

A partir de los resultados, podemos obtener varias hipótesis y conclusiones acerca de las fuentes responsables de las deformaciones observadas. En el caso de las fuentes de presión, debemos considerar la posibilidad de que no estén provocadas por magma y sean producidas por otras causas. Las fuentes de presión positivas, de baja intensidad, son importantes debido a sus implicaciones en el estado de actividad volcánica en la isla (Fernández *et al.* 2021).

Un aspecto importante es la detección de deformación en el Valle de Aridane (Fig. 2) mientras que en el estudio previo de González *et al.* (2010) no fue detectada durante los periodos 1992-2000 y 2003-2008. Esto, junto a otros resultados previos que no muestran anomalías antes de 2009, parece indicar que la fuente causante de la deformación superficial probablemente se activó entre 2009 y 2010, indicando el comienzo de una reactivación volcánica en la isla de La Palma tras cerca de 40 años de inactividad.

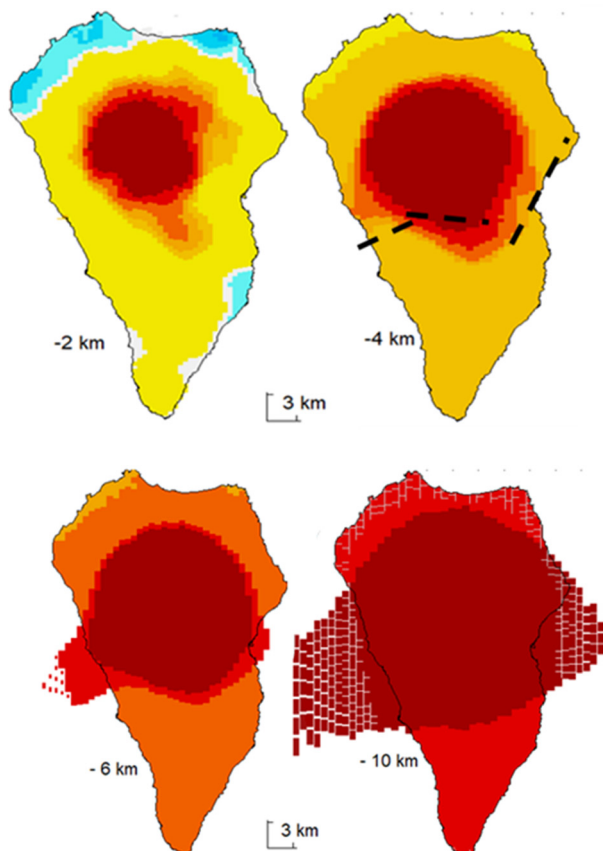
Se ha detectado un incremento en la componente magmática en las emisiones de helio en la estación de Dos Aguas en 2010, así como emisiones anómalas de CO<sub>2</sub> en las campañas llevadas a cabo en CV en 2011 y 2013 (Padrón *et al.* 2015). Estas variaciones es muy probable que hayan ocurrido como respuesta a eventos que sucediesen cerca de un año antes (Padrón *et al.* 2015) y apoyan la hipótesis de que se produjo el inicio de una fase de reactivación.

La deformación producida por intrusiones superficiales suelen ocurrir durante periodos de reactivación y es habitual que se produzcan terremotos con intensidades que pueden ser sentidos por la población (González *et al.* 2010). Este no ha sido el caso para el periodo 2006-2010, donde muy pocos terremotos tuvieron lugar en la zona de estudio. Sin embargo, las reactivaciones pueden tener una sismicidad muy baja o indetectable (McNutt and Roman 2015). Por ejemplo, si consideramos la actividad volcánica reciente en la zona, la sismicidad precursora a la erupción de 1949 (Klügel *et al.* 2000) comenzó en 1936 en el Valle de Aridane, a 5-10 Km de los conos volcánicos, y continuaron durante unos meses antes de la erupción en la zona de Fuencaiente, a unos 10 km del cono de Duraznero. Los conos de Llano del Blanco y Hoyo Negro se abrieron sin que existiese sismicidad precursora. Entre 1936 y 1949 el magma ascendió desde el manto superior y se acumuló a diferentes niveles en la corteza sin que se sintiese actividad sísmica.

La actividad sísmica reciente empezó con dos enjambres sísmicos en 2017 y 2018 localizados a aproximadamente 15 km al sur de las fuentes de presión modeladas (Torres-González *et al.* 2020). Por tanto, podemos estar estudiando una fase muy inicial de reactivación volcánica decenas de años antes de una posible erupción (Fisher and Schmincke 1984), si esta llegase a ocurrir. Se estima que alrededor del 80% de los magmas que se forman en el entorno oceánico intraplaca no entran en erupción (Fernández *et al.* 2021).

Al observar la variación temporal de las fuentes modeladas en 2017-2020 (Fig. 4), se observa que la presión positiva de la fuente aumenta hasta 2019, casi con certeza relacionada con los dos enjambres sísmicos, que probablemente abrieron nuevas fracturas facilitando

el ascenso de gases volcánicos y magma (Fernández *et al.* 2021). El mayor incremento parece estar asociado con los dos enjambres sísmicos entre 2017 y 2018. Ambos enjambres sísmicos fueron precedidos y acompañados de cambios en las emisiones de helio y dióxido de carbono, lo que sugiere una intrusión magmática por debajo de CV.



**Figura 5:** Secciones horizontales de la estructura anómala de densidad tridimensional y localización de las fuentes de presión modeladas para el periodo 2006-2010. Las secciones horizontales están tomadas a diferentes profundidades desde 2 km hasta 10 km bajo el nivel del mar. Modificado de Fernández *et al.* (2021).

La presión siguió aumentando durante 2019, probablemente asociada a una recarga asísmica. A partir de 2019, la presión promedio permanece constante o disminuye. Las fuentes de dislocación bajo CV son poco intensas en el periodo 2017-2018, pero a partir de 2019

aumentan, contrariamente a los valores de presión. Su ubicación (Fig. 4) coincide con el área donde la mayoría de los terremotos de los enjambres sísmicos se localizan y comenzaron a crecer varios meses después del segundo enjambre (Fernández *et al.* 2021). Estas fuentes podrían estar asociadas con fracturas y, considerando el peligro de deslizamiento de flanco existente, su evolución necesita seguir siendo monitorizada e interpretada.

El uso de técnicas DInSAR (con una corrección atmosférica en el estado del arte y utilizando ambas geometrías de adquisición, ascendente y descendente) resulta ser una herramienta fundamental para la monitorización y la detección de una posible reactivación volcánica teniendo en cuenta la distribución espacial y temporal de la deformación observada. Realizar campañas de medición GNSS puede resultar muy difícil y costoso en un entorno como La Palma, además de poder encontrar situaciones donde la magnitud de la deformación se encuentra en el límite de precisión ofrecido por este tipo de mediciones haciendo que no sean detectados este tipo de deformaciones (Escayo *et al.* 2020; Fernández *et al.* 2018, 2021). Sin embargo, disponer de estaciones GNSS resulta crucial para poder establecer puntos de referencia para las técnicas DInSAR (Fernández *et al.* 2018, 2021).

Los resultados obtenidos a partir de la inversión conjunta de los conjuntos de datos ascendente y descendente presentan una variedad de fuentes actuando simultáneamente, lo que no sería posible obtener a partir de técnicas de inversión y modelos clásicos que únicamente consideran fuentes magmáticas. Esto es importante en La Palma, donde se pueden producir deslizamientos de ladera como consecuencia de actividad volcánica.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto de investigación DEEP-MAPS (RTI2018-093874-B-100) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. También ha sido parcialmente financiado por el proyecto del CSIC 201530E019, el proyecto GEOSIR (AYA2010-17448) del Ministerio de Ciencia e Innovación y el proyecto del MINECO CGL2017-86241-R. Agradecemos a DARES S.L por la licencia de uso del software interferométrico CPT en este estudio. Este trabajo representa una contribución a la plataforma interdisciplinar del CSIC PTI TELEDETECT.

## References

- ANCOCHEA, E., HERNÁN, F., CENDRERO, A., CANTAGREL, J.M., FÚSTER, J., IBARROLA, E., and COELLO, J., 1994. Constructive and destructive episodes in the building of a young Oceanic Island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **60**, pp. 243–262. DOI: 10.1016/0377-0273(94)90054-X
- BLANCO-SÁNCHEZ, P., MALLORQUÍ, J.J., DUQUE, S., and MONELLS, D., 2008. The coherent pixels technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring. *Pure Appl. Geophys.*, **165**, pp. 1167–1193. DOI: 10.1007/s00024-008-0352-6
- CAMACHO, A.G., FERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ, P.J., RUNDLE, J.B., PRIETO, J.F., and ARJONA, A., 2009. Structural results for La Palma island using 3-D gravity inversion. *J. Geophys. Res.*, **114**, B05411. DOI: 10.1029/2008JB005628
- CAMACHO, A.G., FERNÁNDEZ, J., and GOTTSMANN, J., 2011. A new gravity inversion method for multiple subhorizontal discontinuity interfaces and shallow basins. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **116**. DOI: 10.1029/2010JB008023

- CAMACHO, A.G., FERNÁNDEZ, J., SAMSONOV, S. V., TIAMPO, K.F., and PALANO, M., 2020. 3D multi-source model of elastic volcanic ground deformation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **547**, 116445. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116445
- CARRACEDO, J.C., BADIOLA, E.R., GUILLOU, H., DE LA NUEZ, J., and PÉREZ TORRADO, F.J., 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estud. Geol.*, **57**, pp. 175–273. DOI: 10.3989/egol.01575-6134
- ESCAYO, J., FERNÁNDEZ, J., PRIETO, J.F., CAMACHO, A.G., PALANO, M., APARICIO, A., RODRÍGUEZ-VELASCO, G., and ANCOCHEA, E., 2020. Geodetic Study of the 2006–2010 Ground Deformation in La Palma (Canary Islands): Observational Results. *Remote Sens.*, **12**, 2566. DOI: 10.3390/rs12162566
- FERNÁNDEZ, J., ESCAYO, J., HU, Z., CAMACHO, A. G., SAMSONOV, S. V., PRIETO, J. F., TIAMPO, K.F., PALANO, M., MALLORQUÍ, J.J., and ANCOCHEA, E., 2021. Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications. *Scientific reports*, **11**(1), pp. 1-15. DOI: 10.1038/s41598-021-82292-3
- FERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ, P.J., CAMACHO, A.G., PRIETO, J.F., and BRÚ, G., 2015. An Overview of Geodetic Volcano Research in the Canary Islands. *Pure Appl. Geophys.*, **172**, pp. 3189–3228. DOI: 10.1007/s00024-014-0916-6
- FERNÁNDEZ, J., PEPE, A., POLAND, M.P., and SIGMUNDSSON, F., 2017. Volcano Geodesy: Recent developments and future challenges. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **344**, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.08.006
- FERNÁNDEZ, J., PRIETO, J.F., ESCAYO, J., CAMACHO, A.G., LUZÓN, F., TIAMPO, K.F., PALANO, M., ABAJO, T., PÉREZ, E., VELASCO, J., HERRERO, T., BRU, G., MOLINA, I., LÓPEZ, J., RODRÍGUEZ-VELASCO, G., GÓMEZ, I., and MALLORQUÍ, J.J., 2018. Modeling the two- and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Sci. Rep.*, **8**, 14782. DOI: 10.1038/s41598-018-33128-0
- FISHER, R. V., and SCHMINCKE, H.U., 1984. *Pyroclastic rocks*. Pyroclastic rocks. DOI: 10.1029/eo066i009p00092-03
- GONZÁLEZ, P.J., TIAMPO, K.F., CAMACHO, A.G., and FERNÁNDEZ, J., 2010. Shallow flank deformation at Cumbre Vieja volcano (Canary Islands): Implications on the stability of steep-sided volcano flanks at oceanic islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, pp. 545–557. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.07.006
- HU, Z., and MALLORQUÍ, J.J., 2019. An Accurate Method to Correct Atmospheric Phase Delay for InSAR with the ERA5 Global Atmospheric Model. *Remote Sens.*, **11**, 1969. DOI: 10.3390/rs11171969
- KLÜGEL, A., HOERNLE, K.A., SCHMINCKE, H.-U., and WHITE, J.D.L., 2000. The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **105**, pp. 5997–6016. DOI: 10.1029/1999JB900334
- MARTÍ, J., ORTIZ, R., GOTTSMANN, J., GARCIA, A., and DE LA CRUZ-REYNA, S., 2009. Characterising unrest during the reawakening of the central volcanic complex on Tenerife, Canary Islands, 2004–2005, and implications for assessing hazards and risk mitigation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **182**, pp. 23–33. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.028
- MARTÍ, J., PINEL, V., LÓPEZ, C., GEYER, A., ABELLA, R., TÁRRAGA, M., BLANCO, M.J., CASTRO, A., and RODRÍGUEZ, C., 2013. Causes and mechanisms of the 2011-2012 El Hierro (Canary Islands) submarine eruption. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, pp. 823–839. DOI: 10.1002/jgrb.50087
- MCNUTT, R., and ROMAN, D.C., 2015. Volcanic Seismicity. *The Encyclopedia of Volcanoes*. pp. 1011–1034. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00059-6
- PADRÓN, E., PÉREZ, N.M., RODRÍGUEZ, F., MELIÁN, G., HERNÁNDEZ, P.A., SUMINO, H., PADILLA, G., BARRANCOS, J., DIONIS, S., NOTSU, K., and CALVO, D., 2015. Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bull. Volcanol.*, **77**, p. 28. DOI: 10.1007/s00445-015-0914-2
- PRIETO, J.F., GONZÁLEZ, P.J., SECO, A., RODRÍGUEZ-VELASCO, G., TUNINI, L., PERLOCK, P.A., ARJONA, A., APARICIO, A., CAMACHO, A.G., RUNDLE, J.B., TIAMPO, K.F., PALLERO, J.L.G., POSPIECH, S., and FERNÁNDEZ, J., 2009. Geodetic and Structural Research in La Palma, Canary Islands, Spain: 1992–2007 Results. *Pure Appl. Geophys.*, **166**, pp. 1461–1484. DOI: 10.1007/s00024-009-0505-2
- SAMSONOV, S. V., and D'OREYE, N., 2017. Multidimensional Small Baseline Subset (MSBAS) for Two-Dimensional Deformation Analysis: Case Study Mexico City. *Can. J. Remote Sens.*, **43**, pp. 318–329. DOI: 10.1080/07038992.2017.1344926
- STAUDIGEL, H., FERAUD, G., and GIANNERINI, G., 1986. The history of intrusive activity on the island of La Palma (Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **27**, pp. 299–322. DOI: 10.1016/0377-0273(86)90018-1
- TORRES-GONZÁLEZ, P.A., LUENGO-OROZ, N., LAMOLDA, H., D'ALESSANDRO, W., ALBERT, H., IRIBARREN, I., MOURE-GARCÍA, D., and SOLER, V., 2020. Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **392**, 106757. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.106757
- URGELES, R., MASSON, D.G., CANALS, M., WATTS, A.B., and LE BAS, T., 1999. Recurrent large-scale landsliding on the west flank of La Palma, Canary Islands. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **104**, pp. 25331–25348. DOI: 10.1029/1999JB900243

WARD, S. N., and DAY, S., 2001. Cumbre Vieja volcano—potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, **28**(17), pp. 3397-3400. DOI: 10.1029/2001GL013110



## UNDERSTANDING VERTICAL GROUND DISPLACEMENT FROM P-SBAS USING GETIS-ORD $G_i^*$ STATISTIC

### INTERPRETANDO EL DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL SUELO DESDE P-SBAS UTILIZANDO LA ESTADÍSTICA $G_i^*$ DE GETIS-ORD

Ignacio Barbero<sup>a,\*</sup>, Raúl Páez<sup>b</sup>, Cristina Torrecillas<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, Spain. [ignacio\\_barbero@us.es](mailto:ignacio_barbero@us.es)

<sup>b</sup> Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Spain. [raul.paez@uca.es](mailto:raul.paez@uca.es)

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, Spain. [torrecillas@us.es](mailto:torrecillas@us.es)

#### Abstract:

The Differential Synthetic Aperture Radar Interferometric (DInSAR) algorithm has already shown its importance in volcanic monitoring. However, it is limited by atmospheric perturbations or temporal decorrelation, implying the existence of low-coherence records that must be discarded. In vast studied areas, with thousands of points unevenly distributed, the interpretation of the results is usually complicated. This text presents an analysis of the vertical component variation on Tenerife island (Canary Islands), from 2005 to 2010, using Getis-Ord  $G_i^*$  spatial statistic on ENVISAT DInSAR images. The ascending and descending images have been processed using the Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS) algorithm, within ESA Grid Processing on Demand cloud environment. From Line of Sight results of both tracks, the vertical deformation speeds have been calculated over 72,207 points with high coherence ( $> 0.7$ ). Finally, the  $G_i^*$  statistic has been applied, obtaining a map with statistical significance, where the high values of  $G_i^*$ , both positive and negative, imply the spatial clustering of likely ground movements. This map highlights areas with variable vertical kinematics on Tenerife Island, contributing to understanding of its geodynamics. The displacements obtained coincide with previous studies, even showing possible new relationships between some phenomena that should be considered. The  $G_i^*$  spatial statistic is an efficient and quick tool to extract information in a regional scale kinematic study.

**Key words:** subsidence, ENVISAT, DInSAR, spatial statistic, Tenerife

#### Resumen:

El algoritmo de Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR) ha mostrado su utilidad en la detección de cambios en la componente vertical en zonas vulcanológicas activas. Sin embargo, sus limitaciones en la obtención de datos, debido a perturbaciones atmosféricas o decorrelación temporal, implica la existencia de registros con poca coherencia que deben ser desechados. Cuando el área a estudiar tiene una extensión significativa, con miles de puntos distribuidos no homogéneamente por la zona, se complica la interpretación de los resultados. En este texto se presenta el análisis de la variación de la componente vertical de la isla de Tenerife (Canarias), desde 2005 a 2010, empleando la estadística espacial  $G_i^*$  de Getis-Ord sobre los resultados obtenidos a partir del tratamiento de imágenes ENVISAT. Se han procesado las imágenes ascendentes y descendentes, usando el algoritmo Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS), dentro del entorno de la ESA en la nube denominado *Grid Processing on Demand*. Desde los resultados en línea de vista de ambas trayectorias, se ha calculado las velocidades de deformación vertical para 72.207 puntos con alta coherencia ( $>0.7$ ). Finalmente, se ha aplicado la estadística espacial  $G_i^*$  de Getis-Ord a dichas velocidades, obteniendo un mapa con significación estadística, en el que los valores altos del estadístico  $G_i^*$ , tanto positivos como negativos, implican la agrupación espacial de posibles movimientos del terreno. Este mapa destaca las áreas con cinemática vertical variable para toda la isla de Tenerife, ayudando a la comprensión de la geodinámica de la isla. Los desplazamientos obtenidos son coherentes con otros estudios, incluso muestran posibles relaciones entre algunos fenómenos que deberían ser tenidos en cuenta. Consideramos el uso del estadístico espacial  $G_i^*$  una herramienta eficaz y rápida para extraer información en un estudio cinemático a escala regional.

**Palabras clave:** subsidencias, ENVISAT, DInSAR, estadística espacial, Tenerife

## 1. Introduction

Europe's COPERNICUS programme (ESA 2021a) provides global data from satellites as well as land, air and maritime measuring systems, spanning an extended period time. The image services are usually free to access

and include information from SAR sensors, such as ENVISAT or Sentinel-1. Furthermore, developments relating DInSAR algorithms, such as the algorithm Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS) (de Luca *et al.* 2015; Casu *et al.* 2014), enable the generation of surface deformations time series. This algorithm is one of the

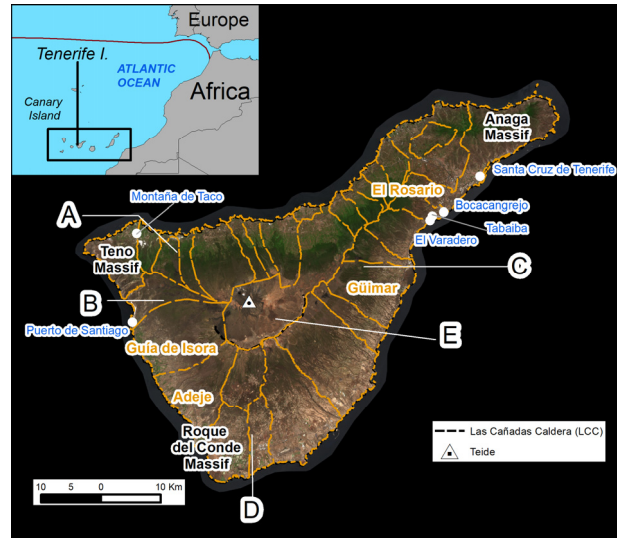
\* Corresponding Author: Ignacio Barbero, [ignacio\\_barbero@us.es](mailto:ignacio_barbero@us.es)

SBAS techniques (Berardino *et al.* 2002) in the Grid Processing on Demand (G-POD) environment of ESA's Geohazards (ESA 2021b). G-POD accesses to ESA IT facilities, as well as its Earth Observation (EO) data files, and provides a friendly web user interface to process in cloud servers, instead of traditional desktop workstations. Some studies highlight the development of this tool to identify, monitor and evaluate risks related to geological processes (Galve *et al.* 2017).

The P-SBAS algorithm also permits generation of deformation time series in a very short time, taking advantage of distributed computing systems, by combining the available interferometric pairs. The results offer a high density of points with information to analyze, in locations where other terrestrial techniques have greater difficulty to collect observations p.e. due to the high cost of the GNSS network infrastructure and / or difficulty for physical accessing. These values are usually determined in the line of sight (LOS), not vertically, so the interferograms must be performed between passes in the same direction (ascending or descending). By comparing the matching values found amongst the results in both directions, it is possible to establish the vertical component in subsidence studies (Rosi *et al.* 2014).

Meanwhile, in vast study areas, such as the island of Tenerife (the Canary Islands) which covers over 2000 km<sup>2</sup> (Fig. 1), the high spatial resolutions of the SAR data (ENVISAT 5x25m), the improvement in the impact of atmospheric delays or the residual topographic values (Blanco-Sánchez *et al.* 2008), or the development of Persistent Scatterer Interferometry techniques (Crosetto *et al.* 2016), have increased the amount of highly coherence points available. Viewing the data available for the island at the same time can complicate the interpretation of results and the drawing of conclusions. This is particularly true if the phenomenon is regional and affect the entire island with small extensions. Given the speed with which it is possible to analyse large sets of vector points nowadays, it would be interesting to improve the detection of local anomalies in extensive areas, mapping those areas of interest irrespective of their size. The novelty of the proposed method is in the use of the graphic feature points instead raster data. These points are obtained directly from the image processing, avoiding resampling of data and its associated error. In this way, pattern identification techniques based on the clustering of geospatial data of statistical significance, are an interesting tool.

The Getis-Ord  $G_i^*$  statistic is commonly used for hot/cold spot detection. It has already been used for space or space-time analysis in several recent studies within the field of Earth Sciences. Specifically, this has been used to improve the identification of tectonic structures and large landslides using geological data (Troiani *et al.* 2017); Páez *et al.* (2017) used it in the spatial-temporal analysis of user tracking for an active GNSS network by searching areas which were constantly used within a region, or on slope slides from SAR data (Lu *et al.* 2012; Teshebaeva *et al.* 2019; Lin *et al.* 2021). In this study case, its use is proposed on the elevation velocity values obtained from the LOS time series of P-SBAS processing. The application on these data can offer a map, with statistical significance, in which the high values of the  $G_i^*$  statistic, both positive and negative, imply the spatial grouping of anomalous vertical ground displacements.



**Figure 1:** Municipalities (orange lines and text), some geological places and towns and, the subsidence zones studied in Tenerife: Garachico (A); Chío (B); East (C); South (D) and Las Cañadas Caldera (E). All figures in EPSG 25828.

This research presents a new DInSAR study on Tenerife. The choice of the island of Tenerife for a DinSAR study using this statistic is due to several reasons: 1) to the limited vegetation that due to its volcanic nature and altitude, offering a high level of coherence in DInSAR data; 2) to the presence of as many as four areas which are experiencing local subsidence detected in some studies both prior to and since Teide's volcanic reactivation in 2004; 3) to no existence of the vertical velocity data derived from LOS of ascending and descending images published in any previous SAR study; and, 4) to the knowledge that the authors have about the geodynamics of the island from prior GNSS studies (Barbero *et al.* 2018; 2021). In this analysis, images from the ENVISAT satellite have been used between 2004 and 2010. This period covers a temporal space not presented in previous publications and closed to the detection of two new subsidence to the East and the South of Las Cañadas del Teide (LCC in Figure 1). The vertical velocities calculated using DInSAR will better evaluate the subsidence values than those offered in other studies and, finally, the application of the Getis-Ord  $G_i^*$  statistic on these data will highlight anomalous areas with statistical significance. It will improve the physical delimitation of these areas throughout the island. These areas may be comparable and added to those set out in the Vulnerable Elements Activity Map (VEAM) of Tenerife island, obtained from SENTINEL-1 images with only two years of time period (Solari *et al.* 2018).

## 2. Background

Tenerife is the largest island of a volcanic complex with seven islands called the Canary Islands. It is located in the Atlantic Ocean, close to the African passive continental margin (Fig. 1). The island has an active volcano named Teide, the world's third-highest volcanic structure with a height of 7,200 m from the seafloor, 3,718 m above sea level. The origin of the Canary Islands and its volcanism is still a matter of controversy with evidence for a mantle plume (Geldmacher *et al.* 2001; Mériaux *et al.* 2015), regional tectonics (Mezcua *et al.* 1992;

Mantovani *et al.* 2007; Domínguez-Cerdeña *et al.* 2011) or a combination of both.

The unusual increase in seismic events in 2004, with some earthquakes ( $M > 3$ , with depths between 0–17 km) felt by the population (Almendros *et al.* 2007; Domínguez Cerdeña *et al.* 2018; Domínguez-Cerdeña, del Fresno, and Rivera 2011), increased the surface deformation studies on the island using SAR data. The first studies were carried out between 1992 and 2000 from 18 SAR images (Fernández *et al.* 2003) (see Table 1) and revealed two subsiding areas, Garachico (A in Figure 1) measuring with 10 cm and an extension of 15 Km<sup>2</sup> and Chío (B in Figure 1) with 3 cm and 8 Km<sup>2</sup> in the northwest area of the island. These height variations were partially attributed to a decrease of the groundwater level due to water extraction, in times of scarcity, from some of 1052 horizontal underground galleries confirmed in Tenerife. The Garachico deformation has evolved more steadily, by approximately 10 mm/yr since 1992. The Chío deformation was almost the same size in 1992–1998 as in 1998–2000, and it seems to have increased more in the latter period (Custodio *et al.* 2016; Fernández *et al.* 2005). Using data collected between 1992 and 2005, a period which included the 2004 unrest, a DInSAR study with 55 descending images between 1992 and 2005 detected, besides the two-known subsidence, two new ones to the East (C in Figure 1) and South of LCC (D in Figure 1). Part of this deformation can be attributed to drops in water table interacting with existing faults. Finally, this study detected a broad subsidence pattern with maximum ground velocities of about 4 mm/year related to

gravitational sinking of the dense core of the island into a weak lithosphere (Fernández *et al.* 2009). In following studies, Chío subsidence is usually detected and on lesser occasions the rest. A summary of those researches are presented in Table 1.

### 3. Input data

The satellite for the ENVISAT mission features C-band sensors with a wavelength of 5.6cm, review period of 35 days, angle of incidence of 23° and a nominal pixel resolution of 5m x 25m. The data used from the ENVISAT satellite cover two different tracks for the studied area: 388 ascending and the 352 descending. The details of ENVISAT data used in this work are summarized in Table 2.

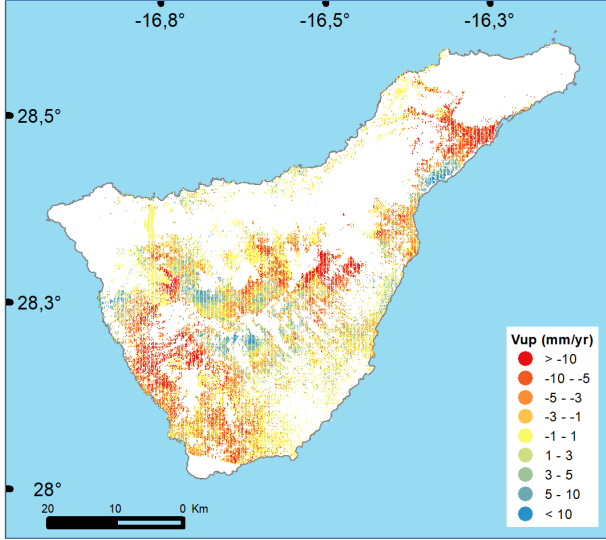
The result of the calculation of the vertical velocity ( $V_v$ ), following Rosi *et al.* (2014) methodology, was 72,204 coincident points between 153,268 ascending points and 154,985 descending. The method also gives us the possibility of ruling out areas affected by sliding from the main direction of deformation, which are not the target and are considered as noise in the analysis. To achieve this, the points whose angular value of the main direction of deformation is between  $\geq 45^\circ$  and  $\leq -45^\circ$  were filtered. These angles have been obtained from the trigonometric relationships for the vertical velocity components and the projected in the East direction. Finally, the final set or data input consisted of 55,225 points with  $V_v$  velocity spread throughout the island (Fig. 2).

**Table 1:** Previous DInSAR studies in Tenerife.

Years/Platform	Methodology and Data	Analysis (Reference)
1992-2000/ERS-1, ERS-2	LOS + GNSS (Fringe) 18 descending images 21 interferograms	No deformation in LCC (E in Figure 1). Garachico subsidence: 5-10 cm, increasing. Chío subsidence: 3-5 cm, increasing. (Fernández <i>et al.</i> 2003; Fernández <i>et al.</i> 2005)
1992-2005/ERS-1, ERS-2	LOS (SBAS) 55 descending images 182 interferograms	No deformation in LCC. Detected Chío and Garachico subsidence. Two new subsidence in East (8 cm) and South (6 cm) of Teide. A broad subsidence pattern about 4 mmyr <sup>-1</sup> (Fernández <i>et al.</i> 2009)
2003-2006/ENVISAT	LOS (Terrain correction) 13 ascending images 4 interferograms 16 descending images 1 interferogram	No deformation in LCC. No clear subsidence from DInSAR data (Samsonov <i>et al.</i> 2008)
2003-2008/ENVISAT	LOS (Coherent pixel) 19 ascending images (5 years) 25 descending images (4 years)	Garachico: 2-8 cm (asc) and 4 cm (des) Chio: 4 cm (both) (Arjona <i>et al.</i> 2010)
2015-2018/SENTINEL-1	LOS + GNSS (PSI) 40 ascending images 135 descending images	Four subsidence: 5 mmyr <sup>-1</sup> Central area: 5 mmyr <sup>-1</sup> (Dias <i>et al.</i> 2018)
2014-2016/SENTINEL	LOS (PSI) 51 descending images	218 ADAs with threshold $\pm 4$ mmyr <sup>-1</sup> (Solari <i>et al.</i> 2018)

**Table 2:** ENVISAT image used.

Start	Stop	Track	Pass	Nº images
11/06/2004	08/10/2010	352	Descending	34
13/02/2005	03/05/2009	388	Ascending	33



**Figure 2:** 2004-2010 Vertical kinematic of Tenerife Island.

#### 4. Methodology

The Getis-Ord  $G_i^*$  statistic is a local-level spatial autocorrelation index where spatial dependence is assumed (Anselin and Rey 2010; Ord and Getis 1995), something that is previously established using Moran's I global statistic (Anselin 1995). A  $G_i^*$  statistic is calculated for each point  $i$  from the cluster of observations closer than a threshold  $d$  from  $i$ , where  $i$  is identified with a geographical location. This can be formally expressed with a binary weight matrix  $W(d)$ , where matrix elements are  $w_{ij}(d) = 1$  if the distance from  $i$  to  $j$  is less than  $d$ , and  $w_{ij}(d) = 0$  in other case. Thus, we define the Getis-Ord  $G_i^*$  local statistic reference to  $d$  as Eq. (1):

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (1)$$

where

$x_j$  = attribute vertical velocity  $Vv$  at location  $j$  ( $j$  may equal  $i$ )

$n$  = total number of points with  $Vv$  calculated

The distribution of the  $G_i^*(d)$  statistic is normal when the normality is also observed in the underlying distribution of variable  $X$ . However, when the underlying distribution is nonnormal, the statistic test becomes nonnormal correspondingly. Increasing the number of spatial points in the clusters analyzed will help the distribution of the  $G_i^*$  statistic approach normality (Caldas de Castro and Singer 2006; Songchitruksa and Zeng 2010). The most common method is to raise the value of  $d$  to include more  $x_j$ . Under the exact or asymptotical normal conditions,  $G_i^*(d)$  is usually standardized, obtaining the standard normal variates, Eq. (2):

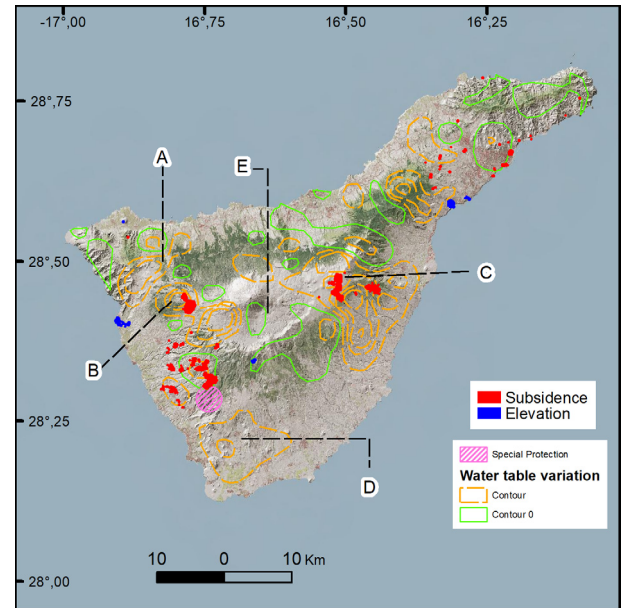
$$Z(G_i^*(d)) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}^2(d)}{s \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2(d) - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (2)$$

This is essentially a  $Z$  score and therefore can be expressed as statistical significance. Therefore, significant negative  $Z$  reveals spatial clustering of low values of  $Vv$  within distance  $d$ , while significant positive  $Z$  are indicative of spatial clustering of high values of  $Vv$  within distance  $d$ .

To calculate the threshold of the parameter  $d$ , the spatial correlogram has been applied to the analysis phenomenon, which is an alternative measure of global spatial autocorrelation that is not based on the specification of a spatial weighting matrix. Instead, a local regression fits the covariances or correlations calculated for all pairs of observations as a function of the distance between them (Bjørnstad and Falck 2001).

#### 5. Results and discussion

The Getis-Ord  $G_i^*$  statistic results offer a clustering and significance map based on a weight matrix. Considering subsidence areas with high significance values with respect to their surroundings, see Figure 3. This statistic clearly identifies and limits the subsidence of Chío (to the east of this town, in the North of municipality of Guía de Isora, see B in Figure 1). Furthermore, the subsidence to the east of LCC (C in Figure 1) is identified but composed of two areas: that of the Fernández *et al.* (2009) and a new one at the east of this main one (in the municipality of Guimar).



**Figure 3:** High significance area of  $G_i^*$  statistic (red and blue areas) and variation of the water table level 1985-2000 with isolines every 20 m (CIATF 2021)

This study visualizes new dynamics to consider. Firstly, about subsidence, several subsidence blocks to the south of Chío and calculated with equal significance as Chío (the municipality of Guía de Isora and Adeje). In addition, this is the first time that it is worth commenting on some data in the Anaga massif (municipality El Rosario), defined as several small areas, perhaps due to the lack of



coherence density. There are other small subsidence areas in this massif in the city of Santa Cruz de Tenerife and its surroundings, in urban areas. All these areas are linked to zones where the water table had decreased in the period 1985-2000 (Fig. 3). It is unknown whether this level has dropped over the following years.

Secondly, two elevations are identified in urban areas: north-eastern coast (villages of El Varadero, Tabaiba and Bocacangrejo, inside of El Rosario municipality), and to the west of the island (villages of Puerto de Santiago and Montaña de Taco), see Figures 1 and 3. There is only one elevation in a non-urban area, on the outer south edge of the LCC and located in a stream of lava. Finally, nothing relevant is detected within the LCC, in Garachico (A in Figure 1) or in the south of the island (D in Figure 1), due to the significance of the  $G_i^*$  statistic is lower (D and E) or the number of input data is poor (A).

## 6. Conclusions

This study provides vertical velocities for the island of Tenerife, derived from ascending and descending paths of the ENVISAT satellite, using the P-SBAS multi-temporal interferometric methodology as a baseline between 2004 and 2010. The DInSAR vertical velocity map offers heterogeneous results and a lack of data for the entire island (Fig. 2). The Getis-Ord  $G_i^*$  statistic was applied to the calculated vertical velocities, obtaining a map which represents the clustering of points with similar absolute vertical velocities. Filtering by those of high statistical significance, the procedure used made it

possible to identify and delimit anomalous subsidence and elevation phenomena on both a regional and local scale.

Furthermore, a temporary space not previously studied has been covered starting at the beginning of the detection of new subsidence areas to the east and south of LCC (Fernández *et al.* 2009). Although subsequent studies did not detect them (Samsonov *et al.* 2008; Arjona *et al.* 2010), Sentinel-1 derived data had re-tagged them with velocities greater than 4 mm/yr (Solari *et al.* 2018; Dias, Catalao, and Marques 2018).

The subsidence results were linked to the effects of settlement due to local drops in the water table, resulting in subsidence in the areas with the most significant decreases, of as much as 40m or 60m over a fifteen-year period according to the CIATF map (Fig. 3). It was not possible to correctly delimit the subsidence in Garachico using geostatistics, but in this case, it was due to a lack of points in the surrounding area during both passes. Also, new dynamics have been detected that should be monitored now that Sentinel-1 has already enough temporality for it and confirm or not their evolutions.

Finally, note the lack input data in the northern part of the island, coinciding with dense vegetation areas. These areas offer low phase coherence, a basic requirement when processing SAR images multitemporal, and requires completing these studies with other ground-based methodologies (GNSS or classical geodesy) to cover the whole island.

## References

- ALMENDROS, J., IBÁÑEZ, J. M., CARMONA, E., and ZANDOMENEGHI, D., 2007. Array analyses of volcanic earthquakes and tremor recorded at Las Cañadas caldera (Tenerife Island, Spain) during the 2004 seismic activation of Teide volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **160**(3-4), pp. 285-299. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.10.002
- ANSELIN, L., 1995. Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, **27**(2), pp. 93–115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x
- ANSELIN, L., and REY, S. J., 2010. Perspectives on Spatial Data Analysis. In *Advances in Spatial Science*, **61**, pp. 1–20. DOI: 10.1007/978-3-642-01976-0\_1
- ARJONA, A., MONELLS, D., FERNÁNDEZ, J., DUQUE, S., and MALLORQUI, J., 2009. Deformation analysis employing the Coherent Pixel Technique and ENVISAT and ERS images in Canary Islands. In *Proc. of Fringe*.
- BARBERO, I., TORRECILLAS, C., PÁEZ, R., PRATES, G., and BERROCOSO, M., 2021. Recent Macaronesian kinematics from GNSS ground displacement analysis. *Studia Geophysica et Geodaetica*, **65**(1), pp. 15-35. DOI: 10.1007/s11200-020-1122-x
- BARBERO, I., TORRECILLAS, C., PRATES, G., PÁEZ, R., GARATE, J., GARCÍA, A., and BERROCOSO, M., 2018. Assessment of ground deformation following Tenerife's 2004 volcanic unrest (Canary Islands). *Journal of Geodynamics*, **121**, pp. 1-8. DOI: 10.1016/j.jog.2018.06.002
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R., and SANSOSTI, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, **40**(11), pp. 2375-2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792
- BJØRNSTAD, O. N., and FALCK, W., 2001. Nonparametric spatial covariance functions: estimation and testing. *Environmental and Ecological Statistics*, **8**(1), pp. 53-70. DOI: 10.1023/A:1009601932481
- BLANCO-SANCHEZ, P., MALLORQUÍ, J. J., DUQUE, S., and MONELLS, D., 2008. The coherent pixels technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring. In *Earth sciences and mathematics* (pp. 1167-1193). Birkhäuser Basel. DOI: 10.1007/s00024-008-0352-6
- CALDAS DE CASTRO, M., and SINGER, B. H., 2006. Controlling the false discovery rate: a new application to account for multiple and dependent tests in local statistics of spatial association. *Geographical Analysis*, **38**(2), pp. 180-208. DOI: 10.1111/j.0016-7363.2006.00682.x

- CASU, F., ELEFANTE, S., IMPERATORE, P., ZINNO, I., MANUNTA, M., DE LUCA, C., and LANARI, R., 2014. SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **7**(8), pp. 3285-3296. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2322671
- CIATF. 2021. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Plan Hidrológico Insular de Tenerife (aguastenerife.org). Available: [https://www.aguastenerife.org/images/pdf/documentacion\\_grafica/plano16.pdf](https://www.aguastenerife.org/images/pdf/documentacion_grafica/plano16.pdf) [7/15, 2021].
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., DEVANTHÉRY, N., and CRIPPA, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, pp. 78-89. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
- CUSTODIO, E., DEL CARMEN CABRERA, M., PONCELA, R., PUGA, L. O., SKUPIEN, E., and DEL VILLAR, A., 2016. Groundwater intensive exploitation and mining in Gran Canaria and Tenerife, Canary Islands, Spain: Hydrogeological, environmental, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, **557**, pp. 425-437. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.038
- DE LUCA, C., CUCCU, R., ELEFANTE, S., ZINNO, I., MANUNTA, M., CASOLA, V., and CASU, F., 2015. An on-demand web tool for the unsupervised retrieval of earth's surface deformation from SAR data: The P-SBAS service within the ESA G-POD environment. *Remote Sensing*, **7**(11), 15630-15650. DOI: 10.3390/rs71115630
- DIAS, P., CATALAO, J., and MARQUES, F. O., 2018. Sentinel-1 InSAR data applied to surface deformation in Macaronesia (Canaries and Cape Verde). *Procedia computer science*, **138**, pp. 382-387. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.054.
- DOMÍNGUEZ-CERDEÑA, I., DEL FRESNO, C., and RIVERA, L., 2011. New insight on the increasing seismicity during Tenerife's 2004 volcanic reactivation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **206**(1-2), pp. 15-29. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.06.005
- DOMÍNGUEZ CERDEÑA, I. D., DEL FRESNO, C., CANTAVELLA, J. V., FELPETO, A., LOZANO, L., MEDINA, L. C., and LÓPEZ, C., 2018. Comment on "Geochemical evidences of seismo-volcanic unrests at the NW rift-zone of Tenerife, Canary Islands, inferred from diffuse CO<sub>2</sub> emission" by Hernández PA, Padilla G., Barrancos J., Melián G., Padrón E., Asensio-Ramos M., Rodríguez F., Pérez NM, Alonso M., and Calvo D. [Bull Volcanol (2017) 79: 30]. *Bulletin of Volcanology*, **80**(1), pp. 1-4. DOI: 10.1007/s00445-017-1182-0
- ESA. 2021a. "European COPERNICUS Program." 2021. Available: <https://www.copernicus.eu/es> [7/15, 2021].
- ESA. 2021b. "European Space Agency Grid Processing on Demand." 2021. Available: <https://gpod.eo.esa.int/> [7/15, 2021].
- FERNÁNDEZ, J., TIZZANI, P., MANZO, M., BORGIA, A., GONZÁLEZ, P. J., MARTÍ, J., and LANARI, R., 2009. Gravity-driven deformation of Tenerife measured by InSAR time series analysis. *Geophysical Research Letters*, **36**(4). DOI: 10.1029/2008GL036920
- FERNÁNDEZ, J., YU, T. T., RODRIGUEZ-VELASCO, G., GONZÁLEZ-MATESANZ, J., ROMERO, R., RODRIGUEZ, G., and BLANCO, M. J., 2003. New geodetic monitoring system in the volcanic island of Tenerife, Canary Islands, Spain. Combination of InSAR and GPS techniques. *Journal of volcanology and geothermal research*, **124**(3-4), pp. 241-253. DOI: 10.1016/S0377-0273(03)00073-8
- FERNÁNDEZ, J., ROMERO, R., CARRASCO, D., TIAMPO, K. F., RODRÍGUEZ-VELASCO, G., APARICIO, A., and GONZÁLEZ-MATESANZ, F. J., 2005. Detection of displacements on Tenerife Island, Canary Islands, using radar interferometry. *Geophysical Journal International*, **160**(1), pp. 33-45. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02487.x
- GALVE, J. P., PÉREZ-PEÑA, J. V., AZAÑÓN, J. M., CLOSSON, D., CALÓ, F., REYES-CARMONA, C., and BALLY, P., 2017. Evaluation of the SBAS InSAR service of the European space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP). *Remote Sensing*, **9**(12), 1291. DOI: 10.3390/rs9121291
- GELDMACHER, J., HOERNLE, K., VAN DEN BOGAARD, P., ZANKL, G., and GARBE-SCHÖNBERG, D., 2001. Earlier history of the  $\geq 70$ -Ma-old Canary hotspot based on the temporal and geochemical evolution of the Selvagen Archipelago and neighboring seamounts in the eastern North Atlantic. *Journal of volcanology and geothermal research*, **111**(1-4), pp. 55-87. DOI: 10.1016/S0377-0273(01)00220-7
- LIN, S. Y., LIN, C. W., and VAN GASSEL, S., 2021. Processing Framework for Landslide Detection Based on Synthetic Aperture Radar (SAR) Intensity-Image Analysis. *Remote Sensing*, **13**(4), 644. DOI: 10.3390/rs13040644.
- LU, P., CASAGLI, N., CATANI, F., and TOFANI, V., 2012. Persistent Scatterers Interferometry Hotspot and Cluster Analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides. *International journal of remote sensing*, **33**(2), pp. 466-489. DOI: 10.1080/01431161.2010.536185
- MANTOVANI, E., VITI, M., BABBUCCI, D., and ALBARELLO, D., 2007. Nubia-Eurasia kinematics: an alternative interpretation from Mediterranean and North Atlantic evidence. *Annals of Geophysics*, **50**(3). DOI: 10.4401/ag-3073
- MÉRIAUX, C. A., DUARTE, J. C., DUARTE, S. S., SCHELLART, W. P., CHEN, Z., ROSAS, F., and TERRINHA, P., 2015. Capture of the Canary mantle plume material by the Gibraltar arc mantle wedge during slab rollback. *Geophysical Journal International*, **201**(3), pp. 1717-1721. DOI: 10.1093/gji/ggv120

- MEZCUA, J., BUFORN, E., UDÍAS, A., and RUEDA, J., 1992. Seismotectonics of the Canary islands. *Tectonophysics*, **208**(4), pp. 447-452. DOI: 10.1016/0040-1951(92)90440-H
- ORD, J. K., and GETIS, A., 1995. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, **27**(4), pp. 286-306. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x
- PÁEZ, R., TORRECILLAS, C., BARBERO, I., and BERROCOSO, M., 2017. Regional positioning services as economic and construction activity indicators: the case study of Andalusian Positioning Network (Southern Spain). *Geocarto international*, **32**(1), pp. 44-58. DOI: 10.1080/10106049.2015.1120358
- ROSI, A., AGOSTINI, A., TOFANI, V., and CASAGLI, N., 2014. A procedure to map subsidence at the regional scale using the persistent scatterer interferometry (PSI) technique. *Remote Sensing*, **6**(11), pp. 10510-10522. DOI: 10.3390/rs61110510
- SAMSONOV, S., TIAMPO, K., GONZÁLEZ, P. J., PRIETO, J., CAMACHO, A. G., and FERNÁNDEZ, J., 2008. Surface deformation studies of Tenerife Island, Spain from joint GPS-DInSAR observations. In *2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/USEREST.2008.4740337
- SOLARI, L., BARRA, A., HERRERA, G., BIANCHINI, S., MONSERRAT, O., BÉJAR-PIZARRO, M., and MORETTI, S., 2018. Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **9**(1), pp. 152-174. DOI: 10.1080/19475705.2017.1413013
- SONGCHITRUKSA, P., and ZENG, X., 2010. Getis-Ord spatial statistics to identify hot spots by using incident management data. *Transportation research record*, **2165**(1), pp. 42-51. DOI: 10.3141/2165-05
- TESHEBAEVA, K., ECHTLER, H., BOOKHAGEN, B., and STRECKER, M., 2019. Deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD) and slow-moving landslides in the southern Tien Shan Mountains: new insights from InSAR, tectonic and geomorphic analysis. *Earth surface processes and landforms*, **44**(12), pp. 2333-2348. DOI: 10.1002/esp.4648
- TROIANI, F., PIACENTINI, D., DELLA SETA, M., and GALVE, J. P., 2017. Stream Length-gradient Hotspot and Cluster Analysis (SL-HCA) to fine-tune the detection and interpretation of knickzones on longitudinal profiles. *Catena*, **156**, pp. 30-41. DOI: 10.1016/j.catena.2017.03.015

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE TESIS DOCTORAL: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA DINSAR A LA PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS GEOLOGICOS NATURALES E INDUCIDOS EN CIUDADES E INFRAESTRUCTURAS PRIORITARIAS DE CENTROAMÉRICA

**A PHD THESIS WORKING PLAN: APPLICATION OF DINSAR TECHNOLOGY TO PREVENT NATURAL AND INDUCED GEOLOGICAL RISKS IN CITIES AND PRIORITY INFRASTRUCTURES IN CENTRAL AMERICA**

Carlos García-Lanchares<sup>a,b,\*</sup>, Miguel Marchamalo<sup>b</sup>, Candela Sancho<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Detektia Earth Surface Monitoring SL. C/ Prof. Aranguren, 3, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. [cglanchares@detektia.com](mailto:cglanchares@detektia.com); [csancho@detektia.com](mailto:csancho@detektia.com)

<sup>b</sup> Laboratorio de Topografía y Geomática, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Prof. Aranguren, 3, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. [miguel.marchamalo@upm.es](mailto:miguel.marchamalo@upm.es)

### Abstract:

This communication presents the formulation and first steps of an Industrial PhD project, developed in the frame of the “Kuk ahpán” project (Spanish National R&D Plan, 2019-2022) that aims to understand, monitor and model tectonic processes at the lithospheric scale in Central America. For this purpose, an international team from six countries (Nicaragua, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Norway and Spain) works integrating research in diverse geophysical techniques and engineering, with the aim of updating Seismic Risk Maps for the Region, a critical input for Safety and Construction Codes. The proposed PhD project is framed on the research and development of technologies to prevent natural and induced geological risks that affect cities and infrastructures in highly vulnerable countries, using the DInSAR (Differential Interferometry with Synthetic Aperture Radar) technology optimized by the startup Detektia Earth Surface Monitoring in collaboration with Universidad Politécnica de Madrid. Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry is a technique based on the processing and analysis of long series of Synthetic Aperture Radar images. This technology provides records (since 1992) and up-to-date movements on any surface anywhere in the world without the need for ground instrumentation, with accuracies about 1 mm/year (velocity). In this context satellite radar provides valuable information on very large areas that complement the field work and in-situ instrumentation. The methodological approach starts by integrating DInSAR data with geophysical and geodesical data such as bathymetry, geomagnetism, gravimetry, seismic profiles, GNSS series... to fully map the Swan fault over Honduras and Guatemala. We use this technology to address the seismic risk over the fault and nearby areas. Then, on a second step, we will apply this seismic risk assessment (including natural and anthropogenic hazards) in prioritized cities and critical infrastructures in Central America.

**Key words:** DInSAR, remote sensing, geological risk, cities sustainable development, Central America

### Resumen:

Este documento presenta la formulación y primeros pasos de un proyecto de Doctorado Industrial, desarrollado en el marco del proyecto Kuk ahpán que tiene como objetivo comprender, monitorear y modelar procesos tectónicos a escala litosférica en Centroamérica. Para ello, un equipo internacional de seis países (Nicaragua, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Noruega y España) trabaja integrando la investigación en diversas técnicas e ingenierías Geofísicas, con el objetivo de actualizar los Mapas de Riesgo Sísmico de la Región, un insumo crítico para los códigos de seguridad y construcción. El proyecto de doctorado propuesto se enmarca en la investigación y desarrollo de tecnologías para prevenir los riesgos geológicos naturales e inducidos que afectan a ciudades e infraestructuras en países altamente vulnerables, utilizando la tecnología DInSAR (Differential Interferometry with Synthetic Aperture Radar) optimizada por la *startup* Detektia Earth Surface Monitoring en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid. La interferometría diferencial de radar de apertura sintética es una técnica basada en el procesamiento y análisis de series largas de imágenes de radar de apertura sintética. Esta tecnología proporciona registros (desde 1992) y movimientos actualizados en cualquier superficie en cualquier parte del mundo sin necesidad de instrumentación terrestre, con precisiones de alrededor de 1 mm / año (velocidad). En este contexto, el radar satelital proporciona información valiosa sobre áreas muy grandes que complementan el trabajo de campo y la instrumentación *in situ*. Primero, comenzamos integrando datos DInSAR con diversos datos geofísicos como batimetría, geomagnetismo, gravimetría, perfiles sísmicos... para mapear completamente la falla Swan sobre Honduras y Guatemala. Usamos esta tecnología para abordar el riesgo sísmico sobre la falla y áreas cercanas. En un segundo paso, aplicaremos esta evaluación de riesgo sísmico (incluyendo amenazas naturales y antropogénicas) en ciudades e infraestructuras críticas en Centroamérica.

**Palabras clave:** DInSAR, teledetección, riesgo geológico, ciudades, desarrollo sostenible, Centroamérica

\* Corresponding Author: Carlos García-Lanchares, [cglanchares@detektia.com](mailto:cglanchares@detektia.com)



## 1. Introducción

Los trabajos derivados de la tesis doctoral descrita en esta publicación están contextualizados dentro del proyecto Kuk ahpán y de la actividad de I+D+i de la empresa Detektia. Esto es consecuencia del carácter industrial que tiene la beca doctoral otorgada por la Comunidad de Madrid en la convocatoria general del año 2020. El principal objeto de dicha convocatoria es promover el desarrollo de proyectos de Doctorado Industrial en cualquier ámbito de conocimiento y en cualquier sector empresarial.

Esta propuesta se enmarca en la investigación y desarrollo de tecnologías para combatir los riesgos geológicos naturales e inducidos que afectan a las ciudades y las infraestructuras en países de alta vulnerabilidad, mediante la tecnología DInSAR (Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética) optimizada y adaptada por la empresa tecnológica Detektia en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid. Esta técnica permite cuantificar la deformación de la superficie del terreno e infraestructuras a partir de imágenes adquiridas desde satélite por sensores activos en la región del espectro de las microondas (García-Sánchez *et al.* 2018). Detektia es una compañía de Observación de la Tierra 2.0, que utiliza datos adquiridos por satélites para detectar movimientos milimétricos en cualquier superficie e infraestructura del planeta. Asimismo, Detektia desarrolla algoritmos avanzados de *Deep Learning* para detectar anomalías durante toda la vida útil (desde la fase de diseño hasta la de explotación) de infraestructuras como presas, puentes, túneles, o monitorización de acuíferos y otros reservorios como petróleo y gas. Se trata de un desarrollo puntero en Europa que proporciona soluciones al problema del mantenimiento de ciudades e infraestructuras con un gran ahorro ambiental y económico.

El principal producto de Detektia, EyeRADAR, proporciona una herramienta informática de análisis en tiempo cuasireal de desplazamientos de ciudades e infraestructuras. Esta tecnología ha sido reconocida por la Incubadora de la Agencia Espacial Europea en la Comunidad de Madrid (ESA\_BIC), Top10 de la competición de startups de la ESA en 2020, Top20 en el reto del Global Infrastructure Hub 2021, finalista del reto BuildUP de Ferrovial (diciembre 2019) y ganadora del reto de anticipación del comportamiento del terreno de Sacyr en 2020, además de participar en los aceleradores europeos EIT Cliamte-KIC, PARSEC, STARTUP3 y IoT Trbe Space Endeavour.

Decenas de miles de infraestructuras en todo el mundo (e incluso ciudades enteras) no tienen ningún sistema de monitorización continua implementado. Detektia proporciona a diferentes sectores herramientas de monitorización de infraestructuras a un coste impensable hasta el momento. EyeRADAR permitirá aumentar la seguridad a través de la mejora de los sistemas de alerta temprana, el mantenimiento preventivo de las infraestructuras y la reducción de los costes en el control de estas sobre el terreno. EyeRADAR se puede personalizar para la monitorización de distintos objetivos estratégicos: acuíferos (Ezquerro *et al.* 2014; Béjar *et al.* 2017), túneles urbanos (Sillerico *et al.* 2010, 2015; García-Sánchez 2019), presas (Ruiz-Armenteros *et al.*

2018). Recientemente, Detektia ha desarrollado el producto City-EYE para el monitoreo de ciudades a distintas escalas (control general y control detallado de puntos críticos) en colaboración con la spinoff Insar.sk que incorpora los algoritmos del producto REMOTIO (Bakon *et al.* 2017; Sancho *et al.* 2020).

Actualmente, el control de infraestructuras se realiza con métodos geotécnicos y geodésicos tradicionales (regletas, inclinómetros, acelerómetros, redes GNSS, etc.). Esta propuesta desarrollará en Centroamérica sistemas de monitorización de altísimo detalle a un coste económico muy competitivo para aquellas instalaciones e infraestructuras que no poseen un sistema de control. Asimismo, permitirá mejorar la monitorización en aquellas en las que ya hay instalados métodos tradicionales.

Las ventajas diferenciales que ofrecen los sistemas EyeRADAR con respecto a los métodos tradicionales son:

- Precisión milimétrica, actual e histórica: series temporales de los movimientos del terreno e infraestructuras con precisión milimétrica. Esta tecnología permite analizar movimientos actuales y compararlos con deformaciones pasadas o históricas. En muchas regiones geográficas hay datos desde 1992 que permiten crear y analizar series temporales de los movimientos a largo plazo de regiones concretas y de sus áreas próximas, aportando información crítica que hace posible preveer el comportamiento antes del inicio de la ejecución de obra.
- Actualizaciones constantes: Las mediciones de los movimientos se actualizan tan a menudo como los satélites adquieren una imagen (desde pocos días a semanas según las necesidades).
- Sin necesidad de instrumentación en tierra: La tecnología emergente DInSAR ha demostrado su capacidad para detectar y medir pequeñas variaciones milimétricas en cualquier superficie sin necesidad de instrumentación en tierra.
- Alta densidad de puntos de control: Dependiendo de la superficie de estudio y de las imágenes de satélite disponibles, obtenemos un aumento exponencial de la densidad de puntos de seguimiento comparado con las campañas de instrumentación tradicional.

La presente propuesta responde al reto de desarrollar herramientas que permitan prevenir y reducir los riesgos que amenazan el desarrollo en países de Centroamérica y Caribe. Asimismo, la tecnología desarrollada será promocionada a nivel internacional para su escalado y aplicación masiva en entornos con problemática similar.

## 2. Objetivos

Los objetivos planteados para la presente tesis son los siguientes:

- 1) Validar el empleo de la tecnología DInSAR para la prevención de riesgos geológicos en infraestructuras prioritarias de Centroamérica.

La tecnología DInSAR implica varios avances. No obstante, para garantizar que la simbiosis entre la sismología y dicha tecnología es válida, este

ejercicio plantea el análisis en casos a escala regional, considerando datos topográficos y geodésicos.

Dicho análisis consistirá en estimar la incertidumbre de las series de velocidades DInSAR y de la velocidad calculada por esta técnica.

- 2) Integrar la técnica DInSAR en un sistema de monitoreo regional que permita reducir la incertidumbre en la prevención de riesgos ligados a la tectónica de placas.

Este objetivo lleva implícito un proceso de replicación a una escala menor que consiste en pasar de la información regional generada y validada en el objetivo anterior. Basada en la priorización de las zonas de riesgo y de las intensidades máximas que se predigan. Se puede priorizar la vigilancia en las infraestructuras más vulnerables, esto se traduce en la mejora de la prevención de riesgos geológicos naturales.

- 3) Diseñar un sistema de control integrado con DInSAR para una infraestructura urbana o interurbana crítica en Centro América.

El último objetivo trataría la integración del sistema de monitorio con la plataforma EyeRadar y su promoción en los países de la zona de estudio. En esta fase, se espera integrar los resultados de otra línea de investigación, sobre la puesta a punto de sistemas de alerta temprana empleando inteligencia artificial. El sistema integrado será evaluado en términos técnicos y económicos, incluyendo el análisis de la sostenibilidad del sistema de monitorización.

### 3. Área de estudio

El área de estudio seleccionada es la Región Centroamericana. Es un área que, por su tectónica y la cantidad de estructuras sísmicas (ver Figura 1) además del gran vacío de datos que existe, la convierten en una zona de especial interés para el estudio. Una región caracterizada por la interacción de las placas de Cocos, Caribe, Nazca, la microplaca de Panamá y las placas de Norte América y Sud América (Benito *et al.* 2018).



Figura 1: Área de estudio del Proyecto. Fuente: Esri (2019).

En el ámbito de las investigaciones de las deformaciones de la corteza con técnicas GNSS, existe una carencia de datos en la zona de Centroamérica y en especial en Honduras. La bibliografía existente indica que hay

velocidades de unos 15 mm/año de Centro América moviéndose en la dirección oeste noroeste con relación a la Placa Caribe. Este dato resulta del estudio realizado con datos geodésicos, estructurales y paleomagnéticos, combinados con datos GPS de Guatemala, El Salvador y sur de Honduras (Benito and Torres 2010) de los antearcos de Nicaragua y El Salvador. Aparte de este trabajo, no se han encontrado otros estudios en la zona del Golfo de Fonseca ni en la zona del bloque de Chortís en el Atlántico. El proyecto Kuk ahpán permitirá cubrir este vacío de conocimiento complementando y validando los resultados de las mediciones publicadas en 2011 (Benito *et al.* 2018).

## 4. Metodología

La metodología descrita en este documento se divide en dos fases: de modelización sísmica y DInSAR. (Ver Figura 2).

### 4.1. Fase modelización sísmica

El primero de los pasos corresponde a la actividad de investigación sísmológica que parte a su vez de las campañas de campo (Subproyecto 1 del proyecto Kuk Ahpán); dicha fase consiste en la adquisición de datos mediante diferentes campañas batimetría, campañas GPS, altimetría, etc.. El subproyecto 2 dará inicio a la producción de los mapas de riesgo de las zonas de estudio: las grandes ciudades de las ciudades centro americanas.

La modelización de los escenarios sísmicos toma como base el empleo combinado de herramientas SIG, Hojas de cálculo e interpretación experta de los resultados. (Ver Figura 2A).

Modelos de aceleración. Los modelos empleados en este apartado se obtienen de una revisión bibliográfica (Abrahamson *et al.* 2013; Campbell and Bozorgnia 2014; Boore *et al.* 2014). Los investigadores del proyecto especializados en cada área de estudio aportan su conocimiento a lo largo del proyecto. Por lo tanto, los modelos empleados pueden actualizarse con el fin de conseguir resultados más veraces. Los modelos de aceleración permiten, conociendo la geometría de las estructuras sísmicas (fallas) y procesando los datos espaciales en un entorno SIG, obtener una capa raster que muestre la PGA o *Peak groun Acceleration* para un sismo de Magnitud máxima (según casos empíricos). La capa resultando muestra la aceleración sobre roca.

A continuación, basando la decisión en criterio experto, se ejecuta una ponderación sobre los distintos modelos para combinarlos y obtener un único resultado por falla, este resultado también se apoyará en análisis Radar que consistirá en interferometrías realizadas en distintos episodios sísmicos.

Mapa geológico de la zona. Empleando la información de NEHRP (*National earthquake Hazards reuction program*) y la cartografía de tipos de suelo de cada subárea de estudio. Se combinan las PGA con los factores de amplificación para conocer la aceleración real sobre el suelo. (FEMA 2015; Schmidt *et al.* 2005).

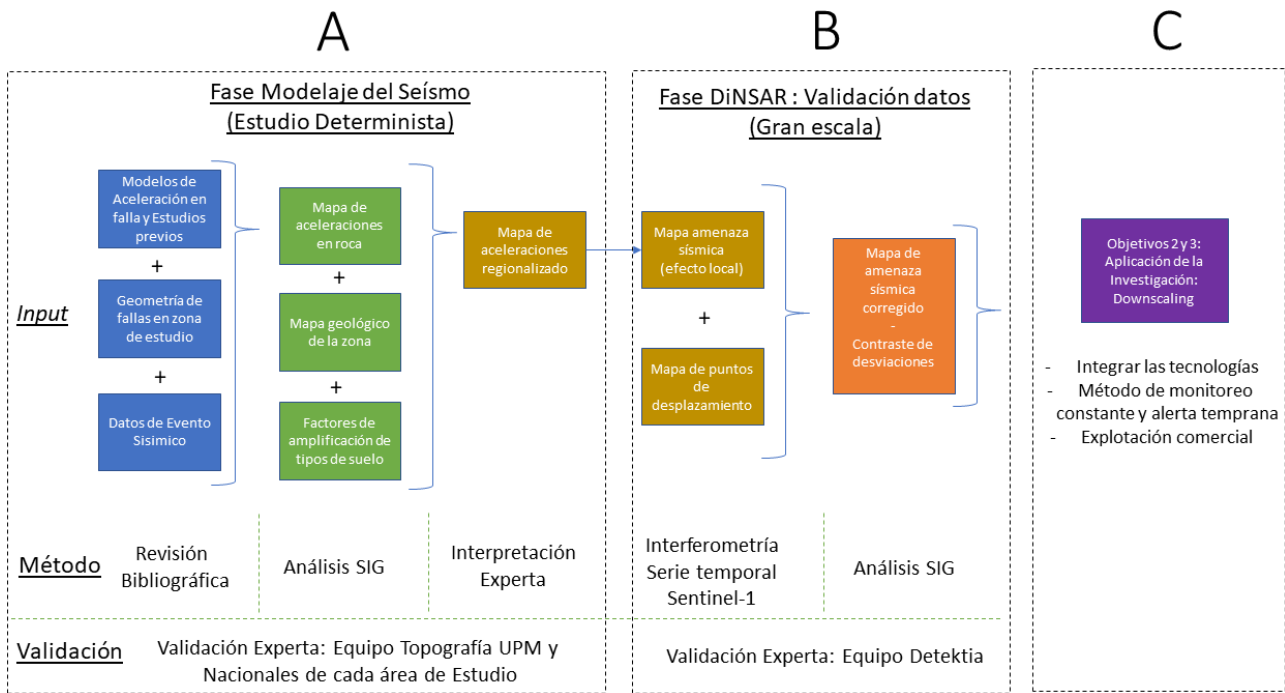


Figura 2: Esquema de la metodología.

#### 4.2. Fase DiN SAR

En esta segunda fase se emplea la tecnología DiN SAR para validar los datos resultantes de la fase anterior (ver Figura 2B).

Se proponen las siguientes actividades:

- 1) Integración de los datos de auscultación disponibles, especialmente campañas GPS/GNSS, en una base de datos del proyecto.
- 2) Armonización y depurado de las series de datos GPS/GNSS.
- 3) Obtención del catálogo de imágenes SAR correspondiente a las series de datos disponibles empleando sensores actuales (i.e. embarcados en Sentinel 1 A/B-ver Tabla 1) o históricos (ERS 1 / 2, ENVISAT).
- 4) Procesado DiN SAR de las imágenes SAR empleando la tecnología desarrollada por Detektia.
- 5) Validación de velocidades de deformación observadas por técnica DiN SAR con la base de datos de auscultación.
- 6) Estimación de la incertidumbre de las series de velocidades.

Las series temporales de la cartografía utilizada para detectar los movimientos, de naturaleza radar y óptica, se procesarán utilizando la tecnología de Detektia (ordenadores y código). La misma tendrá un proceso de validación con datos de campo cuya información se obtendrá de las redes GNSS/GPS disponibles y las estaciones nuevas que instalará el proyecto Kuk ahpán (red de 10 estaciones GPS en el borde hondureño de la falla) que monitorizan de forma continua las posiciones durante el tiempo de ejercicio del proyecto.

Tabla 1: Template Imágenes de Sentinel-1A disponibles desde Diciembre 2014 hasta 13/05/2021. Fuente: ESA (2021).

País	Geometría ascendente	Geometría descendente
Costa Rica	6.066	6.808
Guatemala	15.066	15.128
Nicaragua	10.314	10.221
El Salvador	5.819	5.927
Honduras	8.835	9.076
Panamá	9.437	8.399

#### 4.3. Metodología de los años sucesivos

Las actividades propuestas variarán dependiendo de los resultados y necesidades que se observen en el primer año de trabajo.

En un contexto ideal, se procedería con la integración de los datos observados en la tecnología EyeRADAR de Detektia. Algunas tareas proyectadas son:

- 1) Validar EyeRADAR con datos disponibles.
- 2) Integrar EyeRADAR en el sistema de monitorización del proyecto Kuk ahpán.
- 3) Estimar la mejora de la prevención de riesgos geológicos naturales e inducidos mediante la incorporación de la técnica DiN SAR a los sistemas propuestos por el proyecto Kuk ahpán.
- 4) Integrar el análisis por Inteligencia Artificial (IA) de los datos proporcionados por EyeRADAR para identificar patrones de riesgo en las series de desplazamiento.
- 5) Seleccionar una ciudad prioritaria en coordinación con las instituciones participantes en el proyecto



- 6) Colaborar en el diseño de la base de datos de monitorización
- 7) Desarrollar el producto City-EYE para el caso de estudio elegido
- 8) Participar en la difusión de los resultados del proyecto Kuk ahpán.
- 9) Colaborar en la acción comercial de Detektia en Centroamérica.

El riesgo sísmico se analizará posteriormente en zonas de riesgo ejemplo, teniendo como objetivo la exposición sistemática de las pérdidas económicas, de infraestructura y el número de vidas afectadas.

## 5. Resultados

Los resultados esperados se están predispuestos en tres bloques.

### 5.1. Validación del mapa de amenaza sísmica

El primer producto que se conseguiría empleando el método descrito, sería un mapa de peligrosidad contrastado. Los modelos sísmicos empleados proporcionan un abanico de resultados, que si pudieran apoyarse en los datos InSAR para hacer confirmar su validez propiciaría una estrategia civil certera. En la Figura 3 se pueden ver los desplazamientos en la dirección de mira del satélite (geometría ascendente) de San José para el periodo 2015 y 2021. El resultado final será la relación entre este mapa de velocidades y el mapa de aceleraciones.

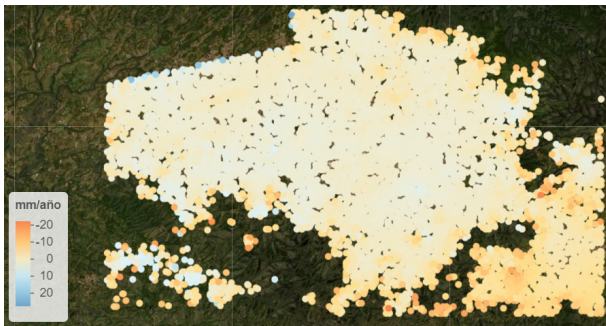


Figura 3: Ejemplo de desplazamiento en San José (Costa Rica) Julio, 2015-Enero, 2021. Serie temporal de 96 imágenes (60.787 puntos). Fuente: Detektia (2021) and STYRON (2019)

### 5.2. Downscaling: análisis posteriores

Las dos preguntas que queremos responder antes de hacer el ya seleccionado downscaling son: ¿Dónde puede haber un detonante? y ¿Qué intensidad tendrá éste?; es decir, que zonas son susceptibles de sufrir un movimiento sísmico de una intensidad significativa. Una vez conocidas dichas áreas sabremos dónde hay que observar a una escala menor, dónde están los lugares de interés.

Los casos de aplicación directa, una vez conocidas las infraestructuras pueden ser de diversa naturaleza: carreteras que puedan ser afectadas por derrumbamientos, grandes acuíferos con variaciones estacionales que puedan comprometer la estabilidad de estructuras superficiales, obras subterráneas o edificios.

En el caso de la Figura 4 se puede observar una carretera en Colombia en una zona montañosa en la que se detectan movimientos de hasta 13 milímetros/año. La monitorización en tiempo real puede ser posible combinando los resultados obtenidos por DInSAR con Inteligencia artificial, considerando variables como la precipitación, la temperatura, topografía, etc..

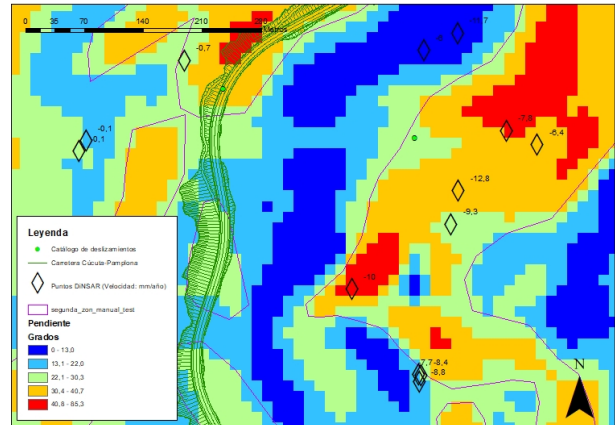


Figura 4: Análisis multivariable preliminar de deslizamientos en entorno de infraestructura vulnerable.

### 5.3. Ventajas de la aplicación de la técnica DInSAR a la prevención de los riesgos naturales inducidos

Las ventajas que se prevén al aplicar la tecnología DInSAR en el ámbito de estudio descrito son las siguientes:

- 1) Social. Existe un impacto de la tecnología también desde la perspectiva social. El riesgo de desastre debido a causas naturales o tecnológicas puede minimizarse gracias al desarrollo de soluciones tecnológicas de vigilancia. En todo caso, lo que conseguimos con el estudio de cambios a nivel milimétrico es reducir la vulnerabilidad como determinante del colapso de infraestructuras.
- 2) Económica. Como se ha descrito, la monitorización de infraestructuras empleando tecnología radar satelital supone ahorros sustanciales, tanto gastos de personal que tienen que desplazarse hacia las infraestructuras para realizar las mediciones, como los ahorros en costes inherentes del mantenimiento preventivo. Asimismo, es importante considerar el ahorro derivado de evitar potenciales colapsos o fallos irreversibles en infraestructuras.

Inmediato: El ahorro en los proyectos civiles se contempla en dos aspectos: campañas de campo en la obtención de datos y acceso a los lugares de la obra en situaciones de difícil acceso.

Plazo no inmediato: En el caso de que ocurra un evento sísmico, y dependiendo de la intensidad de este, las pérdidas económicas son variables. Estas son las derivadas de volver a habilitar la infraestructura afectada. El ahorro derivado de la monitorización a medio/largo plazo se produciría teniendo en cuenta los datos de peligrosidad sísmica en la planificación urbanística, tanto en la selección de los emplazamientos como en el tipo de construcciones.



- 3) Medioambiental. Un control preventivo y eficaz de infraestructuras puede suponer una reducción sustancial de emisiones de gases de efecto invernadero, al evitar colapsos y daños irreversibles disminuyamos la necesidad de obra nueva y en consecuencia se reducen las emisiones de GEI.

La presente propuesta responde al reto de desarrollar herramientas que permitan prevenir y reducir los riesgos que amenazan el desarrollo en países de Centroamérica.

Asimismo, la tecnología desarrollada será promocionada a nivel internacional para su escalado y aplicación masiva en entornos con problemática similar.

## 6. Conclusiones

La interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) es una técnica de teledetección que garantiza la calidad de su empleo en la ingeniería civil (García-Sánchez 2019; Cigna and Tapete 2021).

## Agradecimientos

Esta línea de investigación ha sido desarrollada con el apoyo de los equipos de Detektia Earth Surface Monitoring SL, la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid y el equipo de trabajo de Kuk ahpán.

## References

- ABRAHAMSON, N.A., SILVA, W.J., and KAMAI, R., 2013. Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equation Based on the NGA-West2 Data Set, Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley, PEER 2013/04
- BAKON, M., I. OLIVEIRA, D. PERISSIN, J. J. SOUSA, and PAPCO, J., 2017. A Data Mining Approach for Multivariate Outlier Detection in Postprocessing of Multitemporal InSAR Results. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **10**(6), pp. 2791-2798. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2686646
- BEJAR-PIZARRO, M., EZQUERRO, P., HERRERA, G., TOMÁS, R., GUARDIOLA, ALBERT, C., RUIZ HERNÁNDEZ, J.M., FERNÁNDEZ-MERODO, J.A., MARCHAMALO, M., and MARTINEZ, R., 2017. Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain. *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.011
- BENITO, B., and TORRES, Y., 2010. *Amenaza sísmica en América central*. Entimema, Madrid.
- BENITO, B., CORDOBA, and BARBA, D., 2018. Kuk ahpán: Estudio de regional integrado de la estructura y evolución 4D de la litofera en América Central. Implicaciones en el calculo de la amenaza y riesgo sísmico (Kuk Ahpán). Memoria Científico Técnica de proyectos coordinados. Agencia Estatal de Investigaciobn- Convocatoria 2018 Proyectos de I+D de Generacion de Conocimiento y Proyectos de I+D+i Restos Investigación. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
- BOORE, D.M., STEWART, J.P., EEMEL, SEYHAN, M., and ATKINSON, G.M., 2014. NGA-West 2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes,
- CAMPBELL, K.W., and BOZORGNIA, Y., 2014. Campbell-bozorgnia NGA-West2 horizontal ground motion model for active tectonic domains, COrelog, Inc., University of California, Berkeley
- CIGNA, F., TAPETE, D., 2021. Satellite InSAR Survey of structurally controlled land subsidence due to groundwater exploitation in te Aguascalientes Valley, Mexico. *ELSEVIER, Remote Sensing of Environment*, **254**, 1 March 2021, 112254
- DETEKTIA. 2021. Tecnología InSAR. Detectamos desde el espacio desplazamientos milimétricos de la superficie terrestre. Available: <https://detektia.com/> [7/23, 2021].
- ESA. 2021. European Space Agency - Spain. Available: [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain) [7/23, 2021].
- ESRI. 2019. Mapa de estilo National Geographic. Última actualización: 30 Sept. 2020
- EZQUERRO, P., HERRERA, G., MARCHAMALO, M., TOMÁS, R., BEJARPIZARRO, M., MARTÍNEZ, and MARÍN, R., 2014. A quasielastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology*, **519**(2014), pp. 1192–1204.
- FEMA. 2015. NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary FEMA P-1050-1/2015 Edition, National Earthquake Hazard Reduction Program
- GARCIA-SANCHEZ, A.J., BAKON, M., MARTINEZ, R., and MARCHAMALO, M., 2018. Evolution of urban monitoring with radar interferometry in Madrid City: performance of ERS-1/ERS-2, ENVISAT, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1 products. *International Journal of Remote Sensing*, **39**(9), pp. 2969-2990.
- GARCIA-SANCHEZ, A.J., 2019. *Application of differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DiNSAR) to the monitoring of ground and structure movements*. Tesis Doctoral, ETSI Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de topografía y Geomática. Doctorado en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales, Madrid
- RUIZ-ARMENTEROS, A.M., LAZECKY, I., HLAVÁČIVÁ, B., DELGADO, J.M., SOUSA LAMAS-FERNANDEZ, L., MARCHAMALO, M., CAROQUENCA, M., PAPCO, J., and PERISSIN D., 2018. Deformation monitoring of dam

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE TESIS DOCTORAL: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA DINSAR A LA PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS GEOLOGICOS NATURALES E INDUCIDOS EN CIUDADES E INFRAESTRUCTURAS PRIORITARIAS DE CENTROAMÉRICA

infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). *Procedia Computer Science*, **138**(2018), pp. 346–353

SANCHO, C., BAKON, M., GARCIA, A.J., CZIKHARDT, R., FERNANDEZLANDA, A., PAPCO, J., MARTINEZ R. BARLAK, J., MARCHAMALO, M., ROVNAK, M., and ADAMISIN, P., 2020. City-EYE a platform for the surveillance and management of built-up area and infrastructures. *Procedia Computer Science*, (aceptado, 2020) ISSN 1877-0509

SILLERICO, E., MARCHAMALO, M., REJAS, J.G., and MARTINEZ, R., 2010. La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, **62**(519), pp. 47-53. ISSN 0020-0883

SILLERICO, E., P. EZQUERRO, M. MARCHAMALO, M., HERRERA, G., DURO, J., and MARTÍNEZ, R., 2015. Monitoring ground subsidence in urban environments: M-30 tunnels under Madrid City (Spain). *Ingeniería e Investigación*, **35**(2) (Agosto 2015). ISSN: 0120-5609.

SCHMIDT, V., MOYA, A., CLIMENT, ROJAS, A., WILFREDO, R., and BOSCHINI, I., 2005. *Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica*. Editorial de la universidad de Costa Rica, ISBN: 9977-67-963-0

STYRON, R., 2019. GEMScienceTools/gem-global-active-faults: First release of 2019 (Version 2019.0). Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics (COMET). Global active faults data. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3376300>. Modification: lines are simplified). Volcanoes database, Tiles © Esri — Source: Esri, i-cubed, USDA, USGS, AEX, GeoEye, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, UPR-EGP, and the GIS User Community

## DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO MEDIANTE TÉCNICAS D-INSAR EN LA ISLA DECEPCIÓN (ANTÁRTIDA)

### DETECTION AND ANALYSIS OF GROUND MOTION USING DINSAR TECHNIQUES ON DECEPTION ISLAND (ANTARCTICA)

Rogelio de la Vega-Panizo<sup>a,\*</sup>, Andrea Sofía Garmendia<sup>a</sup>, Carlos Paredes<sup>a</sup>, Miguel Ángel Ropero<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Departamento Ingeniería Geológica y Minera, E.T.S.I. de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España. [rogelio.delavega@upm.es](mailto:rogelio.delavega@upm.es); [andrea2diagon@gmail.com](mailto:andrea2diagon@gmail.com); [carlos.paredes@upm.es](mailto:carlos.paredes@upm.es)

<sup>b</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», Laboratorio de Ingenieros del Ejército «General Marvá», C/ Princesa 36-38, 28008 Madrid, España. [roperoama@inta.es](mailto:roperoama@inta.es)

<sup>c</sup> Escuela Politécnica Superior del Ejército, Ministerio de Defensa, C/ Joaquín Costa 6, 28002 Madrid, España. [mropaza@et.mde.es](mailto:mropaza@et.mde.es)

#### Abstract:

Deception Island is an active volcano on which two Antarctic bases are located, the Spanish Antarctic Base Gabriel de Castilla and the Deception Antarctic Base, with scientific personnel working there during the summer (December-March). To ensure the safety of these personnel, it is necessary to monitor volcanic and seismic activity continuously with different technologies. Among the technologies that can be used are Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) techniques for ground motion detection. Ground motions can have different origins, including volcanic and seismic movements. In this research we are going to analyse the movements that have occurred throughout 2018, 2019 and 2020, detected using DInSAR techniques and we will try to discriminate their origin. The detection using DInSAR techniques has been carried out with images acquired by the Sentinel 1A and Sentinel 1B satellites during the months of December to March 2018, 2019 and 2020. DInSAR techniques with image pairs have been used. Of all the possible combinations of image pairs, those with the greatest a priori possibilities were selected. Once the image pairs were selected, they were processed using the SNAP (Sentinel Application Platform) and SNAPHU (Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) applications. Once the deformation maps had been obtained, the movements were analysed together with other data on the island such as topographic, geological, geomorphological, slope and orientation maps to find an explanation for each of the movements detected and to classify them according to their type of origin.

**Key words:** Deception Island, DInSAR, landslide, gelification

#### Resumen:

La isla Decepción es un volcán activo en el cual se localizan dos bases antárticas, la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (BAEGC) y la Base Antártica Argentina (BAA), con personal científico que desarrolla su labor durante el verano (diciembre-marzo). Para garantizar la seguridad de dicho personal es necesario monitorizar la actividad volcánica y sísmica de manera continua con distintas tecnologías. Entre las tecnologías que se pueden utilizar se encuentran las técnicas de Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) para la detección de movimientos del terreno. Los movimientos en el terreno pueden tener distintos orígenes entre los cuales se encuentran los volcánicos y sísmicos. En esta investigación se van a analizar los movimientos que se han producido a lo largo de los años 2018, 2019 y 2020, detectados mediante técnicas DInSAR y se intentará discriminar su origen. La detección mediante técnicas DInSAR se ha realizado con imágenes adquiridas por los satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B durante los meses de diciembre a marzo de los años 2018, 2019 y 2020. Se han utilizado técnicas DInSAR básicas con pares de imágenes. De todas las posibles combinaciones de pares de imágenes se han seleccionado las que tenían mayores posibilidades a priori. Una vez seleccionadas las parejas de imágenes se han procesado utilizando como herramienta las aplicaciones SNAP (Sentinel Application Platform) y SNAPHU (Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping). Una vez obtenidos los mapas de deformaciones se han analizado los movimientos junto con otros datos de la isla como los mapas topográficos, geológicos, geomorfológicos, de pendientes y orientaciones con el propósito de encontrar explicación a cada uno de los movimientos detectados y poder clasificarlos por su tipo de origen.

**Palabras clave:** Isla Decepción, interferometría diferencial SAR, deslizamientos, geliflujión

### 1. Introducción

En el año 1988 el Ejército de Tierra de España inaugura en la isla Decepción (archipiélago de las islas Shetland del Sur) (Fig. 1) un refugio temporal que denominó

Gabriel de Castilla que en 1998 pasó a denominarse Base Antártica Española Gabriel de Castilla (BAEGC). Partiendo de ese refugio inicial en la BAEGC se han ido añadiendo módulos e instalaciones.

\* Corresponding Author: Rogelio de la Vega-Panizo, [rogelio.delavega@upm.es](mailto:rogelio.delavega@upm.es)

El seguimiento de la actividad científica de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (BAEGC) en los últimos años ha permitido observar la persistencia de ciertos procesos geológicos activos que se constatan sobre el diario de campaña y que pueden afectar a la estabilidad de las instalaciones. Para poder medir estos lentos procesos activos se necesitan varios años y por lo tanto se propuso un proyecto plurianual (mínimo tres campañas antárticas). Se aprobó el proyecto y estos procesos se están estudiando en la actualidad mediante el proyecto de investigación "Auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo a la Base Antártica Española Gabriel de Castilla, Isla Decepción, Antártida".

Este proyecto está liderado y financiado por el Centro LABINGE (Laboratorio de Ingenieros del Ejército "General Marvá")-perteneciente al INTA (Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales) (LABINGE) junto con el Ejército de Tierra (ET). En él colaboran desde el inicio la Universidad Politécnica de Madrid (UPM-Dpto. de Ing. Geológica y Minera) y la Universidad de Alcalá de Henares (UAH-Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente) y a partir del año 2019 se incorpora el Centro Espacial INTA-Torrejón (CEIT) aportando datos SAR del satélite PAZ a través del anuncio de oportunidad AO1-PAZ en el que participan el equipo de la UPM y del LABINGE.

Entre las tareas básicas del proyecto se encuentra la recogida de datos geotécnicos de campo, en el entorno

de la BAEGC. Esta labor la realiza básicamente el personal del LABINGE y ET que se han desplazado a la BAEGC durante las campañas antárticas 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020. Por desgracia, la irrupción de la pandemia COVID-19 en los inicios del 2020 ha supuesto una interrupción en la adquisición de datos al final de la campaña 2019-2020 y en la última campaña 2020-2021.

El objetivo final del proyecto es analizar si existen movimientos de deslizamiento de ladera que afecten a las instalaciones de la BAEGC y si están acoplados con la erosión costera. Para estudiarlos geotécnicamente se propusieron unos objetivos iniciales: determinar la existencia de movimientos superficiales, estimar la profundidad del permafrost y espesor de la capa activa, elaborar un modelo 3D de la ladera y el acantilado y por último desarrollar un modelo de recesión costera.

El área que se analizó en detalle es la ladera situada al sur de la BAEGC (Fig. 2). Dentro del objetivo de determinar la existencia de movimientos superficiales, en la primera campaña (2017-2018) se colocaron unas balizas en la ladera y se midió su posición. En la siguiente campaña 2018-2019 se volvió a medir su posición. De dichas medidas se concluyó que podía haber movimientos superficiales. En la primera campaña, además de las mediciones topográficas se levantaron ocho perfiles por tomografía eléctrica con el fin de cartografiar en el subsuelo la localización del permafrost (potencia y profundidad) y la potencia de la capa activa.

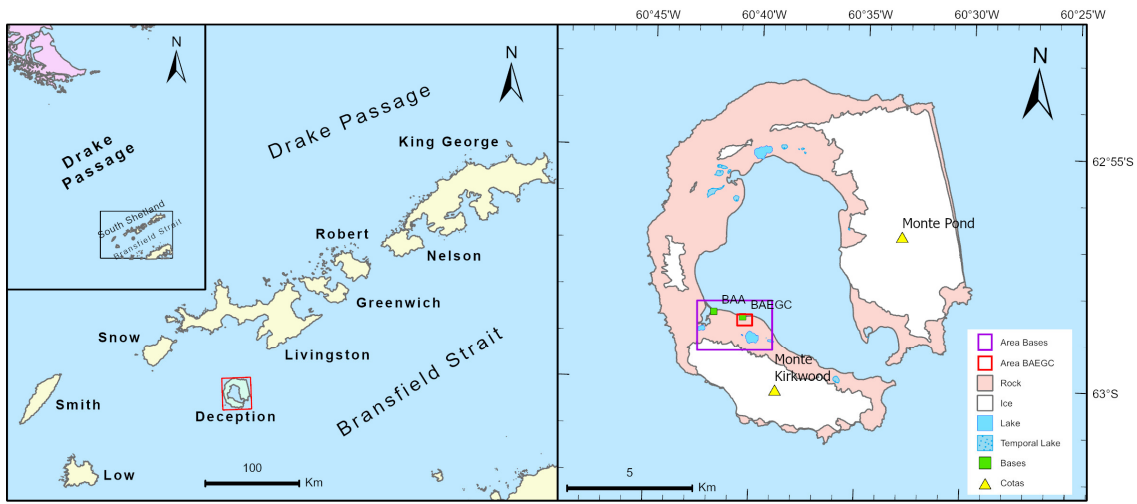


Figura 1: Localización de la isla Decepción. Fuente: modificada SCAR-ADD (2021) y CGE (2005).

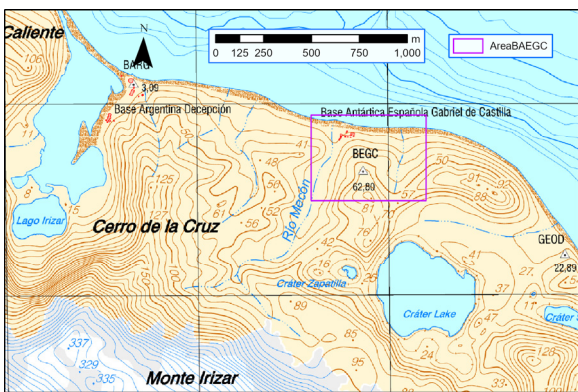


Figura 2: Mapa topográfico del área de las bases BAD y BAEGC. Fuente: modificada CGE (2005).

Una vez constatados que existen movimientos en los terrenos que ocupa la BAEGC, en el año 2019, se decidió estudiar la posibilidad de incluir las técnicas de Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) como herramienta de detección temprana de estos movimientos. Para lo cual se decidió participar en el AO1-PAZ ofertado por el CEIT. En el marco de esta tarea de estudiar la viabilidad de técnicas DInSAR en la detección de los movimientos en el terreno en primer lugar se utilizaron datos Sentinel 1. Los primeros resultados obtenidos se presentan en este artículo.

Para realizar el análisis DInSAR se ha elegido un área de la isla Decepción que comprende las dos bases científicas que existen actualmente: la Base Antártica Decepción (BAD) gestionada por Argentina y la Base



Antártica Española Gabriel de Castilla (BAEGC). En la Figura 2 se puede ver un mapa topográfico del área descrita anteriormente. En el mapa se dibuja el área BAEGC que delimita la zona donde se realizó la adquisición de datos geotécnicos del terreno.

## 2. Materiales

Tal y como se expuso en la introducción lo que se busca en el proyecto es analizar los movimientos del terreno en el entorno de la BAEGC a lo largo de varios años con distintas técnicas entre ellas las técnicas DInSAR. Para detectar los movimientos del terreno mediante técnicas DInSAR se han utilizado imágenes SAR obtenidas por los satélites Sentinel 1. En primer lugar, se definió la ventana temporal en la que se iban a adquirir las imágenes. Para poder detectar las deformaciones se necesita que el suelo esté descubierto de nieve y por lo tanto se tienen que utilizar, las imágenes adquiridas durante el verano antártico preferiblemente en las campañas que se habían tomado datos geotécnicos (2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020). De las tres campañas se decidió recopilar las imágenes adquiridas por los Sentinel 1 entre el 1 de noviembre y el 30 de abril de los años 2017-2018 2018-2019 y 2019-2020. En la Tabla 1 se puede ver un listado completo de las imágenes adquiridas en las tres campañas.

**Tabla 1:** Listado de fechas de adquisición del Sentinel-1.

Campaña 2017-2018	Campaña 2018-2019	Campaña 2019-2020
07/11/2017	02/11/2018	09/11/2019
19/11/2017	14/11/2018	21/11/2019
01/12/2017	26/11/2018	03/12/2019
13/12/2017	08/12/2018	15/12/2019
25/12/2017	20/12/2018	27/12/2019
06/01/2018	01/01/2019	08/01/2020
18/01/2018	13/01/2019	20/01/2020
30/01/2018	25/01/2019	01/02/2020
11/02/2018	06/02/2019	13/02/2020
23/02/2018	18/02/2019	25/02/2020
07/03/2018	02/03/2019	08/03/2020
19/03/2018	14/03/2019	20/03/2020
31/03/2018	26/03/2019	01/04/2020
12/04/2018	07/04/2019	13/04/2020
24/04/2018	19/04/2019	25/04/2020

Además de la cobertura nival otros factores que afectan en la detección de los movimientos mediante técnicas DInSAR son la cobertura nubosa y las precipitaciones. Por lo tanto, estos tres factores junto con otros de índole interferométrica se van a utilizar para la selección de las imágenes más adecuadas para cada campaña. En cada una de las tres campañas se va a elegir una pareja de imágenes para realizar el procesado DInSAR.

Tal y como se ha dicho anteriormente, los primeros condicionantes de la elección eran la cobertura nival y la meteorología de la isla en el momento de la adquisición de la imagen. Para estimar estos condicionantes se

utilizaron imágenes en el óptico y los datos meteorológicos y de la cobertura de nieve recogidos en los diarios de la BAEGC. Se desecharon todas las imágenes que a priori parecían tener una cobertura nival extensa y/o la meteorología era adversa. El resultado del análisis anterior fue la selección de una serie de imágenes cuyo listado se puede ver en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Listado de imágenes Sentinel-1 descargadas.

Campaña 2017-2018	Campaña 2018-2019	Campaña 2019-2020
19/11/2017	02/11/2018	15/12/2019
25/12/2017	06/02/2019	27/12/2019
07/03/2018	02/03/2019	08/01/2020
31/03/2018		01/02/2020
12/04/2018		08/03/2020
24/04/2018		13/04/2020

Con estas imágenes se analizaron los posibles emparejamientos y en función de la meteorología y la línea base espacial y temporal se decidió obtener el interferograma y el mapa de coherencia de los siguientes pares que se listan en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Listado de pares de imágenes Sentinel-1 con interferograma y coherencia.

Pares de imágenes	Baseline (m)	Precipitación
19/11/17 12/04/18	127.89	nula/débil
25/12/17 12/04/18	76.67	nula
07/03/18 31/03/18	123.09	alta/nula
07/03/18 12/04/18	13.03	alta/nula
31/03/18 24/04/18	130.21	nula
02/11/18 06/02/19	165.38	nula
06/02/19 02/03/19	125.19	nula/débil
15/12/19 01/02/20	46.95	/débil
27/12/19 13/04/20	203.32	débil/
08/01/20 13/04/20	187.94	Bruma/
01/02/20 08/03/20	58.59	débil/nula

Se analizaron los interferogramas y los mapas de coherencia de todas estas parejas de imágenes y junto con los datos meteorológicos y las líneas base temporal y espacial se decidió que las tres mejores parejas para analizar en detalle los movimientos eran las siguientes y se pueden ver en las Tablas 4 y 5.

Estos tres pares se procesaron hasta obtener el mapa con los desplazamientos Line Of Sight (LOS) del terreno.

Los productos imagen SAR del Sentinel 1 utilizados en el procesado interferométrico son datos adquiridos en modo Interferometric Wide Swath (IW), con un nivel L1 de correcciones y en forma de producto Single-Look Complex (SLC) (Bourbigot *et al.* 2016). Una muestra del tipo de imagen SLC utilizada se puede ver en la Figura 3.

Además de los datos SAR para poder analizar el origen de los desplazamientos detectados mediante las imágenes SAR es necesario conocer la verdad terreno en

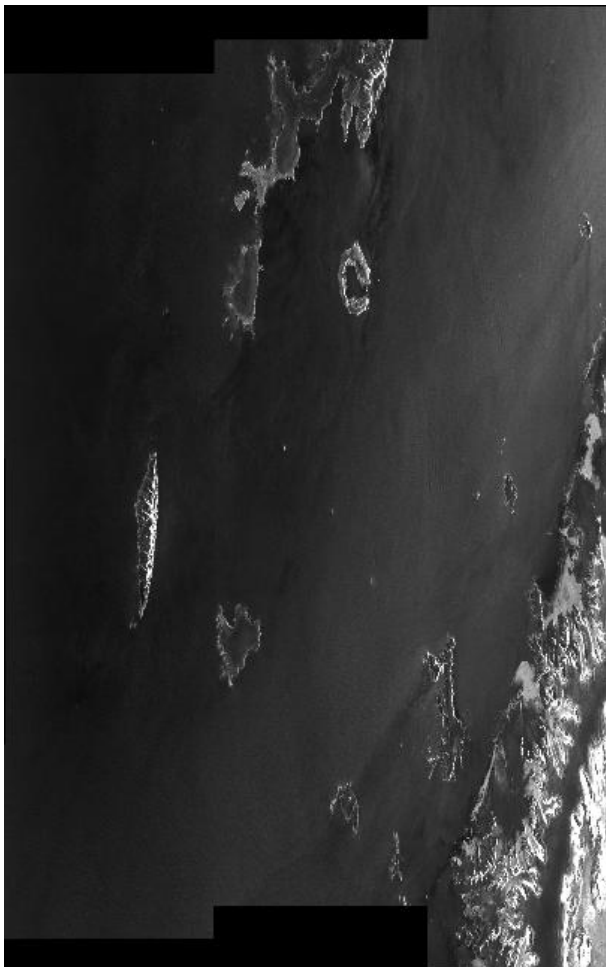
el entorno de las bases. Esta verdad terreno se va a obtener a partir de los datos geotécnicos obtenidos en las campañas, mapas topográficos, el modelo de elevaciones del área, el modelo de pendientes y los mapas geomorfológicos y geológico de la isla.

**Tabla 4:** Selección final de imágenes.

Campaña 2017-2018	Campaña 2018-2019	Campaña 2019-2020
31/03/2018	06/02/2019	01/02/2020
24/04/2018	02/03/2019	08/03/2020

**Tabla 5:** Listado de pares de imágenes Sentinel-1.

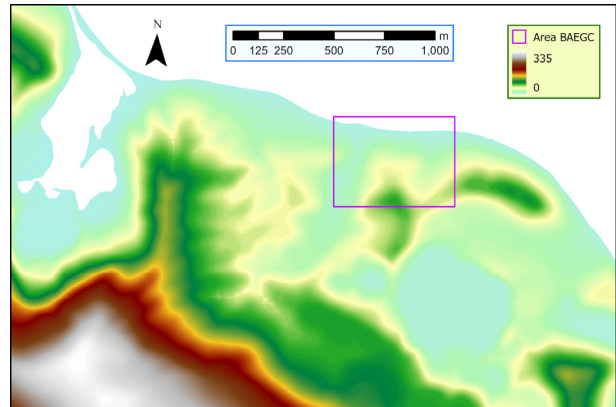
Pares de imágenes	Baseline (m)	Precipitación	Baseline temporal (días)
31/03/2018	130.21	nula	24
24/04/2018			
06/02/2019	125.19	nula/débil	24
02/03/2019			
01/02/2020	58.59	débil/nula	36
08/03/2020			



**Figura 3:** Imagen SLC intensidad 31/03/2018 (ESA-Copernicus).

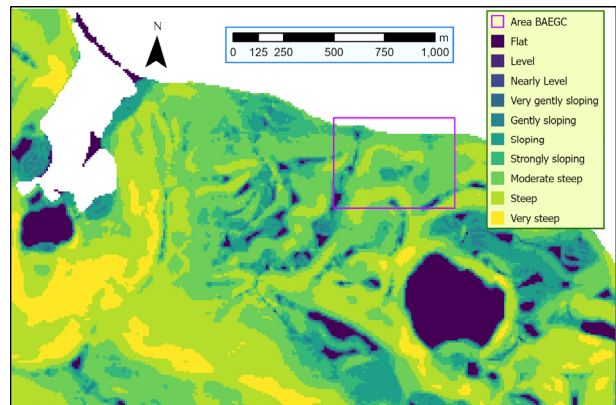
De la isla Decepción se ha dispuesto del mapa topográfico escala 1:25000 realizado por el Centro Geográfico del Ejército (CGE), España (CGE 2005). Este mapa se ha utilizado en formato digital ráster y formato digital vectorial. En formato ráster el píxel tiene una resolución de 2.5 m. El formato digital vectorial original era formato CAD Microstation (dgn) que se convirtió en capas vectoriales en formato geodatabase feature de ArcGIS. También se han utilizado los mapas y otros datos geográficos disponibles en los servidores SCAR Antarctic Digital Database (Gerrish *et al.* 2021).

A partir de las curvas de nivel de este mapa topográfico en formato vectorial un equipo de investigadores de la Universidad de Cádiz (UCA) y del CGE obtuvieron el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la isla Decepción en formato TIFF. Este MDE tiene un píxel de resolución de 2 m. En la Figura 4 se puede ver el MDE.



**Figura 4:** Modelo Digital de Elevaciones.

Este modelo se ha procesado con herramientas de análisis de MDE incluidas en la aplicación ArcGIS para producir el Modelo Digital de Pendientes (MDP) de la isla Decepción. El MDP se remuestreó para que tuviera un píxel con la misma resolución que los mapas de desplazamientos LOS, 10 m. En la Figura 5 se puede ver el mapa con las pendientes clasificadas según el criterio de la FAO (Baxter 2006).



**Figura 5:** Mapa pendientes.

Respecto a los mapas geológico y geomorfológico se dispone de tres mapas de distintos autores. Los mapas más antiguos son el mapa geológico y el mapa geomorfológico publicados por el British Antarctic Survey (Smellie *et al.* 2002). Ambos mapas están a escala 1:25000 y se apoyan en la primera edición del mapa

topográfico realizado por el Centro Geográfico del Ejército (España) (SGE 1992). El tercer mapa es un mapa geomorfológico de la isla Decepción realizado en una tesis doctoral (Goyanes 2015). Los tres mapas (geológico y los dos geomorfológicos) se han escaneado y georreferenciado obteniéndose tres mapas digitales ráster con un pixel de 2 m. En la Figura 6 se puede ver el mapa geomorfológico de Goyanes (2015).

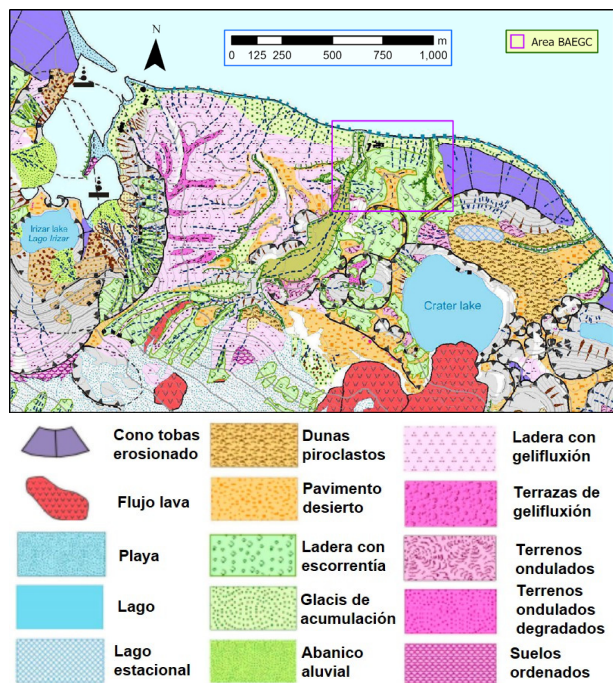


Figura 6: Mapa Geomorfológico (Goyanes 2015).

Otros datos que se han utilizado para analizar los movimientos del terreno han sido los datos topográficos y geofísicos obtenidos en el campo durante las campañas antárticas.

### 3. Métodos

El método de análisis que se ha seguido tiene dos fases. En la primera fase, se han detectado por métodos DInSAR los movimientos en el terreno. Y en una segunda fase, se han comparado dichos movimientos con la información verdad terreno del lugar donde se han detectado obtenida a partir de los mapas topográficos, geológicos y geomorfológicos, imágenes ópticas, datos meteorológicos y datos de campo de la isla Decepción. Se ha intentado dar una explicación a las señales de movimiento detectadas.

La primera fase, procesado DInSAR, se ha realizado con las imágenes radar de la isla Decepción completa. En la última etapa de la fase, de los resultados obtenidos se han extraído los del área de las bases definida al final de la introducción.

El procesado DInSAR de dos imágenes SAR se basa en medir la fase de un mismo punto del terreno en dos épocas distintas desde posiciones espaciales lo más próximas y obtener la diferencia entre las fases medidas. Si el punto no se ha movido la diferencia de fase será nula, pero si el objetivo se ha movido existirá una diferencia de fase ( $\Delta\varphi$ ). Esta imagen con las diferencias de fase es lo que se denomina interferograma. Esta

diferencia en la fase tiene varias componentes una primera es el desplazamiento del objetivo ( $\varphi_{desp}$ ). Una segunda componente contribución de la topografía del terreno y la curvatura de la Tierra ( $\varphi_{topo}$ ). Una tercera componente es la atmosférica ( $\varphi_{atm}$ ). Y la cuarta y última es el ruido ( $\varphi_{ruido}$ ). Esto se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Minh *et al.* 2020), Ec. (1):

$$\Delta\varphi = \varphi_{desp} + \varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \varphi_{ruido} \quad (1)$$

Dada la ecuación anterior si se desea que el interferograma sirva para obtener los desplazamientos LOS hay que eliminar las otras tres componentes: topográfica, atmosférica y ruido. En el procesado DInSAR que se ha realizado, en primer lugar, se obtuvo el interferograma de los desplazamientos LOS.

Como se comentó anteriormente en la primera fase del análisis se ha trabajado con dos herramientas. En la primera etapa de esta fase se ha utilizado la herramienta proporcionada por la Agencia Espacial Europea (ESA), la aplicación SNAP 8.0 (SentiNel Applications Platform) que incluye la herramienta Sentinel 1 Toolbox (ESA 2021) para obtener el interferograma de cada pareja de imágenes siguiendo los pasos que se pueden ver en la Figura 7.

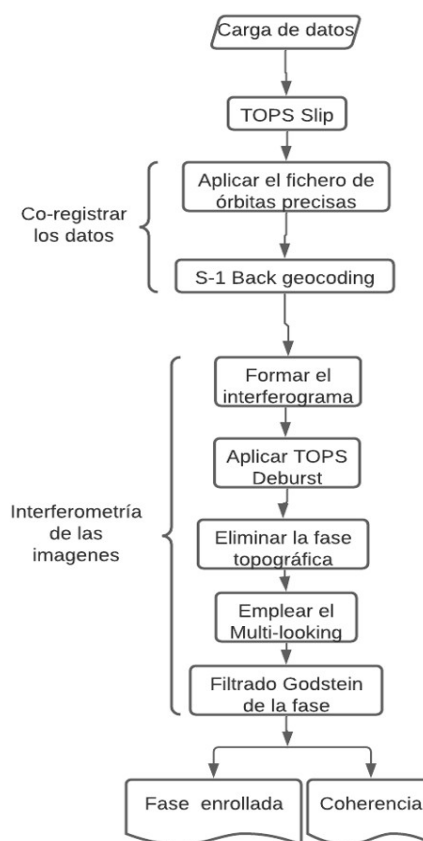
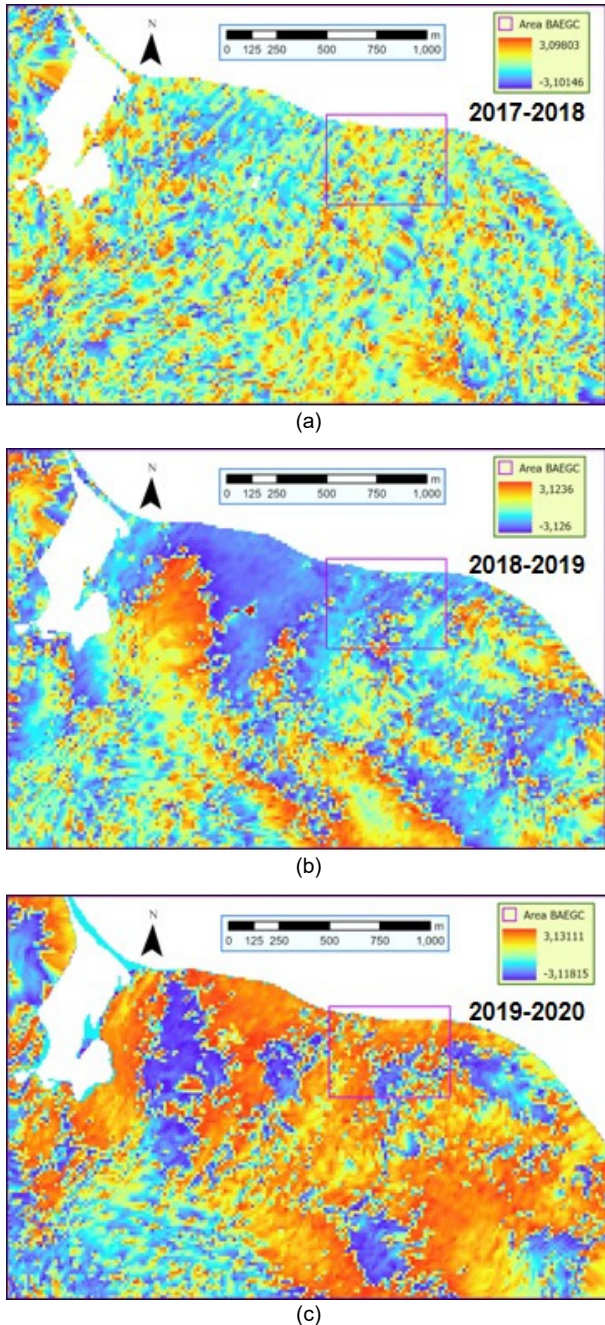


Figura 7: Diagrama de flujo de la primera etapa.

En el primer paso de esta etapa se corrigieron las imágenes, es decir, buscaron los ecos radar procedentes del mismo objetivo. En el siguiente paso se calculó el interferograma. A ese interferograma se le eliminó la componente topográfica utilizando el MDE de la isla. Una vez eliminada la componente topográfica nos queda la atmosférica.



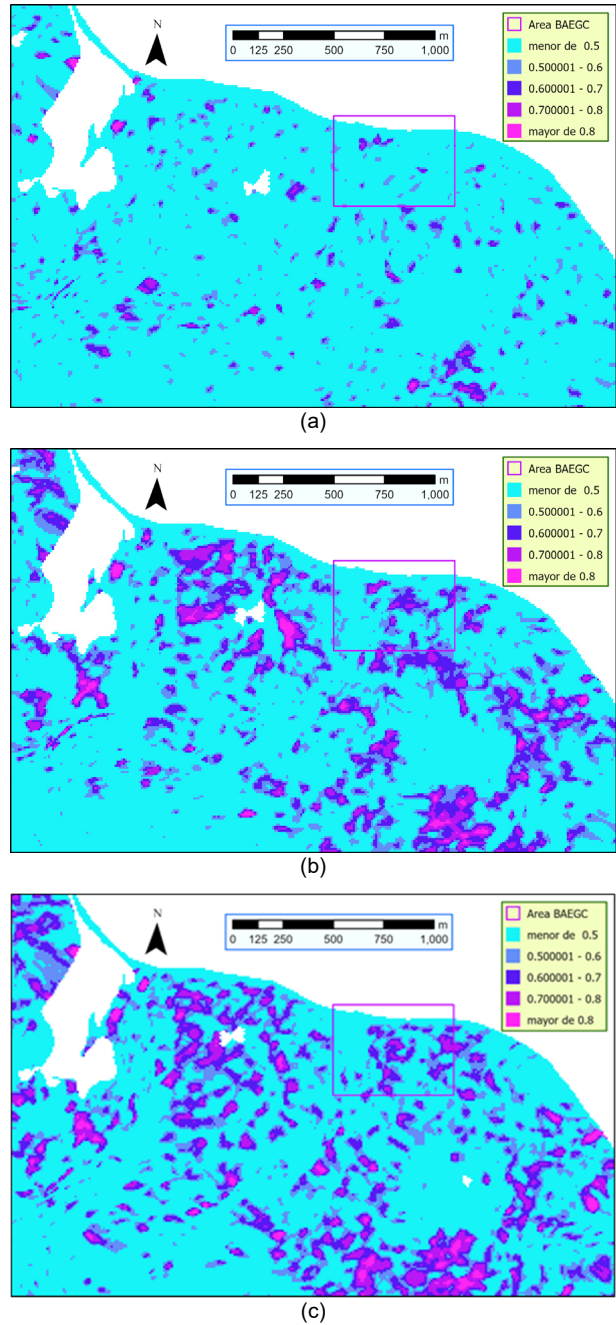
La componente atmosférica la suponemos muy atenuada debido a la selección de las imágenes con mejor meteorología y por lo tanto se asume como ruido. En los últimos pasos se anula la componente de ruido mediante técnicas de filtrado multiloooking y Godstein. El resultado es el interferograma enrollado de los desplazamientos LOS. Los tres interferogramas que se han obtenido se pueden ver en la Figura 8.



**Figura 8:** Interferogramas de los desplazamientos LOS: a) 2017-2018; b) 2018-2019; c) 2019-2020.

A la vez que se obtuvieron los interferogramas se han obtenido los mapas de coherencias que se pueden ver en la Figura 9.

En la segunda etapa, se ha utilizado la aplicación SNAP 2.0.4 (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) para desarrollar la fase (Chen and Zebker 2000, 2001, 2002).



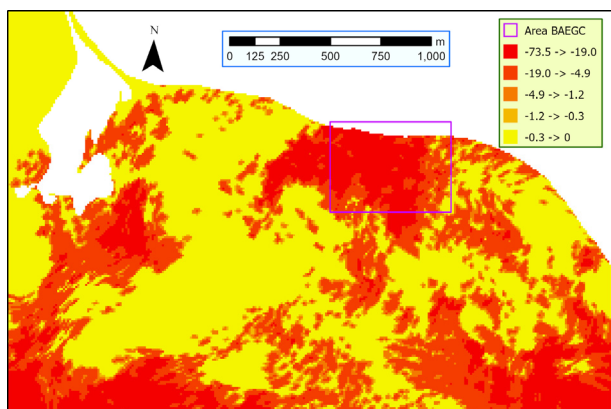
**Figura 9:** Mapa de coherencia para las campanas: a) 2018; 2019; 2020.

En la tercera etapa una vez que hemos desarrollado la fase se obtiene el mapa de desplazamientos Line Of Sight (LOS) de la superficie analizada con las herramientas de SNAP 8.0. Los resultados se pueden ver en la Figura 10.

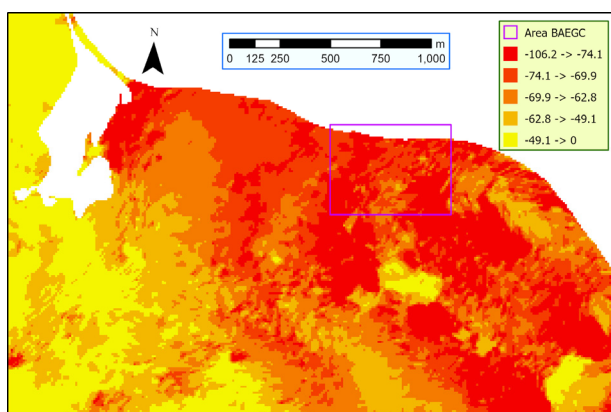
En la cuarta y última etapa, con la aplicación SNAP 8.0, se proyectan cartográficamente (geocodificación) los interferogramas y mapas obtenidos en la etapa anterior para poderlos cotejar con los datos de verdad terreno en la siguiente fase. Estos mapas se exportan en formato TIFF y se recortan al área en el entorno a las bases antárticas. Estas imágenes en el entorno de las bases son las que se muestran en las Figuras 8 – 10.

En la Figura 11 se puede ver un diagrama de flujo con las tres últimas etapas.

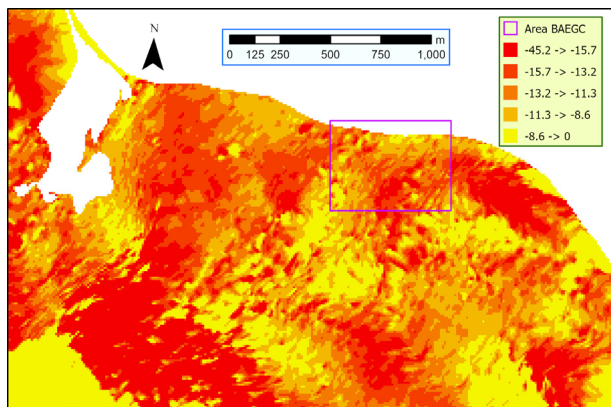




(a)



(b)



(c)

Figura 10: Mapa desplazamientos LOS en mm para las campañas: a) 2018; b) 2019; c) 2020.

En resumen, en esta primera fase se ha realizado el procesado DInSAR a las tres parejas de imágenes previamente descritas en el apartado de materiales según el algoritmo descrito anteriormente y se ha obtenido como resultado un mapa de desplazamientos LOS y un mapa de coherencia para cada una de las tres campañas analizadas, en el entorno de las bases antárticas. Para ejecutar esta primera fase se ha seguido varios documentos y manuales (Braun and Veci 2020).

#### 4. Resultados

Los resultados obtenidos en esta primera fase son los mapas de coherencia y los mapas de desplazamientos LOS.

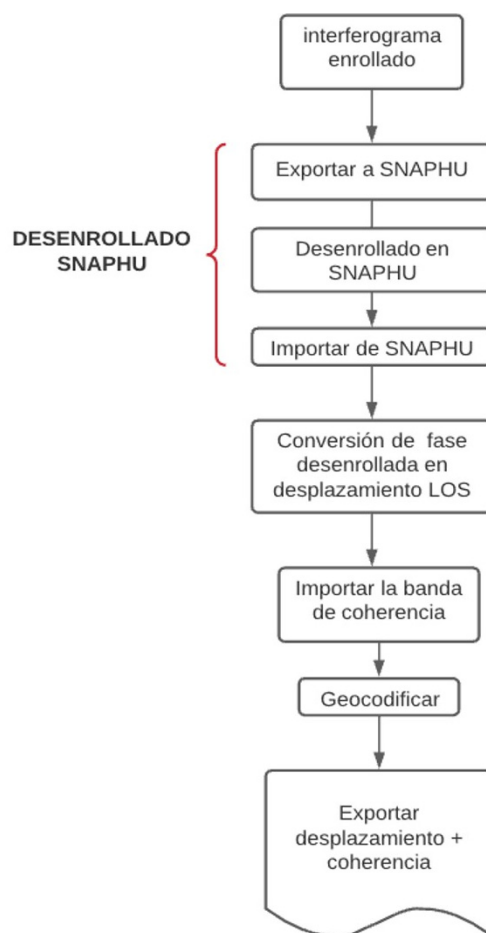


Figura 11: Diagrama de flujo de las etapas 2, 3 y 4.

Los mapas de coherencia son un estimador, en el sentido estadístico, de la calidad de la medida de la fase. Este parámetro varía entre 0 y 1 siendo 0 la falta de coherencia en la fase y 1 coherencia total. Por lo tanto, la estimación de los desplazamientos LOS en un pixel, a priori, tiene una mayor calidad cuanto mayor es la coherencia en dicho pixel.

En la Figura 9 vemos que esta coherencia varía de una campaña a otra. Para representar de una manera más visual la coherencia se ha clasificado los valores en 5 clases siendo la clase color azul claro la de coherencia menor o igual a 0.5 las restantes 4 clases de color azul más oscuro, violeta y magenta los valores mayores de 0.5 hasta 1.0.

El segundo grupo de resultados obtenidos son los mapas de desplazamientos LOS. Para su mejor análisis se han simbolizado mediante una escala amarillo-rojo en la que el amarillo es un desplazamiento nulo y el rojo es el desplazamiento máximo alejándose de la antena. La agrupación de las medidas en clases se ha obtenido dividiendo el rango de los datos en quintiles.

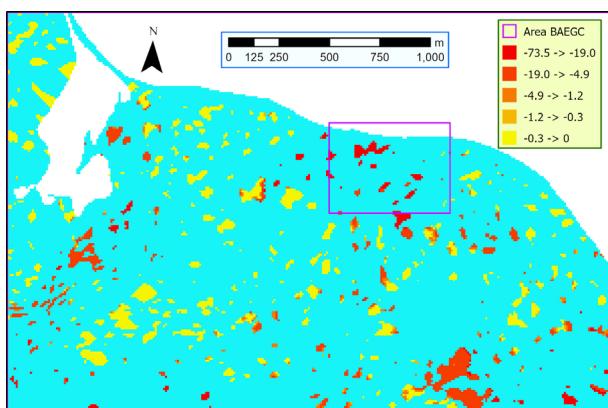
En la primera campaña (2017-2018) con una base temporal de 24 días se obtuvieron unos desplazamientos LOS entre 0 y -73 mm alejándose de la antena (signo negativo) que se pueden ver en la Figura 10a.

En la segunda campaña (2018-2019) con una base temporal de 24 días se obtuvieron unos desplazamientos LOS entre 0 y -106 mm predominando valores por encima de los -60 mm que se pueden ver en la Figura 10b.

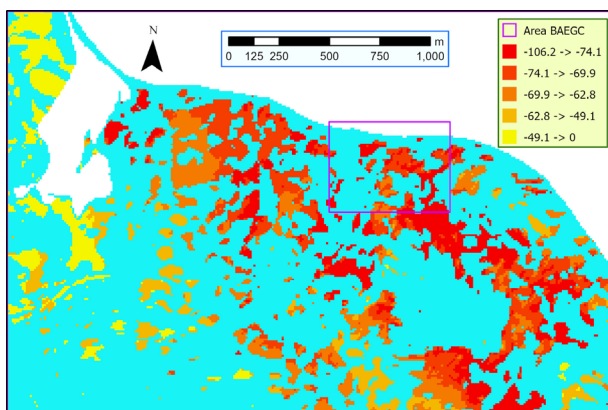
En la tercera campaña (2019-2020) con una base temporal de 36 días se midieron unos desplazamientos LOS entre 0 y -45 mm. que se pueden ver en la Figura 10c.

## 5. Discusión y conclusiones

En la segunda fase del trabajo se analizaron los resultados obtenidos en el entorno de las bases antárticas mediante con ayuda de las herramientas de ArcGIS. Para realizar el análisis de una manera más detallada se han enmascarado los valores de desplazamiento LOS con la coherencia de manera que únicamente se tienen en cuenta los píxeles cuya coherencia es mayor de 0.5. En las Figuras 12 - 14 se representan en cyan los píxeles enmascarados y en la escala amarillo-rojo los píxeles cuyo desplazamiento LOS se ha analizado.

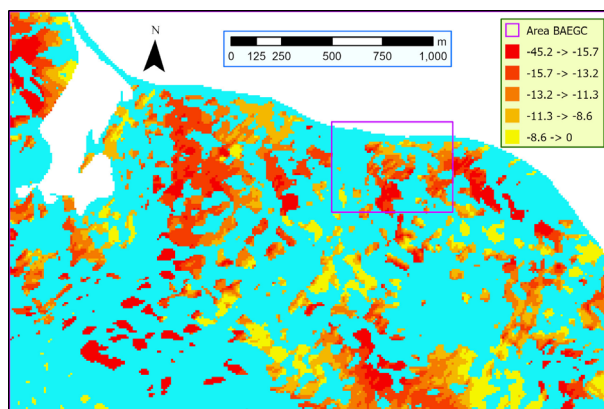


**Figura 12:** Desplazamientos LOS con coherencia > 0.5. Campaña 2017-2018.



**Figura 13:** Desplazamientos LOS con coherencia > 0.5. Campaña 2018-2019.

De estos análisis, llama la atención la gran variabilidad en los desplazamientos LOS del terreno para las distintas campañas. En la primera campaña de 2018 aunque los valores varían entre 0 y -73 mm se puede observar que la mayoría de los píxeles con coherencia superior a 0.5 (Fig. 12) tienen valores de desplazamiento en rango menor de 1 mm (los dos quintiles más bajos). En cambio, en el entorno de los edificios de la BAEGC en zonas de alta coherencia los valores de desplazamiento LOS están en el quintil más alto (-19 mm a -73 mm).



**Figura 14:** Desplazamientos LOS con coherencia > 0.5. Campaña 2019-2020.

En la segunda campaña de 2019 los desplazamientos LOS varían entre 0 y -106 mm. En las zonas de alta coherencia en el entorno de la BAEGC los valores mayoritariamente pertenecen a los dos quintiles superiores (-74 mm a -106 mm). Además, las áreas de alta coherencia son más numerosas que en la campaña de 2018.

En la tercera campaña de 2020 los desplazamientos LOS varían entre 0 y -45 mm. Se encuentran más distribuidos entre las distintas clases, aunque predominan los valores de los tres quintiles superiores (varían entre -11 mm y -45 mm). Las áreas de coherencia superior a 0.5 son muy parecidas a las de la segunda campaña.

Es importante destacar que estos desplazamientos del terreno están medidos en la dirección del Line Of Sight (LOS) y por lo tanto dependen de la orientación del terreno respecto de la dirección de iluminación del radar.

Comparando los mapas de desplazamientos con el mapa geomorfológico de Goyanes (2015) se puede observar que gran parte de los desplazamientos se detectan en zonas con procesos de geliflujión. Comparando con el mapa de pendientes clasificado según Baxter (2006) se detectan la mayoría de los movimientos en laderas con pendientes superiores al 1% lo cual incluiría movimientos debidos a geliflujión o a erosión. Comparando las tres campañas se aprecian fuertes diferencias principalmente entre la primera campaña y las otras dos campañas. Todas estas circunstancias parecen indicar que los movimientos detectados son de carácter local, y que pueden ser debidos a variaciones en la capa activa del permafrost y/o procesos de erosión.

En conclusión, con estas tres estimaciones lo único que se puede afirmar es que en el entorno de la BAEGC hay movimientos del terreno y que estos son variables en cada campaña. Por lo tanto, se ha confirmado la existencia de movimientos en el terreno con otra técnica distinta. Para poder cuantificarlos de una manera precisa sería necesario procesar series de imágenes mediante técnicas avanzadas DINSAR.

## References

- BAXTER, S., 2006. Guidelines for Soil Description. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Experimental Agriculture, **43**(2), pp. 263-264.
- BOURBIGOT, M., JOHNSEN, H. and PIANTANIDA, R., 2016. Sentinel-1 Product Definition (esa.int). Available: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Definition> [7/15, 2021].
- BRAUN, A. and VECL, L., 2020. TOPS Interferometry Tutorial, Sentinel-1 Toolbox Skywatch ESA. Available: [http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX TOPSAR Interferometry with Sentinel-1 Tutorial\\_v2.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX_TOPSAR_Interferometry_with_Sentinel-1_Tutorial_v2.pdf) [7/15, 2021].
- CGE. 2005. Mapa Topográfico de la Isla Decepción - edición 2a.
- CHEN, C. W., and ZEBKER, H. A., 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *JOSA A*, **17**(3), pp. 401-414. DOI: 10.1364/JOSAA.17.000401
- CHEN, C. W., and ZEBKER, H. A., 2001. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *JOSA A*, **18**(2), 338-351. DOI: 10.1364/JOSAA.18.000338
- CHEN, C. W., and ZEBKER, H. A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(8), pp. 1709-1719. DOI: 10.1109/TGRS.2002.802453
- ESA. 2021. European Space Agency. Sentinel-1 Toolbox – STEP (esa.int). Available: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/> [7/15, 2021].
- GERRISH, L., FRETWELL, P. and COOPER, P., 2021. High resolution vector polygons of the Antarctic coastline (7.4), UK Polar Data Centre, Natural Environment Research Council, UK Research & Innovation. DOI: 10.5285/cdeb448d-10de-4e6e-b56b-6a16f7c59095.
- GOYANES, G. A., 2015. *Control climático e interacciones permafrost-volcanismo, Isla Decepción, Antártida* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- MINH, D. H. T., HANSEN, R. AND ROCCA, F., 2020. Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, **12**(9), pp. 1–18. DOI: 10.3390/RS12091364.
- SGE. 1992. Mapa Topográfico de la Isla Decepción - edición 1a.
- SMELLIE, J. L., LÓPEZ-MARTÍNEZ, J., HEADLAND, R. K., HERNÁNDEZ-CIFUENTES, F., MAESTRO, A., MILLAR, I. L.; REY, J.; SERRANO, E.; SOMOZA, L.; and THOMSON, J. W., 2002. *Geology and geomorphology of Deception Island*. Cambridge, British Antarctic Survey, 77pp. (BAS Geomap Series, Sheets 6A and 6B).

## IMPROVED STOCK UNEARTHING METHOD (ISUM) ALLOW TO ASSESS SOIL EROSION PROCESSES IN GRAFTED PLANTS USING *IN SITU* TOPOGRAPHICAL MEASUREMENTS

**EL MÉTODO MEJORADO DEL TOCÓN (ISUM) PERMITE EVALUAR PROCESOS DE EROSIÓN DEL SUELO EN PLANTAS INJERTADAS UTILIZANDO MEDIDAS TOPOGRÁFICAS *IN SITU***

Jesús Rodrigo-Comino<sup>a,\*</sup>, Enric Terol<sup>b</sup>, Artemi Cerdà<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Facultad de Filosofía y Letras, Campus Universitario de Cartuja, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. [jesusrc@ugr.es](mailto:jesusrc@ugr.es)

<sup>b</sup> Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [eterol@cgf.upv.es](mailto:eterol@cgf.upv.es)

<sup>c</sup> Soil Erosion and Degradation Research Group, Department of Geography, University of Valencia, 46010 Valencia, Spain. [artemio.cerda@uv.es](mailto:artemio.cerda@uv.es)

### Abstract:

Policymakers, stakeholders and rural inhabitants must be aware of the relevance of soil erosion as an irreversible land degradation process. This is key to achieve the land degradation neutrality challenge and the sustainability of humankind and natural ecosystems. Agricultural areas are being affected by soil erosion threatening soil quality and, subsequently, food security. Therefore, it is necessary to develop new techniques and methods visually friendly and easy to be accessed to survey and assess the soil erosion concerns. ISUM (Improve Stock Unearthing Method) is a well-contrasted procedure to estimate and map soil mobilisation and erosion rates. To achieve this goal, using the plant graft union as a biomarker conducting in situ topographical measurements along perpendicular transects allow us to i) explain key factors related to the activation of soil erosion processes such as tillage, the age of plantation, parent material or hillslope positions; ii) complete other well-contrasted methods such as RUSLE (Revised Soil Loss Equation), IC (Index of connectivity) or Structure from Motion; and, iii) identify hotspot areas affected by soil depletion, accumulation or mobilisation. In this conference, we will show how we developed a new improvement of this method in different crops (vineyards, citrus, persimmons or almonds), under different environmental conditions (parent material, vine ages, soil management, or slope angle) with diverse geomatic procedures (interpolation methods and geostatistical analysis, topographical measurements and models) using GIS techniques.

**Key words:** soil surface, cartography, mapping techniques, agriculture, soil geography

### Resumen:

Los encargados de diseñar políticas, los trabajadores y los habitantes rurales deben ser conscientes de la relevancia de la erosión del suelo como un proceso irreversible de degradación de la tierra. Esto es clave para lograr la neutralidad en la degradación de la tierra y lograr la sostenibilidad para la humanidad y los ecosistemas naturales. Especialmente, las áreas agrícolas se ven afectadas por la erosión del suelo que amenaza la calidad del suelo y, posteriormente, la seguridad alimentaria. Por tanto, es necesario el desarrollo de nuevas técnicas atractivas visualmente, de fácil manejo y eficientes en la divulgación de los resultados. ISUM (Improve Stock Unearthing Method) es un procedimiento contrastado para estimar y cartografiar las tasas de movilización del suelo y los procesos de erosión. Para lograr este objetivo, el uso del injerto como biomarcador realizando mediciones topográficas in situ (cada 10 cm) a lo largo de transectos perpendiculares permite: i) explicar los factores de la activación de los procesos de erosión del suelo como la labranza, la edad de la plantación, material parental o posición en laderas; ii) complementar otros métodos bien contrastados como la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), IC (Índice de conectividad) o parcelas de erosión; y, iii) detectar áreas críticas afectadas por el agotamiento, acumulación o movilización del suelo. En esta conferencia, queremos mostrar cómo desarrollamos una nueva mejora de este método en diferentes cultivos (viñedos, cítricos, caquis, y almendros), bajo diferentes condiciones ambientales (roca madre, edades de la vid, manejo del suelo o pendiente) con diversos procedimientos geomáticos (métodos de interpolación y análisis geostadístico, mediciones y modelos topográficos) mediante técnicas SIG.

**Palabras clave:** superficie del suelo, cartografía, técnicas cartográficas, agricultura, geografía del suelo

\* Corresponding Author: Jesús Rodrigo-Comino, [jesusrc@ugr.es](mailto:jesusrc@ugr.es)



## 1. Introduction

A powerful agricultural sector being conservative with the soil fertility and its associated ecosystem services is key to sustainable rural development and do not compromise food security (Godfray *et al.* 2010; Abu Hatab *et al.* 2019). However, non-sustainable soil management systems in agriculture fields are widespread in many regions of the world because of the use of chemicals, heavy machinery to the soil surface and the intensification of the production (Bijanazadeh and Ghadiri 2006; Bagherzadeh *et al.* 2018; Bongiorno *et al.* 2019). Land degradation processes, especially due to the high soil erosion rates are threatening soil fertility, damage soil quality and induce dramatic economic losses after obtaining the final incomes (Niu *et al.* 2020; Telak and Bogunovic 2020). The lack of sustainable agricultural practices can generate soil erosion processes characterized to be irreversible at medium- and long-term periods.

Nowadays, numerous studies have highlighted the elevated soil erosion rates in traditional plantations such as olives (Beniaich *et al.* 2020), vineyards (Rodrigo-Comino 2018), cereals (López-Vicente *et al.* 2015), citrus (Duan *et al.* 2020), persimmons (Bayat *et al.* 2019) or apricots (Keesstra *et al.* 2016). To obtain these results, scholars have used rainfall simulation experiments (Cerdà *et al.* 2020), modelling techniques (Panagos *et al.* 2015) or erosion plots (Biddoccu *et al.* 2020) among other relevant methods. The development of new techniques and methodologies visually friendly and easy to be accessed to survey and assess the soil erosion concerns are necessary and could increase farmers, society and policymakers' awareness.

ISUM (Improve Stock Unearthing Method) is a well-contrasted procedure to estimate and map soil mobilisation and erosion rates (Rodrigo-Comino and Cerdà 2018). It takes the plant graft union as a biomarker to allow us recognizing soil surface changes and detect hotspots of soil erosion processes. In this communication, we want to introduce ISUM as an *in situ* topographical tool conducted along perpendicular transects to i) explain key factors related to the activation of soil erosion processes such as tillage, the age of plantation, parent material or hillslope positions; ii) complete other well-contrasted methods such as RUSLE (Revised Soil Loss Equation), IC (Index of connectivity) or erosion plots; and, iii) identify hotspot areas affected by soil depletion, accumulation or mobilisation. In this conference paper, we will show how we developed a new improvement of this method in different crops (vineyards, citrus, persimmons or almonds), under different environmental conditions (parent material, plant ages, soil management, or slope angle) with diverse geomatic procedures (interpolation methods and geostatistical analysis, topographical measurements and models) using GIS techniques.

## 2. From SUM to ISUM (improved stock unearthing method)

### 2.1. Definition and procedures

The Improved Stock Unearthing method (ISUM) has been demonstrated to be a reliable method to assess soil mobilisation rates and understand how soil erosion can affect cultivated areas with grafted plants (Rodrigo-Comino *et al.* 2019). The results show an accurate

assessment of the spatiotemporal evolution of the soil surface level from pluri-annual to pluri-decennial time scales. ISUM is an improved technique based on the first procedures applied in vineyards (Brenot *et al.* 2006; Casalí *et al.* 2009) and olives orchards (Vanwalleghem *et al.* 2010), which was called SUM (Stock Unearthing Method). The pioneer method was similar to other dendro-geomorphology ones (Schnabel 1994) as it considers the distance from the surface soil to the grafted part of the plant, which was confirmed as a passive biomarker of soil surface-level changes since the initial plantation took place (Parioissien *et al.* 2010).

For example, in vineyards, after the *Phylloxera* crisis, all the *Vitis vinifera* were grafted with American scions of controlled species. Other plants are simply grafted to obtain different fruit varieties. However, it is key during this process to understand that the initial distance measured, the day of the plant plantation, between these frontal marks on the graft union and the soil surface remains at the same position if no interventions of external factors such as machinery or extreme rainfall events occur during the first days (Rodrigo-Comino *et al.* 2016). The current distance between the frontal marks on the graft union (visible by the researcher) and the soil surface can be measured, which can have either an unearthing or buried signal. During the last decade, several scholars stated this main hypothesis based on this relative stable distance at initial conditions (Brenot *et al.* 2006; Casalí *et al.* 2009). The main weakness of the previous method (SUM) is that it was established on the assumption that the topsoil surface remains almost planar without considering the generation of uncertainties because of the own soil surface roughness, rills, footpaths or wheel tracks signals. Therefore, the most important premise was to include new improvements to consider the diverse changes between each paired-plant or inter-row areas. Therefore, new extra topographical measurements were performed and validated, from each 0.1 to 0.5 m (Fig. 1). It is necessary that the same trained expert/s perform the topographical measurements to avoid any bias.

### 2.2. *In situ* topographical measurements

To achieve our goal, we consider each opposite paired plant along each selected inter-row. Then, we first identify where the graft union is and then stretch a measuring tape between these paired points (a meter stick to estimate the vertical distance between the horizontally stretched measuring tape and the current soil surface). We recommend performing measurements at least at 10 cm intervals. To reduce complications during our field campaign when the graft union is buried, the measuring tape was situated 30 cm above the graft union. So, for example, if the original soil surface level was levelled up to 2 cm below the graft union, and thus 32 cm below the measuring tape level, the difference between 32 cm and the current measurement at the graft union gives an indication of unburied (negative) or buried (positive) values (Rodrigo-Comino and Cerdà 2018). It is worthy to highlight that the soil roughness under the plants can generate little steps or holes or the grass cover made difficult the visibility of the graft union. Therefore, the grasses were carefully eliminated, or soil softly levelled, not affecting our final sampling collection.

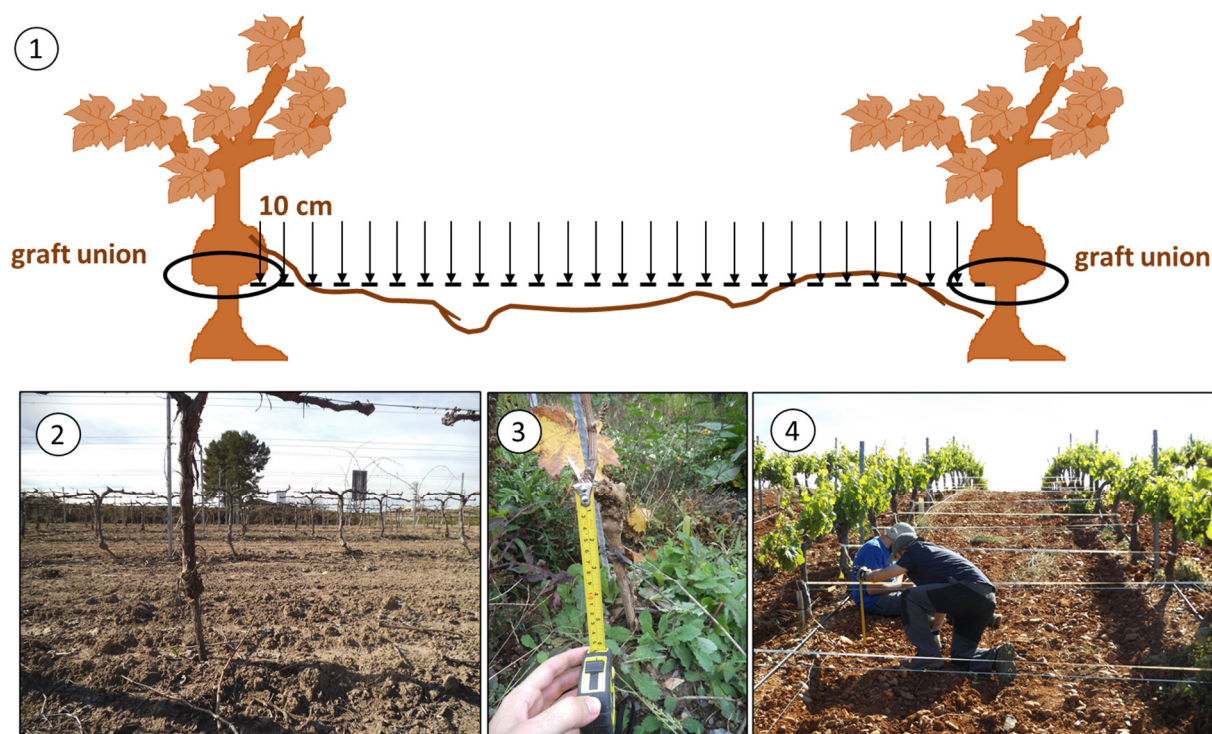


Figure 1: ISUM procedure: 1) sampling strategy; 2) and 3) Graft union examples (8 and 2-years old vineyards in Valencia -Spain- and Trier -Germany-, respectively); 4) Field campaign in Tierra de Barros (Spain).

### 2.3. Geostatistic tools: ISUM maps and interpolation methods

The expected final results must be thematic maps confirmed by warm and cold colours to show the soil surface level changes at the moment when the field campaign took place. First, all the points were organized in an database and then converted into a grid of points using the function “fishnet” of ArcMap 10.5 (ESRI, USA) software. Second, different geostatistical methods most commonly used in soil sciences were tested to generate the best ISUM maps reflecting the topographical changes on the cultivated surface. All data were cross-validated by varying the model parameter values and using different kernel functions. All of these methods should be firstly checked to obtain the best result.

- Inverse distance weighting (IDW).
- Ordinary kriging.
- Empirical Bayesian Kriging (EBK).
- Radial Basis Functions (RBFs).
- Completely regularized spline: spline with tension; multi-quadric; inverse multi-quadric; and thin-plate spline.

Finally, we considered the *RMSE* (Root-mean-square-error) and  $R^2$  (Coefficient of Determination) to validate the models' performance in a cross-validation mode. The smaller the *RMSE* and the higher the  $R^2$  the better. In the case that we are not sure how many points must be used to obtain the highest accuracy of the different methods, percentage reductions in the performance statistics of  $R^2\Delta$  and *RMSE* $\Delta$  were calculated (Shiri *et al.* 2017) as Eqs. (2) and (3):

$$R^2\Delta = ((R^2_{ref}-R^2_z)/R^2_{ref}) * 100 \quad (1)$$

$$RMSE\Delta = ((RMSE_{ref}-RMSE_z)/RMSE_{ref}) * 100 \quad (2)$$

where  $R^2_{ref}$  and  $RMSE_{ref}$  are the reference performance statistics using all of the measuring points of the inter-row pair-plant values, and  $R^2_z$  and  $RMSE_z$  are the corresponding values for a reduction in the number of measuring points.

### 2.4. Estimations: soil mobilisation rates

The total soil mobilized in the study area can be estimated in  $Mg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$  using the point measurements obtained from the volume difference between the current soil surface level and the initial soil surface topography at the moment of the plantation. We have to delineate an imaginary polygon whose horizontal sides are defined as the distances between the measuring points used (10 cm each one). For example, if the inter-row distance is 190 cm, and it will mean the first and last of the 17 measuring points are 10 cm from the graft unions. The height of the polygon's side will be the distance between the graft union and the inter-row surface levels, taking into account the visible current passive biomark on the plant (Rodrigo-Comino *et al.* 2015). Finally, the soil mobilisation can be estimated from the erosion–deposition (*ER*) equation developed by (Paroissien *et al.* 2010):

$$ER = V * BD / (S * A) \quad (3)$$

where  $V$  ( $m^3$ ) represents the volume,  $S$  (measured in ha) means the total area for the considered field unit,  $A$  (years) is the age of the plants and  $BD$  is the soil bulk density (measured in  $g\ cm^{-3}$ ). The reference value of the soil bulk density was taken as the mean soil bulk density

of the different soil samples collected along the row and inter-row area.

### 3. Results obtained considering different crops, methods and factors

#### 3.1. Vineyards

In Table 1, we present the soil mobilisation rates obtained under different conditions in vineyards located in the Valencia region including 5 points along the transects. These values corresponded to the first approaches conducted to verify the use of extra measurements in the inter-row area (Fig. 2). The results confirmed for vineyards the negative impacts of tillage on the soil, the intensification of the erosion processes due to the differences of the age of plantation, the differences among slope positions and influence of the parent material (Martínez-Casasnovas and Ramos 2009; Mohammadkhan *et al.* 2011; Bogunović *et al.* 2014; Marques *et al.* 2020).

**Table 1:** Soil erosion in vineyards considering different factors and locations in the Valencia region using 5 points. Soil mobilisation with negative values represent soil loss and positive accumulation.

Types	Mg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Reference
Tilled plot	-2.5	Rodrigo-Comino and Cerdà (2018)
Colluvium (2 years old)	-4.35	Rodrigo-Comino <i>et al.</i> (2018a)
Marls (8 years old)	-8.87	
Tilled plot (shoulder)	-1.6	Rodrigo-Comino <i>et al.</i> (2018b)
Tilled plot (bakslope)	+2.8	
Tilled plot (shoulder)	+13.3	
Tilled plot (2 years old)	-8.16	Rodrigo-Comino, <i>et al.</i> (2017)
Tilled plot (25 years old)	-1.61	

#### 3.2. Other grafted plants and soil processes using ISUM

ISUM was also used to estimate other soil processes such as soil compaction, roughness and runoff in other grafted plants (Table 2). For example, considering the *Diospyros kaki* species, the uses of flood irrigation vs

tillage were compared, and the results showed 52.6 vs 31.9 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively. In persimmon plantations, Bayat *et al.* (2019) detected differences in soil mobilisation rates between inter-row and row areas, reaching up to more than 20 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>.

ISUM also allows measuring other soil parameters. Moradi *et al.* (2020) compared the use of bulk density rings and ISUM to assess differences in soil compaction and consolidation in 25-years old plantation. The results showed differences of 2 mm among methods, 12 (ring core sampling) and 14 mm yr<sup>-1</sup> (ISUM). Also, ISUM was useful to assess specific parameters related to the RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) such as L Factor and soil roughness to observe potential influences of holes and soil accumulation areas to reduce or accelerate soil mobilisation rates (da Silva *et al.* 2019; Rodrigo-Comino *et al.* 2020).

#### 3.3. ISUM combined with other methods to understand soil mobilisation

In Figure 3, we show how ISUM was used with success combined with other well-contrasted methods such as index of connectivity (Borselli *et al.* 2008), RUSLE (Renard *et al.* 1991) or Structure from Motion or SfM (Westoby *et al.* 2012). All of these methods allowed us to complete information about mobile parameters through maps (Fig. 3.1), new calculations to interpret our obtained results (Fig. 3.2) and accurate images to detect hotspots (Fig. 3.3).

### 4. Conclusions and further research

ISUM is an easy-to-apply, rapid and non-expensive tool to assess soil erosion processes, estimate soil mobilisation and generate visually friendly maps in areas cultivated with grafted plants such as vineyards, persimmons, citrus, etc. Our topographical *in situ* measurements along perpendicular transects between paired plants showed a procedure that can be used over the world and those data are comparable among research groups. In this communication, we demonstrated that this method allows being improved and completed with other techniques, which can add new information about soil erosion processes. These tasks are keys to increasing public awareness among policymakers, stakeholders, and even farmers involved. Further research can be developed using drones, testing organic farming plots or conducting measurements during different months to observe the variations among seasons, meteorological and phenological scenarios.

**Table 2:** Soil erosion in other orchards considering different factors and locations in the Valencia region. SM/Factor: soil management system or factor studied.

Crop	SM/Factor	Age	Results	Reference
Persimmon	Flood irrigation vs tillage	25	52.6 vs 31.9 Mg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Rodrigo-Comino <i>et al.</i> (2020)
Persimmon	Soil compaction	3	14 mm lowering	Moradi <i>et al.</i> (2020)
Citrus	Transect Length Index (TLI)	8/25	8.3 mm yr <sup>-1</sup>	Rodrigo-Comino <i>et al.</i> (2020)
Persimmon	Transect Length Index (TLI) and Soil roughness	18	69% of the total area slightly depressed and 95% random orientation	da Silva <i>et al.</i> (2019)
Persimmon	Inter-row vs row	25	58.9 vs 37.2 Mg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Bayat <i>et al.</i> (2019)



IMPROVED STOCK UNEARTHING METHOD (ISUM) ALLOW TO ASSESS SOIL EROSION PROCESSES IN GRAFTED PLANTS USING IN SITU TOPOGRAPHICAL MEASUREMENTS

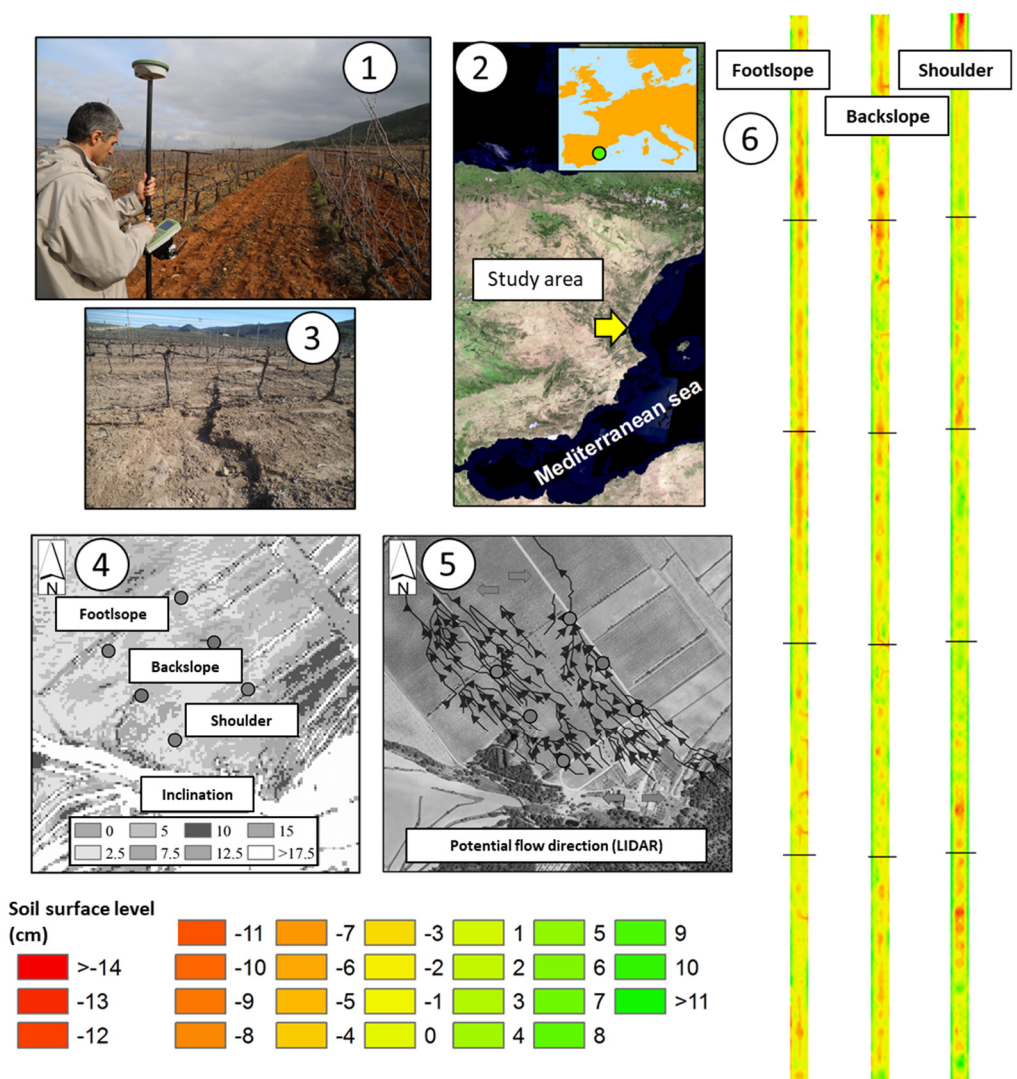


Figure 2: Example ISUM map considering different slope positions: 1) GPS sampling points; 2) Localisation; 3) Soil erosion process (rill); 4) Transects per slope position; 5) Potential flow direction map; 6) ISUM map.

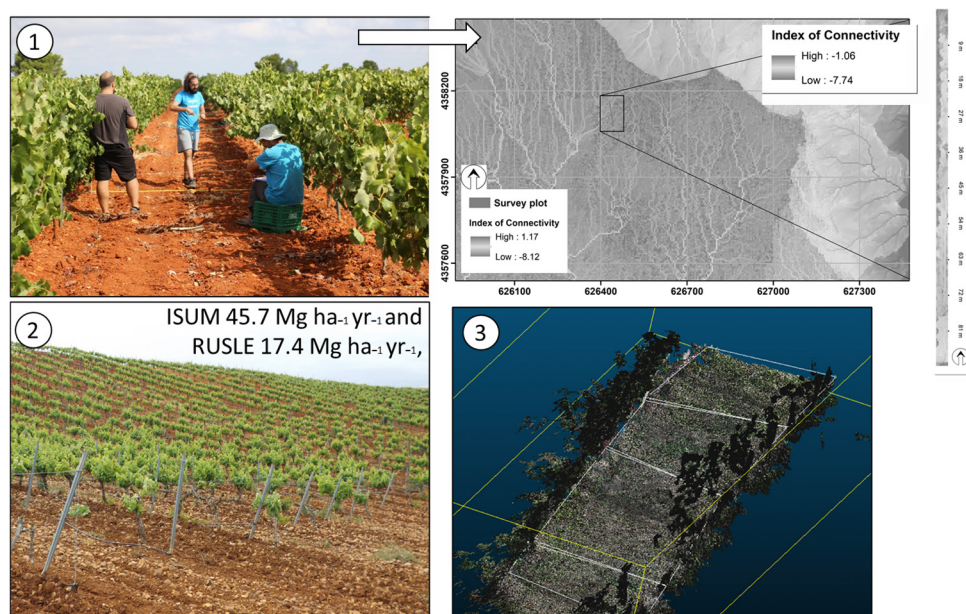


Figure 3: Examples of ISUM applications. 1) Vineyard located in Castilla la Mancha in Spain and Connectivity index map (Rodrigo-Comino *et al.* 2020); 2) Vineyard in Tierra de Barros, Extremadura and RUSLE+ISUM calculations (Barrena-González *et al.* 2020); 3) Image extracted from SfM techniques (Remke *et al.* 2018).



## References

- HATAB, A. A., CAVINATO, M. E. R., LINDEMÉR, A., and LAGERKVIST, C. J., 2019. Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities*, **94**, pp. 129–142. DOI: 10.1016/j.cities.2019.06.001.
- BAGHERZADEH, A., GHOLIZADEH, A., and KESHAVARZI, A., 2018. Assessment of soil fertility index for potato production using integrated Fuzzy and AHP approaches, Northeast of Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, **7**(3), pp. 203–212.
- BARRENA-GONZÁLEZ, J., RODRIGO-COMINO, J., GYASI-AGYEI, Y., PULIDO FERNÁNDEZ, M., and CERDÀ, A., 2020. Applying the RUSLE and ISUM in the Tierra de Barros Vineyards (Extremadura, Spain) to Estimate Soil Mobilisation Rates. *Land*, **9**(3), p. 93. DOI: 10.3390/land9030093.
- BAYAT, F., MONFARED, A. B., JAHANSOOZ, M. R., ESPARZA, E. T., KESHAVARZI, A., MORERA, A. G., and CERDA, A., 2019. Analyzing long-term soil erosion in a ridge-shaped persimmon plantation in eastern Spain by means of ISUM measurements. *CATENA*, **183**, p. 104176. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104176.
- BENIAICH, A., SILVA, M. L. N., GUIMARÃES, D. V., BISPO, D. F. A., AVANZI, J. C., CURI, N., and DONDEYNE, S., 2020. Assessment of soil erosion in olive orchards (*Olea europaea* L.) under cover crops management systems in the tropical region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **44**. DOI: 10.36783/18069657rbc20190088.
- BIDDOCCU, M., GUZMAN, G., CAPELLO, G., THIELKE, T., STRAUSS, P., WINTER, S., and GOMEZ, J. A., 2020. Evaluation of soil erosion risk and identification of soil cover and management factor (C) for RUSLE in European vineyards with different soil management. *International Soil and Water Conservation Research*, **8**(4), pp. 337–353. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.07.003.
- BIJANZADEH, E., and GHADIRI, H., 2006. Effect of separate and combined treatments of herbicides on weed control and corn (*Zea mays*) yield. *Weed Technology*, **20**(3), pp. 640–645.
- BOGUNOVIĆ, I., KISIĆ, I., and JURISIĆ, A., 2014. Soil Compaction under Different Tillage System on Stagnic Luvisols. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, **79**(1), pp. 57–63.
- BONGIORNO, G., BÜNEMANN, E. K., OGUEJIOFOR, C. U., MEIER, J., GORT, G., COMANS, R., and DE GOEDE, R., 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, **99**, pp. 38–50. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.12.008.
- BORSELLI, L., CASSI, P., and TORRI, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, **75**(3), pp. 268–277. DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- BRENOT, J., QUIQUEREZ, A., PETIT, C., GARCIA, J. P., and DAVY, P., 2006. Soil erosion rates in {Burgundian} vineyards. *Bolletino società geologica Italiana*.
- CASALÍ, J., GIMÉNEZ, R., DE SANTISTEBAN, L., ÁLVAREZ-MOZOS, J., MENA, J., and DE LERSUNDI, J. D. V., 2009. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *CATENA*, **78**(1), pp. 12–19. DOI: 10.1016/j.catena.2009.02.015.
- CERDÀ, A., RODRIGO-COMINO, J., YAKUPOĞLU, T., DINDAROĞLU, T., TEROL, E., MORA-NAVARRO, G., and DALIAKOPOULOS, I. N., 2020. Tillage Versus No-Tillage. Soil Properties and Hydrology in an Organic Persimmon Farm in Eastern Iberian Peninsula. *Water*, **12**(6), p. 1539. DOI: 10.3390/w12061539.
- DUAN, J., LIU, Y. J., YANG, J., TANG, C. J., AND SHI, Z. H., 2020. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China. *Journal of Hydrology*, **582**, p. 124290. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124290.
- GODFRAY, H. C. J., BEDDINGTON, J. R., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., and TOULMIN, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, **327**(5967), pp. 812–818. DOI: 10.1126/science.1185383.
- KEESSTRA, S., PEREIRA, P., NOVARA, A., BREVIK, E. C., AZORIN-MOLINA, C., PARRAS-ALCÁNTARA, L., and CERDÀ, A., 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment*, **551–552**, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.182.
- LÓPEZ-VICENTE, M., QUIJANO, L., GASPAS, L., PALAZÓN, L., and NAVAS, A., 2015. (2015. Severe soil erosion during a 3-day exceptional rainfall event: combining modelling and field data for a fallow cereal field. *Hydrological Processes*, **29**(10), pp. 2358–2372. DOI: 10.1002/hyp.10370.
- MARQUES, M. J., RUIZ-COLMENERO, M., BIENES, R., GARCÍA-DÍAZ, A., and SASTRE, B., 2020. Effects of a Permanent Soil Cover on Water Dynamics and Wine Characteristics in a Steep Vineyard in the Central Spain. *Air, Soil and Water Research*, **13**. DOI: 10.1177/1178622120948069.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A., and CONCEPCION RAMOS, M., 2009. Soil alteration due to erosion, ploughing and levelling of vineyards in north east Spain. *Soil Use and Management*, **25**(2), pp. 183–192.

- MOHAMMADKHAN, S., AHMADI, H., and JAFARI, M., 2011. Relationship between soil erosion, slope, parent material, and distance to road (Case study: Latian Watershed, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, **4**(1–2), pp. 331–338. DOI: 10.1007/s12517-010-0197-z.
- MORADI, E., RODRIGO-COMINO, J., TEROL, E., MORA-NAVARRO, G., MARCO DA SILVA, A., N DALIAKOPOULOS, I., and CERDÀ, A., 2020. Quantifying Soil Compaction in Persimmon Orchards Using ISUM (Improved Stock Unearthing Method) and Core Sampling Methods. *Agriculture*, **10**(7), p. 266. DOI: 10.3390/agriculture10070266.
- NIU, Y. H., LI, X., WANG, H. X., LIU, Y. J., SHI, Z. H., and WANG, L., 2020. Soil erosion-related transport of neonicotinoids in new citrus orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **290**. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106776.
- PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., VAN DER ZANDEN, E. H., POESEN, J., and ALEWELL, C., 2015. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, **51**, pp. 23–34. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.03.012.
- PAROISSIEN, J.-B., LAGACHERIE, P., and LE BISSONNAIS, Y., 2010. A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing–burying measurements. *Catena*, **82**(3), pp. 159–168. DOI: 10.1016/j.catena.2010.06.002.
- REMKE, A., RODRIGO-COMINO, J., GYASI-AGYEI, Y., CERDÀ, A., and RIES, J. B., 2018. Combining the Stock Unearthing Method and Structure-from-Motion Photogrammetry for a Gapless Estimation of Soil Mobilisation in Vineyards. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7**(12), p. 461. DOI: 10.3390/ijgi7120461.
- RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., and PORTER, J. P., 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **46**, pp. 30–33.
- RODRIGO-COMINO, J., BRINGS, C., LASSU, T., ISERLOH, T., SENCIALES, J. M., MARTÍNEZ MURILLO, J. F., and RIES, J. B., 2015. Rainfall and human activity impacts on soil losses and rill erosion in vineyards (Ruwer Valley, Germany). *Solid Earth*, **6**, pp. 823–837. DOI: 10.5194/se-6-823-2015.
- RODRIGO-COMINO, J., QUIQUEREZ, A., FOLLAIN, S., RACLOT, D., LE BISSONNAIS, Y., CASALÍ, J., and RIES, J. B., 2016. Soil erosion in sloping vineyards assessed by using botanical indicators and sediment collectors in the Ruwer-Mosel valley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **233**, pp. 158–170. DOI: 10.1016/j.agee.2016.09.009.
- RODRIGO-COMINO, J., NOVARA, A., GYASI-AGYEI, Y., TEROL, E., and CERDÀ, A., 2018a. Effects of parent material on soil erosion within Mediterranean new vineyard plantations. *Engineering Geology*, **246**, pp. 255–261. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.006.
- RODRIGO-COMINO, J., 2018. Five decades of soil erosion research in “terroir”. The State-of-the-Art. *Earth-Science Reviews*, **179**, pp. 436–447. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.02.014.
- RODRIGO-COMINO, J., KESHAVARZI, A., ZERAATPISHEH, M., GYASI-AGYEI, Y., and CERDÀ, A., 2019. Determining the best ISUM (Improved stock unearthing Method) sampling point number to model long-term soil transport and micro-topographical changes in vineyards. *Computers and Electronics in Agriculture*, **159**, pp. 147–156. DOI: 10.1016/j.compag.2019.03.007.
- RODRIGO-COMINO, J., DA SILVA, A. M., MORADI, E., TEROL, E., and CERDÀ, A., 2020. Improved Stock Unearthing Method (ISUM) as a tool to determine the value of alternative topographic factors in estimating inter-row soil mobilisation in citrus orchardssion in orchards. *Spanish Journal of Soil Science*, **10**(1). DOI: 10.3232/SJSS.2020.V10.N1.05.
- RODRIGO-COMINO, J., LUCAS-BORJA, M. E., BERTALAN, L., and CERDÀ, A., 2020. Integrating in situ measurements of an index of connectivity to assess soil erosion processes in vineyards. *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2020.1711914.
- RODRIGO-COMINO, J., PONSODA-CARRERES, M., SALESA, D., TEROL, E., GYASI-AGYEI, Y., and CERDÀ, A., 2020. Soil erosion processes in subtropical plantations (*Diospyros kaki*) managed under flood irrigation in Eastern Spain. *Singapore Journal of Tropical Geography*, **41**(1), pp. 120–135. DOI: 10.1111/sjtg.12307.
- RODRIGO-COMINO, J., BREVIK, E., and CERDÀ, A., 2017. The age of vines as a controlling factor of soil erosion processes in Mediterranean vineyards. *Science of The Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.204.
- RODRIGO-COMINO, J., and CERDÀ, A., 2018. Improving stock unearthing method to measure soil erosion rates in vineyards. *Ecological Indicators*, **85**(Supplement C), pp. 509–517. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.10.042.
- RODRIGO-COMINO, J., KEESSTRA, S. D., and CERDÀ, A., 2018b. Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, **43**(10), pp. 2193–2206. DOI: 10.1002/esp.4385.
- SCHNABEL, S., 1994. Using botanical evidence for the determination of erosion rates in semi-arid tropical areas. *Advances in GeoEcology*, **27**, pp. 31–45.
- SHIRI, J., KESHAVARZI, A., KISI, O., ITURRARAN-VIVEROS, U., BAGHERZADEH, A., MOUSAVI, R., and KARIMI, S., 2017. Modeling Soil Cation Exchange Capacity Using Soil Parameters: Assessing the Heuristic Models. *Computers and Electronics in Agriculture*, **135**, pp. 242–251. DOI: 10.1016/j.compag.2017.02.016.

- DA SILVA, A. M., MORADI, E., RODRIGO-COMINO, J., and CERDÀ, A., 2019. Spatial variability of soil roughness in persimmon plantations: A new combined ISUM (improved stock unearthing method) approach. *Ecological Indicators*, **106**. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105528.
- TELAK, L. J., and BOGUNOVIC, I., 2020. Tillage-induced impacts on the soil properties, soil water erosion, and loss of nutrients in the vineyard (Central Croatia). *Journal of Central European Agriculture*, **21**(3), pp. 589–601. DOI: 10.5513/JCEA01/21.3.2810.
- VANWALLEGHEM, T., LAGUNA, A., GIRÁLDEZ, J. V., and JIMÉNEZ-HORNERO, F. J., 2010. Applying a simple methodology to assess historical soil erosion in olive orchards. *Geomorphology*, **114**(3), pp. 294–302. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.07.010.
- WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., and REYNOLDS, J. M., 2012. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, **179**, pp. 300–314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.



## OPERATIONAL SAFETY AND OPERATOR MANAGEMENT TO ENABLE THE USE OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (UAS) AS GEOMATICS TOOLS

### SEGURIDAD OPERACIONAL Y GESTIÓN DEL OPERADOR PARA HABILITAR EL USO DE SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS) COMO HERRAMIENTAS GEOMÁTICAS

Norberto Vera\*, Israel Quintanilla, Jordi Vidal, Beatriz Fernández

Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [norvevle@doctor.upv.es](mailto:norvevle@doctor.upv.es); [iquinta@cgf.upv.es](mailto:iquinta@cgf.upv.es); [jorviul@fiv.upv.es](mailto:jorviul@fiv.upv.es); [beaferga@topo.upv.es](mailto:beaferga@topo.upv.es)

#### Abstract:

Potential civil applications of Unmanned Aircraft Systems (UAS), commonly known as drones, have risen steeply during the last decade, mainly due to their versatility and capability of spatial data gathering. Nonetheless, real use of UAS is quite restricted nowadays, primarily due to safety and regulatory constraints. This multidisciplinary project aims to perform specific safety assessments using the SORA methodology adopted by the European Aviation Safety Agency (EASA) and develop documentation and procedures for operators to follow, complying with all required safety and regulatory requirements. As a result, DEURPAS-UPV is the first Spanish drone operator belonging to a university to be authorized by Spanish civil aviation agency (AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea), to perform drone flights in urban areas, in controlled airspace and during the night. In addition, DEURPAS-UPV has performed the first authorized experimental transport operations using drones in Spain. The results from safety assessment and designed procedures have been successfully applied to the operation of Safety and Emergency service providers, such as Valencia Local Police Corps and the Valencian Emergency and Safety Response Agency (AVSRE - Agencia Valenciana de Seguridad y Respuesta a las Emergencias). Overall, this project has served as an enabler for more complex and safer UAS operations, from the operator's point of view, which will help break the barriers related to the use of these aircraft, with huge potential in geomatics applications.

**Key words:** UAS, drone, Geomatics, SORA, Operational safety, Emergency

#### Resumen:

Las aplicaciones civiles de los sistemas aéreos no tripulados (UAS), comúnmente conocidos como drones, han aumentado considerablemente durante la última década, principalmente debido a su versatilidad y capacidad de recopilación de datos espaciales. Sin embargo, el uso real de los UAS está bastante restringido hoy en día, principalmente debido a las restricciones de seguridad y legislativas. Este proyecto multidisciplinar tiene como objetivo realizar evaluaciones de seguridad específicas utilizando la metodología SORA adoptada por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y desarrollar documentación y procedimientos para que los operadores los sigan, cumpliendo con todos los requisitos de seguridad y normativos exigidos. Como resultado, DEURPAS-UPV es el primer operador español de drones perteneciente a una universidad que ha sido autorizado por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), para realizar vuelos con drones en zonas urbanas, en espacio aéreo controlado y durante la noche. Además, DEURPAS-UPV ha realizado las primeras operaciones experimentales de transporte con drones autorizadas en España. Los resultados de la evaluación de seguridad y los procedimientos diseñados se han aplicado con éxito a la operación de proveedores de servicios de Seguridad y Emergencias, como el Cuerpo de Policía Local de Valencia y la Agencia Valenciana de Seguridad y Respuesta a las Emergencias (AVSRE). En general, este proyecto ha servido para facilitar operaciones con UAS más complejas y seguras, desde el punto de vista del operador, lo que ayudará a romper las barreras relacionadas con el uso de estas aeronaves, con un enorme potencial en aplicaciones geomáticas.

**Palabras clave:** UAS, dron, Geomática, SORA, Seguridad operacional, Emergencia

## 1. Introduction

In the last few years, the civil use of Unmanned Aircraft Systems (UAS), commonly named drones, has increased considerably thanks to its great potential and versatility. The ability of UAS to carry a wide assortment of sensing equipment and reach hard to access areas has prompted their adoption in varied professional fields, such as public

safety (Cerreta *et al.* 2020), environment monitoring (Gonçalves *et al.* 2020) or construction safety (Rodrigues and Bastos 2019).

Among the various sciences in which UAS are currently being integrated, it is important to highlight the role of Geomatics. This transversal science brings together a multitude of disciplines such as photogrammetry, geomorphology, precision agriculture, mapping, or

\* Corresponding Author: [Norberto Vera, norvevle@doctor.upv.es](mailto:norvevle@doctor.upv.es)

heritage conservation, among others, which use geospatial data as main input. Colomina and Molina (2014) review UAS applications focused on photogrammetry and remote sensing, where UAS allow to increase the accuracy of work and simplify the data collection process, even replacing traditional instruments in some cases.

However, UAS operation comes not without risk. In case of malfunction or mishap, UAS are capable of producing severe injuries to hit people, or even fatalities. Duma *et al.* (2021) studied the possible harm caused by drone blades. In addition, the airspace is already populated with another aircraft, which have very specific and demanding requirements related to their design, production, and operation. Research has been performed regarding the integration of UAS in a non-segregated airspace, considering separation procedures and mid-air collision (MAC) risk (Clothier *et al.* 2015; Guan *et al.* 2020).

Spencer's (2018) review highlighted that a catastrophic accident caused by UAS would pose as a great threat to the drone industry, according to operator's point of view. Because of these safety concerns, as well as the public perception that is linked to them, drone regulations around the globe, which were nonexistent until the civil use of UAS flourished, have been very strict.

UAS operations are generally only permitted in a given set of scenarios and specific permissions are generally needed, until the safety of more complex operations can be guaranteed. According to Rango and Liberte (2010), strict regulations limit the range and type of operations to be performed, as well as increasing the workload of operators due to the authorization and registry procedures that must be followed.

During the last years, many authors have proposed risk assessment models to address the risk posed by UAS operations. Luxhøj (2015) proposed the use of ASRM (Aviation System Risk Model) to address the MAC chance, as well as the probability of conflict with other aircraft. Fang *et al.* (2018) proposed an UAS architecture to enable safer operations beyond line of sight of the pilot. Hammer *et al.* (2017) presents a failure tree model to assess UAS risk.

All these methodologies have a common point: they are heavily focused on the aircraft, not giving much importance to the operational environment. Looking for a more holistic approach, JARUS proposed the SORA (Specific Operations Risk Assessment) methodology, which is operation centric. SORA allows the assessment of an operation's risk based on its ConOps (the description of the operations parameter's) rather than focusing on the actual aircraft model used. As output, a given set of mitigation measures that would reduce risk to an acceptable level is identified. SORA has been accepted as a standard methodology to assess UAS operations risk, adopted by the European Union. However, its use is not straightforward. Research papers have been publishing regarding the application of SORA to a given ConOps (Capitan *et al.* 2019), while others focus on how to actually achieve compliance with mitigation measures identified by SORA (Cain *et al.* 2021). Given that SORA is still in development, others efforts are made to improve it, such as Denney *et al.* (2018) who propose a more quantitative approach to

SORA process, which is for the moment based on a qualitative approach.

The objective of this paper is to break the regulatory barrier that limits the use of UAS in R&D operations, specially in the field of geomatics. For that purpose, the risk of operations of interest will be assessed using a standardized model. Using the risk assessment result as an input, an operator procedural and documentary model, compliant with applicable regulation, will be developed, in order to obtain the required authorizations to perform desired operations. After obtaining the authorization, the model has been applied to real life operators, and flights have been performed in scenarios that would otherwise not be possible.

The structure of this paper goes as follows: in section 2 we explain the UAS regulatory frame, and in section 3 we describe the operator model developed to comply with these regulations. Section 4 details the implementation of the model in real remote operators. In section 5 we discuss the results we obtained, and section 6 contains a brief conclusion and highlights future work lines.

## 2. UAS regulatory frame

In this section we will briefly explain the evolution of the regulatory frame for UAS in Spain, including the currently in force European regulation, focusing on the requirements for operators and the allowed flight conditions.

### 2.1. Ley 18/2014

UAS regulation in Spain was nonexistent until 'Ley 18/2014', which, among a set of measures to improve economic competitiveness, included a single article detailing the approved conditions for UAS operations, which would be in force until a UAS specific regulation was published.

The set conditions were quite restrictive, only allowing operations to be performed in very low risk scenarios, such as rural areas in uncontrolled airspace. Flight was limited to Visual Line of Sight (VLOS) conditions, with the exception of aircraft lighter than 2 kg operating under NOTAM (a public notice to other airspace users). In addition, this law required operators to perform safety assessments and to have an Operating Manual (OM), even if the operation's risk was low.

### 2.2. Real Decreto 1036/2017

The first Spanish specific regulation for UAS was published by the end of 2017, under the name of 'Real Decreto 1036/2017'.

The basic aspects from previous regulation are largely kept (limited operational conditions and requirements for the operators) for entities operating under an operational declaration. In addition, a new set of operational scenarios is allowed under an authorization from Spanish Civil Aviation Agency, AESA, after checking a set of documents provided by the operator. These scenarios included night flight, urban operations and flight in controlled airspace, widening the UAS use possibilities. In addition, operations Beyond Visual Line of Sight of the pilot (BVLOS) for aircraft heavier than 2 kg were possible under an authorization, given they were performed in segregated airspace or the aircraft equipped approved

Detect & Avoid means. Transport operations were not allowed under normal circumstances. In addition, general exceptions are considered for police operators, and minor exceptions exist for operations performed during public emergency, allowing a less restricted use in case of need.

The methodology proposed by JARUS for assessing UAS risk operations, SORA, was adopted as the Acceptable Means of Compliance (AMC) to perform safety assessments when applying for an authorization. Operations performed in controlled airspace required the coordination of the safety assessment with the designated Air Transit Service Provider (ATSP).

However, the authorization procedure was very strict, designed in accordance to manned aviation safety culture. As a result, the number of authorized operators was low. According to AESA publication of declared operators and authorizations, by the end of 2019 only about 0.5% of declared operators had been granted an authorization.

### 2.3. EU UAS regulation

During the last few years, the European Aviation Safety Agency, EASA, has been actively working on the development of a common regulatory frame for all Member States (MS), which entered into force on December 31, 2020.

This regulatory frame is defined as operation-centric and risk-based, and clearly differences operational limitations and requirements for operators based upon the risk of the operations, which are classified as Open, Specific or Certified, according to increasing level of risk.

Under this regulatory frame, operator requirements are directly proportional to the operation category. In Open, operators do not need operational declarations nor authorizations to operate, and no OM is required, but operations are limited to VLOS conditions under a set of three subcategories, allowing a restricted use in urban scenarios.

The scope of Specific category is much wider, where lower-risk, standardized operations can be performed under an operational declaration, and more complex operations are subject of an authorization from the competent authority. Examples of operations performed under an authorization include key expected commercial operations, such as BVLOS delivery over urban areas. All operators performing flights in Specific category are required to have an OM, which will be checked by the competent authority upon authorization application, along with an operational risk assessment performed using SORA methodology.

Current regulation focused on Open and Specific categories. Detailed regulation regarding Certified category is expected to be published during the following years. Certified category roughly corresponds to high-risk operations such as transport of people, overflight of assemblies of people (except for very small aircraft) or transport of dangerous goods.

## 3. Development of UAS operator model

In this research, we have developed a UAS operator model compliant to the requirements of regulations RD1036 and the recent EU regulation.

However, the process we followed is not a straightforward interpretation of the regulations. Instead, we took the safety approach, and we leveraged the early adoption of SORA methodology by AESA as cornerstone, using the output from SORA to establish the foundations of the operator structure.

### 3.1. Use of SORA methodology

SORA, standing for Specific Operations Risk Assessment, is a methodology developed by JARUS to evaluate the risk of operations, using a ConOps (the operating scenario) as input. The SORA process identifies ground and air scenarios based on standardized categories with an assigned intrinsic risk level, named GRC (Ground Risk Class) and ARC (Air Risk Class) respectively. Optional mitigation measures can be considered to reduce GRC (e.g., the use of a parachute) and/or ARC (e.g., operating in time frames when air traffic is lower). Then, tactical mitigations to address the residual risk are accounted for, whose nature depends on the operation being performed in VLOS or BVLOS conditions. A SAIL (Specific Assurance & Integrity Levels) value is obtained from the combination of final GRC and ARC levels. The SAIL value is an identifier of the overall risk level of the operation, being I-II considered as low risk, III-IV medium risk and V-VI high risk. Directly linked to the SAIL value, a set of threat mitigation measures, named OSOs (Operational Safety Objectives) is identified. Depending to the level of robustness (low-medium-high) required for each of the 24 OSOs (increasing with SAIL), a set of requirements must be fulfilled. In addition, considerations regarding adjacent air and ground areas are taken into account, addressing the possibility of a containment failure (i.e., the aircraft flying outside of the approved operational volume).

Demonstrating compliance with higher-than-two SAIL values requires fulfilment of medium to high robustness measures, which are related to very demanding aeronautical standards, generically out of the generic UAS operator's reach. Terkildsen and Jensen (2019) assessed compliance of several DJI (the main civil UAS manufacturer worldwide) models, none of them complying with SAIL II requirements without the need to perform additional activities. Thus, a set of ConOps limited to SAIL II value was designed, in order to cover most of the intended operations.

Scenarios intrinsically linked to SAIL II, without the application of reductions to GRC and/or ARC, are very limited (e.g., rural areas and uncontrolled airspace). Thus, to achieve a low SAIL value with a greater set of scenarios, we took the following approach: first we identified applications of interest, both in geomatics and other fields of interest, then we assessed ground and air scenarios for these applications and finally we considered the required mitigations that would lower GRC and/or ARC so the final SAIL result is II in these scenarios.

Applications of interest are: photogrammetry, precision agriculture, mapping, heritage, inspections, cadastre, civil engineering, multimedia productions, police operations, firefighting, search and rescue, and medical emergencies. While operations related to agriculture, firefighting or search and rescue are mostly expected to be performed in rural areas, the rest are expected to be performed equally in both urban or rural areas. Regarding the air scenario, both uncontrolled or controlled airspace

can be found, not depending on the nature of the application but in the specific geographic area it is being performed.

To cover all these scenarios, we considered the riskier option, urban scenario in controlled airspace, and then assessed the required mitigations that would lower GRC and/or ARC so the final SAIL result is II. If demonstration of compliance with the combination of these mitigations is feasible with reasonable means, which worked for VLOS operations, then the ConOps is closed. However, scenarios such as BVLOS operations over urban areas inside controlled airspace, are linked to a high intrinsic risk and the demonstration of compliance with measures to reduce risk to SAIL II level is similar in complexity to achieving compliance with higher-than-two SAIL, which had already been deemed unfeasible for the time being. In these cases, instead of applying reduction of GRC and/or ARC, the base scenario was modified via the deployment of ground-controlled areas and/or segregated airspace, so that no people on the ground or other air traffics are allowed, respectively. This way, risk reduction is achieved via completely removing the threat, at the cost of increased operation planning complexity.

As reference material to perform the safety assessments, we used the AMC developed by AESA, named Apéndice S. Following the established procedure meant a separate authorization process was needed for each scenario, which implied a heavy workload for operators, ATSPs and also AESA.

Thus, a different approach to apply SORA methodology was proposed: instead of considering a single and specific ConOps, we would consider all the possible permutations of a closed set of scenarios. This is feasible because all these scenarios have a common point: an output of SAIL II and the same linked OSO robustness requirements. This way, a safety assessment considering VLOS operations, either in rural or urban areas, in controlled or uncontrolled airspace and during the day or night was developed. The assessment was expanded in comparison to a traditional SORA assessment, via the clear definition of the mitigation measures to be applied in any of seven permutations of the ConOps, having a common SAIL and OSO output. Note that the eighth possible option, the combination of rural areas and uncontrolled airspace, during the day, was ignored as those operations would not require an authorization process via SORA assessment.

Thus, the OSOs requirements for SAIL II were identified as the foundations for the operator documentation pack that defines the operator management model. Of the 24 OSOs identified by SORA, 14 require a low level of robustness, 4 a medium level of robustness (all related to operational procedures) and the rest are optional.

### 3.2. Operator documentation pack

Real Decreto 1036/2017 states that operators need to provide a given set of documents when applying for an authorization. AESA developed a set of AMC and Guidance Material (GM) regarding the reference contents for each of these documents.

We assessed the 18 OSOs to decide in which of these documents should the requirements materialize, either

using the same structure provided by AMC/GM or expanding it as necessary.

In order to properly manage the remote operator activities, it was decided that its structure should be divided in three sections: operations acts as the main one, focused on flight planning and execution, while maintenance section is responsible for all aircraft and other equipment to be in adequate conditions. Finally, training section shall monitor remote pilots (and other relevant crew) qualification, ensuring their competence is fit for any operation to be performed. Each section uses a main document as reference, auxiliary documents and a registry, and a responsible person is assigned to assure relevant tasks are performed, as seen in Table 1. In case of small remote operators, responsible functions can be shared by the same person, although it is not recommended.

**Table 1:** Organizational scheme of a UAS operator.

<i>Division</i>	<i>Responsible</i>	<i>Main Document</i>	<i>Registry</i>
Operations	Operations Manager	Operations Manual	Operations Registry
Maintenance	Maintenance chief	Maintenance Program	Maintenance Registry
Training	Training chief	Training Program	Training Registry

### 3.3. Adoption of the EU model

The EU regulatory frame establishes different requirements for operators depending on the operations' category. As Open does not impose any relevant requirements to operators and Certified is still in development, we have focused on adapting to Specific category, where most commercial applications are expected.

Both Specific category and previous Spanish regulation consider a mix of declaration/authorization for operations, following similar procedures. In addition, SORA is adopted by both regulations, the reason why SORA was used as the cornerstone of the model. This way, adaptation can be performed with minimum effort.

However, EU regulatory frame does not require operators to have the documentation pack that we developed, only referencing an OM. Thus, we decided to fuse all the previous documents into a single OM, whose contents were arranged in Parts A, B, C and D (General, Aircraft, ConOps and Training) in a very similar fashion to how traditional manned aviation OM are structured.

## 4. Implementation of the operator model

In parallel to the development of the model, it was gradually implemented in real remote operators, both our operator, DEURPAS-UPV, and public safety and emergency operators, who were considered as priority users.

### 4.1. DEURPAS-UPV

In order to validate the developed model, a first authorization was applied for, with a relatively simple ConOps: night flights for R&D purposes. After a few



rounds of polishing based on AESA feedback regarding aspects to be corrected, an authorization was issued in November 2019, thus validating the first iteration of the model.

A second authorization application is performed shortly after, using the updated model with the multiple-ConOps SORA assessment, which had been previously coordinated and agreed upon with relevant ATSPs (ENAIRES, SAERCO and FerroNATS). After remediation of minor discrepancies, the authorization was granted by the end of March 2020, fully validating the proposed model.

Under the scope of these authorizations, our operator was capable to perform a wider variety of R&D operations. However, some operations considered priority, such as medical delivery, were still not possible because of regulatory constraints. For that reason, another authorization process was started, this time focusing on applying for exemptions regarding experimental transport flights. Note that the difference between R&D operations and experimental flights is subtle: the objective of the former is to capture a set of data (e.g., geospatial information) and perform R&D activities based on that dataset, while the latter aim to test the way the flights are performed to develop new kinds of operations. This way, safety assessments for BVLOS delivery operations in urban areas were performed, considering controlled ground areas and segregated airspace, and an authorization was applied for. In November 2020, we performed the first experimental flights of this kind in Spain. More information regarding this particular set of flights is detailed in Quintanilla *et al.* (2021).

By May 2021, thanks to the granted authorizations, DEURPAS-UPV has performed over 70 operations in complex scenarios. A small relevant set of these operations is detailed in Table 2.

**Table 2:** List of flights performed with their corresponding ConOps.

Flight date (dd/mm/yyyy)	ConOps	Aircraft
05/10/2020	Night – Controlled Airspace – Urban – Street lighting inspection	DJI Mavic 2 Enterprise
16/11/2020	Controlled Airspace – Urban – Transport	DJI Matrice 300 RTK
28/03/2021	Controlled Airspace – Photogrammetry	DJI Mavic 2 Enterprise
26/04/2021	Controlled Airspace – Urban – Heritage Inspection	DJI Mavic 2 Enterprise

As a graphical example of these flights, Figure 1 corresponds to an aerial image of the tower of Santa Catalina’s Church, in Valencia. The objective of this flight was to assess the level of luminic impact of the new public lighting.

In April 2021, operations were performed over Santo Domingo Convent, to assess deterioration of windows and roof tiles, as well as the location of a dove flock that had nested inside the dome, endangering art pieces inside the facility (Fig. 2).



**Figure 1:** Public light inspection at Santa Catalina's Church, Valencia



**Figure 2:** Detail view of the dome of the Santo Domingo Convent, Valencia for heritage inspection.

#### 4.2. Safety and emergency operators

In parallel to the validation of the operator model, it was distributed to public safety and emergency entities, such as the Valencian Agency for Safety and Emergency Response (AVSRE) and the local Police Corps of Valencia, and the nearby settlements of Algemesí, Almussafes, Bétera, Cullera, Nules, Picassent, Vall d’Uxò and Xàtiva.

Although Police Corps are exempt from any authorization, and AVSRE used an exemption when operating in public emergency situations, their operations must indeed be performed in safety conditions, considering the appropriate safety mitigation measures. This way, the operator model acts as an underlying way to guarantee the safety of these operations.

### 5. Discussion

The conservative approach followed by approved regulations, based on aeronautical standards has been an obstacle for the development of UAS operations. However, this has also had a positive effect in safety with

no major UAS incidents reported in Spain during these years.

Evolution of regulations shall also be matched with related AMC & GM, to ensure operators are able to comply with requirements, and to show such compliance to competent authorities. In the particular case of Spanish regulation, AMC & GM related to the use of SORA to perform safety assessment were not published until 9 months after the respective regulation, which hindered the authorization processes during that elapsed time. This has been somewhat balanced because, as early adopters of SORA, Spanish operators are already used to this methodology and thus better prepared to adapt to the new European regulatory frame.

According to AESA periodic publication of authorized operators, by the end of February 2020, only two remote operators belonging to Spanish Universities had been granted an authorization: DEURPAS-UPV, as mentioned before, and CACTI-remote sensing from Vigo university. As public research entities, only FADA (Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial) and Instituto Tecnológico de Canarias are listed.

This gives a perspective point regarding how important it is to develop the operator structure and capabilities, as well as the R&D techniques that will make use of UAS flights.

SORA methodology is currently in development, applying a primarily qualitative model for the moment. Future versions with a quantitative approach are expected soon, enhancing the methodology's representativeness. A critical step of the performed research was the coordination of safety assessments with ATSPs, which also apply very restrictive criteria. As SORA is still in development, with some changing parameters and others

left to open interpretation, achieving agreement with ATSPs has been a difficult task in the process.

Another aspect to consider is the relatively low risk value of the addressed ConOps, limited to SAIL II values. Additional research work is being done regarding compliance with higher requirements, specially in regard to the aircraft design and manufacturing processes. EASA has recently developed a design verification process, during which operators and manufacturers can demonstrate compliance with SAIL III-IV levels.

## 6. Conclusion

In this paper, an operator management and documentary model, based on the output of SORA assessment has been detailed and proven valid, enabling the realization of complex operations.

The adoption of these models by R&D entities will stimulate a more widespread, less limited, use of UAS, which will speed up the development of their possible applications.

Work in this field will keep on, continuously adapting to everchanging regulations and the development of new standards and technologies. A special field of interest for the future is the concept of U-Space or UTM, which focuses on the traffic management of unmanned aircraft systems and are expected to enable large numbers of simultaneous operations.

## Acknowledgements

This work was supported by the Generalitat Valenciana under Grant DECRETO 63/2020 and Universitat Politècnica de València under Grant PAID-01-1.

## References

- CAIN, S., TORENS, C., JUCHMANN, P., VOLKERT, A., TOMASELLO, F., NATALE, M., and DUCCI, M., 2021. Standards for UAS – acceptable means of compliance for low risk sora operations. In *AIAA Scitech 2021 Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA*, p. 1177. DOI: 10.2514/6.2021-1177
- CAPITAN, C., CAPITAN, J., CASTANO, A. R., and OLLERO, A., 2019. Risk assessment based on SORA methodology for a UAS media production application. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019 (pp. 451–459)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798211
- CERRETA, J. S., BURGESS, S. S., and COLEMAN, J., 2020. UAS for public safety operations: A comparison of UAS point clouds to terrestrial LIDAR point cloud data using a FARO scanner. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, **7**(1). DOI: 10.15394/IJAAA.2020.1432
- CLOTHIER, R. A., WILLIAMS, B. P., and FULTON, N. L., 2015. Structuring the safety case for unmanned aircraft system operations in non-segregated airspace. *Safety Science*, **79**, pp. 213–228. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.007
- COLOMINA, I., and MOLINA P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **92**, pp. 79-97, ISSN 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
- DENNEY, E., PAI, G., and JOHNSON, M., 2018. Towards a rigorous basis for specific operations risk assessment of UAS. In *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings (Vol. 2018-September)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/DASC.2018.8569475
- DUMA, L.A., BEGONIA, M.T., MILLER, B., and DUMA, S.M., 2021. Proposed Injury Threshold for Drone Blade Lacerations. *Ann Biomed Eng.*, **49**, pp. 1125–1127. DOI: 10.1007/s10439-021-02759-2
- FANG, S. X., O'YOUNG, S., and ROLLAND, L., 2018. Development of small UAS beyond-visual-line-of-sight (BVLOS) flight operations: System requirements and procedures. *Drones*, **2**(2), pp. 1–17. DOI: 10.3390/drones2020013
- GONÇALVES, G., ANDRIOLO, U., PINTO, L., and BESSA, F., 2020. Mapping marine litter using UAS on a beach-dune system: a multidisciplinary approach. *Science of the Total Environment*, **706**. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135742

- GUAN, X., LYU, R., SHI, H., and CHEN, J., 2020. A survey of safety separation management and collision avoidance approaches of civil UAS operating in integration national airspace system. *Chinese Journal of Aeronautics*. DOI: 10.1016/j.cja.2020.05.009
- HAMMER, J., MURRAY, A. R., and LOWMAN, A., 2017. Safety analysis paradigm for UAS: Development and use of a common architecture and fault tree model. *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings (Vol. 2017-September)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/DASC.2017.8102039
- LUXHØJ, J.T., 2015. A Socio-technical Model for Analyzing Safety Risk of Unmanned Aircraft Systems (UAS): An Application to Precision Agriculture. *Procedia Manufacturing*, **3**, pp. 928–935. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.140
- QUINTANILLA, I., VERA, N., ALCARAZ, P., VIDAL, J., and FERNANDEZ, B., 2021. A Quickly Deployed and UAS-Based Logistics Network for Delivery of Critical Medical Goods during Healthcare System Stress Periods: A Real Use Case in Valencia (Spain). *Drones*, **5**(1), p. 13. DOI: 10.3390/drones5010013
- RANGO, A., LALIBERTE, A. S., 2010. Impact of flight regulations on effective use of unmanned aircraft systems for natural resources applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, **4**(1), p. 043539. DOI: 10.1117/1.3474649
- RODRIGUES, R., and BASTOS, D., 2019. Integrating resilience engineering and UAS technology into construction safety planning and control. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **26**(11), pp. 2705–2722. DOI: 10.1108/ECAM-12-2018-0541
- SPENCER, D., 2018. Exploring Impediments to the Proliferation of Commercial Unmanned Aerial System Use in the National Airspace System of the United States. *Muma Business Review*, **2**, pp. 105–121. DOI: 10.28945/4145
- TERKILDSEN, K. H., and JENSEN, K., 2019. Towards a tool for assessing UAS compliance with the JARUS SORA guidelines. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019*, pp. 460–466. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798236

## AUMENTO DE RESOLUCIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS PROCEDENTES DE UAVS MEDIANTE ALGORITMOS DE PANSHARPENING

### UAV THERMAL IMAGING RESOLUTION ENHANCEMENT BY PANSHARPENING ALGORITHMS

Javier Raimundo\*, Juan F. Prieto, Serafín López-Cuervo

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. [ajraimundo@alumnos.upm.es](mailto:ajraimundo@alumnos.upm.es); [juanfprieto@upm.es](mailto:juanfprieto@upm.es); [s.lopezc@upm.es](mailto:s.lopezc@upm.es)

#### Abstract:

Thermal sensors mounted on Unmanned Aerial Vehicles (UAV) provide images with much lower resolution than other sensors typically mounted simultaneously (visual spectrum sensors). This situation causes an inhomogeneity in the information derived from these datasets. Due to physical limitations in thermal sensor's construction, it can reasonably be assumed that the resolution of thermal sensors will not equal that of other sensors (visible and near-infrared spectrum range) in the short and medium term. Since the 1970s a variety of algorithms have been developed in remote sensing to improve the resolution of low-resolution sensors with information from images with higher resolution. These algorithms, originally designed for satellite platforms, are called pansharpening. Previous researches have been made to translate these technics to thermal imaging. The extent of these previous researches was to analyze only one of the many different pansharpening algorithms. In our work, we have studied over ten algorithms from the two main pansharpening families to determine their possibilities, performance, and results when used in thermal imaging, focused on UAV thermal infrared acquisition. Our methodology simulates a lower resolution thermal image, that once combined with visual spectrum images and processed, can be compared with the original resolution infrared thermal image to establish the quality of the fusion product. This methodology has been applied to a UAV thermal-visual spectrum image acquisition campaign over an industrial building near Toledo (Spain), and the quality of the final products has been quantitatively analyzed. Prior research on thermal imaging pansharpening did not monitor performance in measurable and comparable numerical parameters. Their findings were based merely on visual observation and it was impossible to ensure the quality in further processes and analyses using these enhanced images. In our work, we have calculated quality indices of the enhanced thermal images, determining quality values such as those of the BDSD pansharpening algorithm: RMSE = 7.400, ERGAS = 1.084, SAM = 0.048, PSNR = 31.014, UQI = 0.995. In conclusion, we have validated the potential of pansharpening algorithms to enhance the resolution of thermal images with the help of higher-resolution visible spectrum RGB images.

**Key words:** thermal imaging, resolution enhancement, pansharpening, super-resolution

#### Resumen:

Los sensores térmicos montados sobre vehículos aéreos pilotados remotamente proveen imágenes con mucha menos resolución que otros sensores montados usualmente a la vez (sensores en el espectro visible). Esta situación provoca una disparidad en la información derivada de estos conjuntos de datos. Debido a limitaciones físicas en la construcción de sensores térmicos, es razonable asumir que la resolución de los sensores térmicos no igualará a la de otros sensores (espectro visible e infrarrojo cercano) en el corto y medio término. Desde los años 1970, variedad de algoritmos han sido desarrollados en Teledetección para mejorar la resolución de sensores de baja resolución con información de imágenes de mayor resolución. Estos algoritmos, originalmente diseñados para plataformas satélite, son llamados pansharpening. Se han realizado investigaciones previas con el objetivo de trasladar estas técnicas a imágenes térmicas. La extensión de estos estudios previos fue analizar sólo uno de los diferentes algoritmos de pansharpening existentes. En nuestro trabajo se han estudiado más de diez algoritmos de las dos principales familias de algoritmos de pansharpening para determinar sus posibilidades, funcionamiento y resultados cuando se aplican a imágenes térmicas, enfocados a aquellas obtenidas desde un dron. Nuestra metodología simula una imagen térmica de menor resolución, que una vez combinada con imágenes de espectro visible, y procesadas, pueden ser comparadas con aquellas imágenes térmicas en la resolución original, para establecer la calidad de la fusión. Esta metodología se ha aplicado en una campaña de adquisición de imágenes térmicas y de espectro visible sobre un edificio industrial cerca de Toledo (España). La calidad de los productos finales se ha calculado cuantitativamente. Investigaciones anteriores no analizaban el desempeño en parámetros numéricos medibles y comparables. Sus resultados sólo eran analizados visualmente y era imposible asegurar la calidad en procesos y análisis siguientes usando estas imágenes mejoradas. Aquí, hemos calculado índices de calidad de las imágenes térmicas mejoradas, llegando a determinar valores de calidad como los correspondientes al algoritmo de pansharpening BDSD: RMSE = 7.400, ERGAS = 1.084, SAM = 0.048, PSNR = 31.014, UQI = 0.995. En conclusión, hemos validado el potencial de los algoritmos de pansharpening para mejorar la resolución de imágenes térmicas con la ayuda de imágenes de espectro visible de mayor resolución.

**Palabras clave:** imagen térmica, aumento de resolución, pansharpening, superresolución

\* Corresponding Author: Javier Raimundo, [ajraimundo@alumnos.upm.es](mailto:ajraimundo@alumnos.upm.es)



## 1. Introducción

Las cámaras térmicas, con sensores sensibles a la parte infrarroja de onda larga del espectro electromagnético (longitudes de onda desde 9 hasta 14 micrómetros), se están convirtiendo en herramientas de uso común. Pero, a diferencia de otro tipo de sensores, como las cámaras de espectro visible, la resolución de los sensores térmicos apenas ha aumentado en los últimos años. Los sensores más avanzados difícilmente sobrepasan la frontera del megapíxel. Las cámaras termográficas más empleadas están basadas en sensores no refrigerados que funcionan a temperatura ambiente denominados microbolómetros. Estos microbolómetros reciben la radiación, absorbiéndola y calentándose, variando así su resistencia eléctrica. Limitaciones técnicas en la fabricación de los microbolómetros hacen difícil su miniaturización: la relación señal/ruido es inversamente proporcional a su tamaño. Por lo que se puede afirmar que la resolución de los sensores térmicos, al menos con esta tecnología, no igualará a la de otros sensores en el corto y medio plazo.

Los distintos fabricantes de cámaras térmicas han seguido distintas estrategias con objetivo de mejorar la resolución de sus imágenes térmicas. El fabricante FLIR, con su tecnología Ultramax®, combina varias tomas ligeramente diferentes por los inevitables movimientos y vibraciones durante la captura. Este fabricante asegura doblar la resolución con esta técnica. Otro fabricante, Infratec, ha diseñado una solución tipo *hardware* donde una rueda giratoria a alta velocidad toma cuatro imágenes, fusionándolas en la imagen final.

Otras técnicas orientadas a la mejora de la resolución de imágenes térmicas utilizan herramientas de aprendizaje profundo (*Deep Learning*), donde se proporciona la imagen térmica y la correspondiente a una cámara "tradicional" de espectro visible. Pasando a través de la arquitectura de red neuronal diseñada, obtiene como producto final la imagen térmica con superresolución. Estas técnicas necesitan un entrenamiento previo con un gran conjunto de imágenes, por lo que puede no ser adecuado para todas las situaciones.

Ningún trabajo hasta la fecha ha analizado un amplio conjunto de algoritmos de pansharpening aplicados a imágenes térmicas, con el objetivo de determinar sus posibilidades. Hay que aclarar que todos los algoritmos de pansharpening existentes han sido diseñados, en origen, para imágenes de satélite. Así mismo, tampoco aparece en la literatura científica, ningún análisis cuantitativo de la calidad de los resultados de pansharpening sobre imágenes térmicas. Este trabajo ha realizado este estudio, orientado a su empleo con imágenes térmicas procedentes de plataformas UAV, aunque es extrapolable a otras situaciones.

El objetivo de este trabajo es determinar el desempeño de un gran número de algoritmos de pansharpening en la mejora de resolución de imágenes térmicas al fusionarlas con imágenes de espectro visible. Para ello, hemos diseñado una metodología para poder conocer la calidad de los productos de estos algoritmos, mediante índices de calidad.

## 2. Métodos y Materiales

Las imágenes multispectrales son aquellas compuestas por distintas bandas que representan partes diferentes del espectro electromagnético. Las bandas típicas de estas imágenes corresponden a colores dentro del espectro visible (rojo, verde y azul), junto a otras bandas como aquellas procedentes del infrarrojo cercano (NIR), el infrarrojo de onda corta (SWIR) o partes del espectro ultravioleta.

En resumen, podemos definir una imagen multispectral como un conjunto de imágenes (normalmente entre 3 y 15) correspondientes a la misma toma con diferentes partes del espectro electromagnético.

Las imágenes térmicas normalmente son expresadas con distintas mascaradas de color, definiendo así una imagen en falso color (Fig. 1a). Esto ayuda a un correcto análisis y hace más fácil al usuario la interpretación de la información aportada por la imagen térmica. La carta de color más común expresa temperaturas menores con colores fríos (azules y violetas) y temperaturas más altas con colores cálidos (amarillos, naranjas y rojos). Aunque esto es una representación artificial de los valores brutos de la imagen térmica, nos ayudará a componer nuestra imagen pseudo-multispectral (PS-MS).

La imagen pseudo-multispectral (PS-MS) es aquella compuesta por las tres bandas RGB de la imagen térmica en falso color (Fig. 1a) junto a la imagen correspondiente a los valores térmicos brutos en escala de grises (Fig. 1b).

Para comprobar el desempeño de los distintos algoritmos, hemos simulado una imagen pseudo-multispectral en baja resolución (PS-MS\_LR). Aplicando un algoritmo piramidal gaussiano con ratio 4 y  $\sigma = 4/3$ , logamos esta imagen pseudo-multispectral en baja resolución. En ella se aplicaron los algoritmos de pansharpening para la mejora de su resolución y así analizamos su calidad cuantitativamente con índices de calidad.

Otro de los elementos comunes a todos los algoritmos de pansharpening, corresponde a la necesaria imagen pancromática (PAN). Esta imagen debe proceder de un sensor de mayor resolución. Usualmente, las cámaras térmicas, junto al sensor térmico, montan un sensor de espectro visible RGB, que ayuda al correcto encuadre de la escena, pues las imágenes térmicas en ocasiones no presentan contraste. Este sensor de espectro visible tiene mucha mayor resolución por lo que nos aportó la imagen pancromática PAN necesaria, expresando la imagen RGB en escala de grises.

Entonces pudimos aplicar todos los algoritmos de pansharpening a estudio sobre la imagen PS-MS\_LR, que al fusionarse con la imagen PAN, nos dio como resultado la imagen pseudo-multispectral mejorada (PS-MS\_HR\*). Esta imagen producto está compuesta, como la inicial, por tres bandas RGB correspondientes al falso color y una cuarta banda en escala de grises. Para posteriores análisis de calidad, se separó este producto final en dos imágenes a su vez: la correspondiente en falso color y la térmica "bruta" en escala de grises.

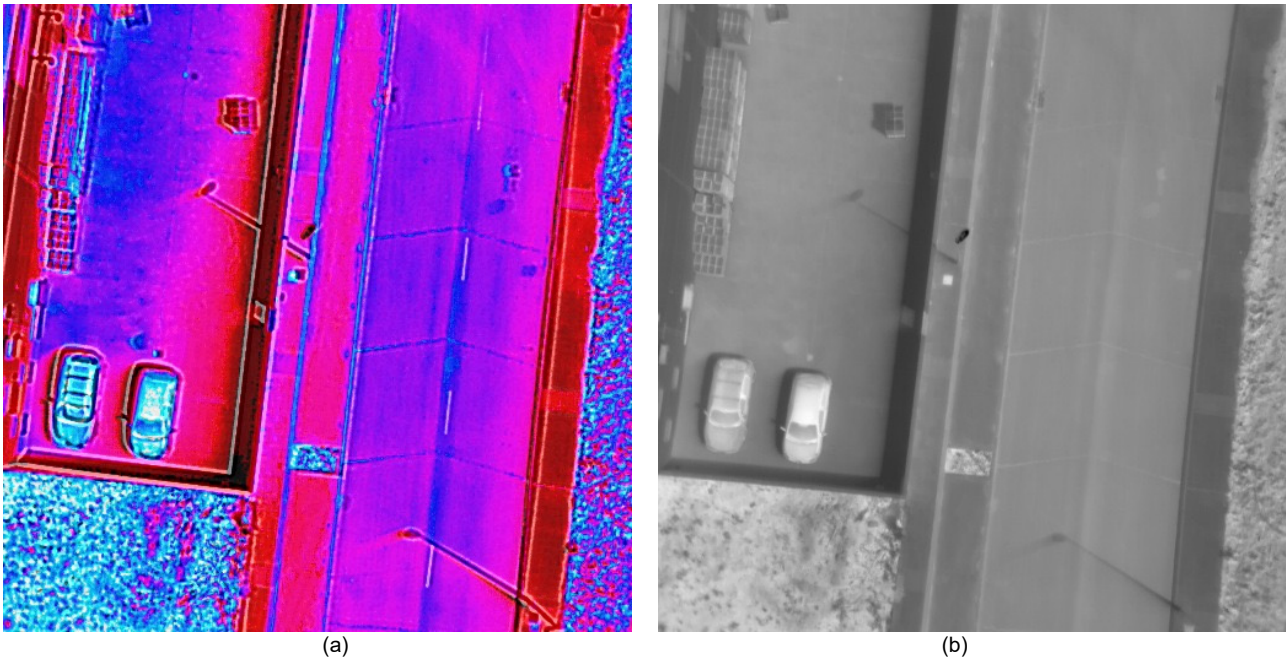


Figura 1: Imagen térmica a resolución original: a) en falso color; b) en escala de grises

## 2.1. Algoritmos de pansharpening

Los algoritmos de pansharpening pertenecen, dentro del campo de la teledetección, a la rama de fusión de imágenes. Su objetivo es mejorar imágenes de baja resolución usando imágenes procedentes de otros sensores de mayor resolución. Hay que aclarar que ambas imágenes deben mostrar el mismo objeto con el mismo campo de visión.

Existen dos familias de algoritmos de pansharpening bien definidas en la literatura científica. Se diferencian principalmente por su aproximación al problema: espacial o espectral.

Los algoritmos de SUSTITUCION DE COMPONENTES (CS) se basan en la transformación del espacio de color de la imagen multispectral, desasociando la información espacial y la espectral. La información espacial es posteriormente sustituida por aquella procedente de la imagen de mayor resolución. Aplicando la transformación del espacio de color a la inversa, obtenemos la imagen multispectral con resolución mejorada. Los algoritmos de sustitución de componentes son globales, pues actúan de manera uniforme por toda la extensión de la imagen (Chang and Bai 2018).

Por otro lado, los métodos de Análisis Multirresolución (MRA) usan filtros lineales invariantes en el espacio para extraer los detalles espaciales de la imagen de alta resolución y añadirselos a la imagen multispectral (Chen 2012).

En este trabajo se han analizado los siguientes algoritmos de pansharpening aplicados a imágenes térmicas:

- IHS: Fusión rápida de imágenes por tono, saturación e intensidad (Tu *et al.* 2001) (Fig. 2).
- PCA: Análisis de Componentes Principales (Chavez *et al.* 1991) (Fig. 3).

- BDSD: Detalles espaciales dependientes de banda con estimación de parámetros locales (Garzelli *et al.* 2008) (Fig. 4).
- GS: Transformación Gram Schmidt (modo 1) (Laben and Brower 2000).
- PRACS: Reemplazo parcial adaptativo con sustitución de componentes (Choi *et al.* 2011).
- HPF: Filtrado de paso alto 5 x 5 con fusión 1:4 (Chavez *et al.* 1991).
- SFIM: Filtro de suavizado basado en modulación de intensidad (Liu 2000).
- INDUSION: Transformación de ondícula decimada usando modelo de inyección aditiva (Khan *et al.* 2008).
- MTF-GLP: Función de transferencia de modulación con piramidal laplaciana generalizada y modelo de inyección unitario (Aiazzi *et al.* 2002).
- MTF-GLP-HPM: Similar a MTF-GLP, con modelo de inyección multiplicativa (Aiazzi *et al.* 2006).
- MTF-GLP-HPM-PP: Similar a MTF-GLP-HPM, con post proceso (Aiazzi *et al.* 2006).
- MTF-GLP-ECB: Similar a MTF-GLP, con algoritmo de modelo de mejora basado en contexto (Aiazzi *et al.* 2006).

Los algoritmos IHS, PCA, GS, BDSD y PRACS pertenecen a la categoría de algoritmos de pansharpening por sustitución de componentes (CS), mientras que HPF, SFIM, INDUSION y las diferentes versiones de MTF son del grupo de análisis multirresolución (MRA). Todos estos algoritmos han sido computados usando la librería MATLAB distribuida por Vivone *et al.* (2019).



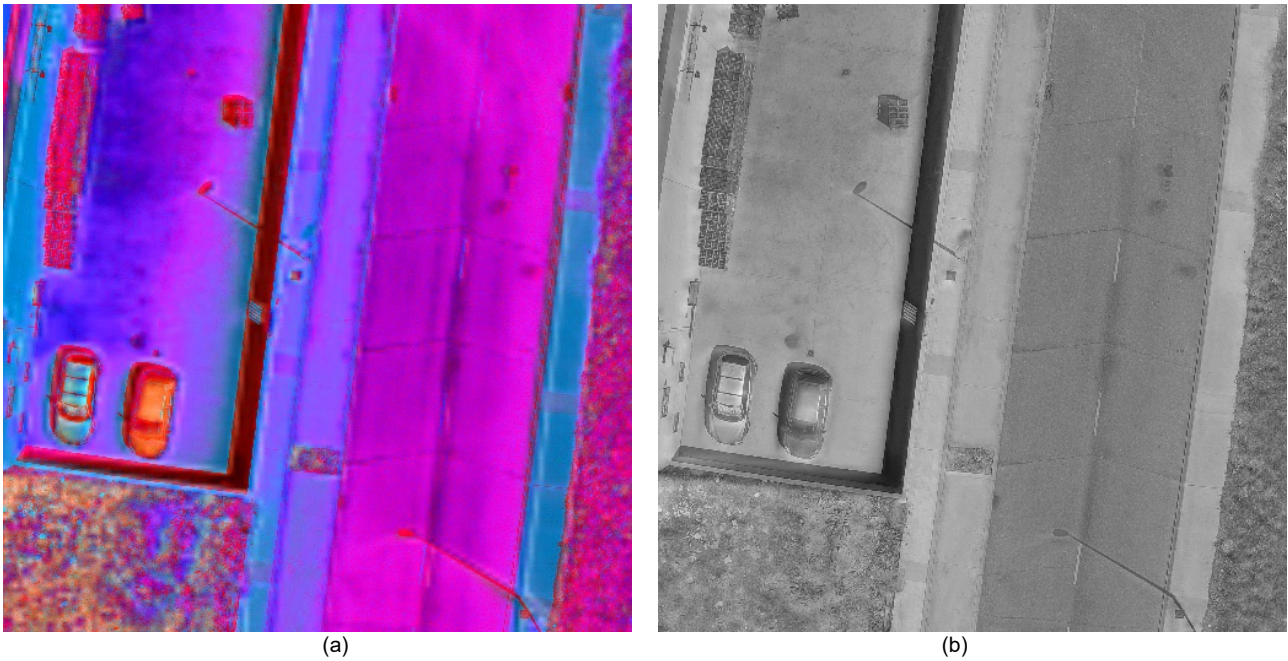


Figura 2: Imagen térmica de resolución mejorada por algoritmo PCA: a) en falso color; b) en escala de grises

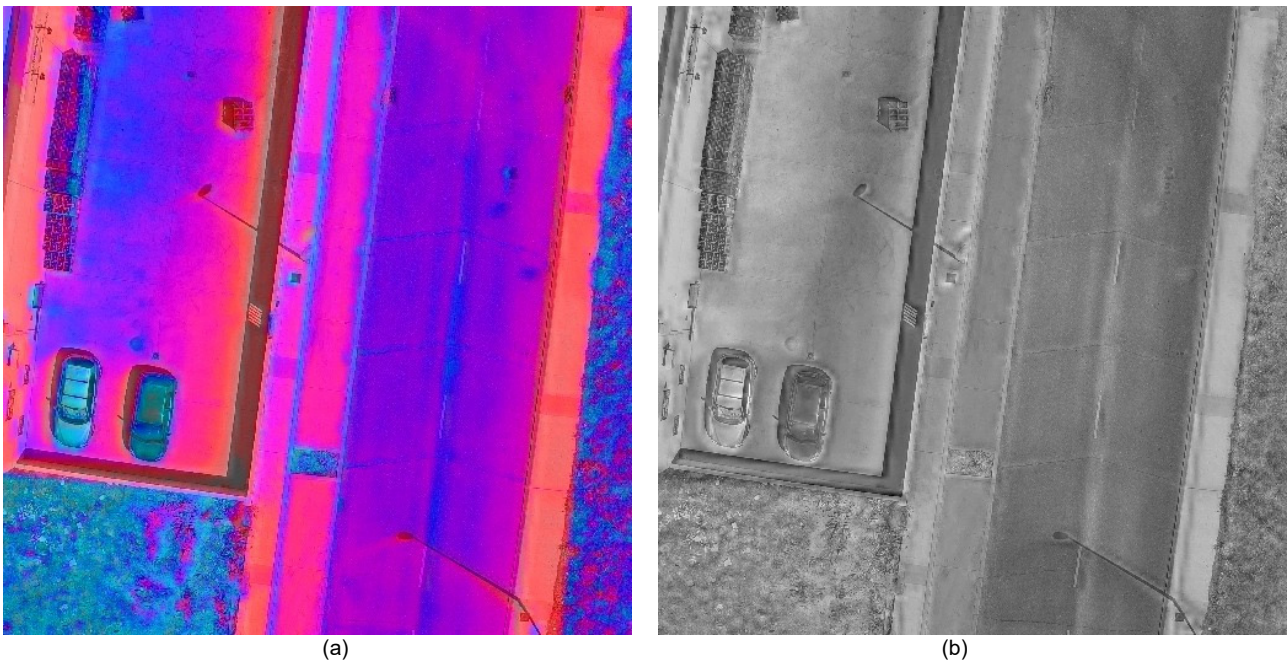


Figura 3: Imagen térmica de resolución mejorada por algoritmo IHS: a) en falso color; b) en escala de grises

Una vez establecido la extensión de nuestro estudio, definimos las características que los productos finales para medirlas en la valoración cuantitativa.

## 2.2. Protocolo de Wald

Antes de su uso posterior, las imágenes resultantes de la mejora de resolución de las imágenes térmicas por estos algoritmos de pansharpening deben ser evaluadas mediante índices de calidad cuantitativos. Una evaluación visual es del todo insuficiente para comprobar su idoneidad.

Entre la comunidad investigadora está aceptado el denominado protocolo de Wald (Wald *et al.* 1997) como el que establece las propiedades esenciales que deben

presentar los productos de fusión de imágenes siempre que sea posible. Este protocolo se define en tres teoremas:

- Teorema 1. Consistencia: Toda imagen fusionada, una vez degradada a su resolución original, debe ser lo más idéntica posible a la imagen original.
- Teorema 2. Síntesis: Toda imagen fusionada con otra de mayor resolución debe ser lo más idéntica posible a la imagen ideal que correspondería al sensor correspondiente, si existiera, a la imagen de alta resolución
- Teorema 3. El vector de imágenes multiespectrales fusionadas con una de mayor resolución debe ser lo

más idéntica posible al vector de imágenes multiespectrales ideal que correspondería al sensor, si existiera, con la resolución espacial de la imagen de alta resolución.

Como gracias a la metodología diseñada dispusimos de la imagen con la resolución original se cumple con los teoremas 2 y 3 del protocolo de Wald.

La calidad de las imágenes resultado de los algoritmos de pansharpening debe ser medida. Una inspección visual se hace necesaria pero no suficiente. Varios índices de calidad de fusión de imágenes han sido propuestos para asegurar la calidad de esta fusión.

### 2.3. Índices de Calidad

Los índices de calidad de fusión de imágenes miden la distorsión espacial y espectral basados en distintos estadísticos con variaciones entre ellos. Mientras unos se focalizan en la reconstrucción espacial otros son diseñados para evaluar la variación espectral.

En este estudio se han seleccionado y calculado los siguientes índices:

- RMSE (Root Mean Squared Error): Raíz del error medio cuadrático entre las dos imágenes. Expresa ambas distorsiones (espacial y espectral). Su valor óptimo es cero.
- ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse): Propuesto por Ranchin and Wald (2000), es un estadístico global que expresa la calidad de la imagen final. Mide la transición entre la información espacial y espectral. Su valor óptimo es 0.
- SAM: Ángulo de mapa espectral. Mide la distorsión espectral por el ángulo formado por los dos vectores del espectro de ambas imágenes. Su valor óptimo es 0.

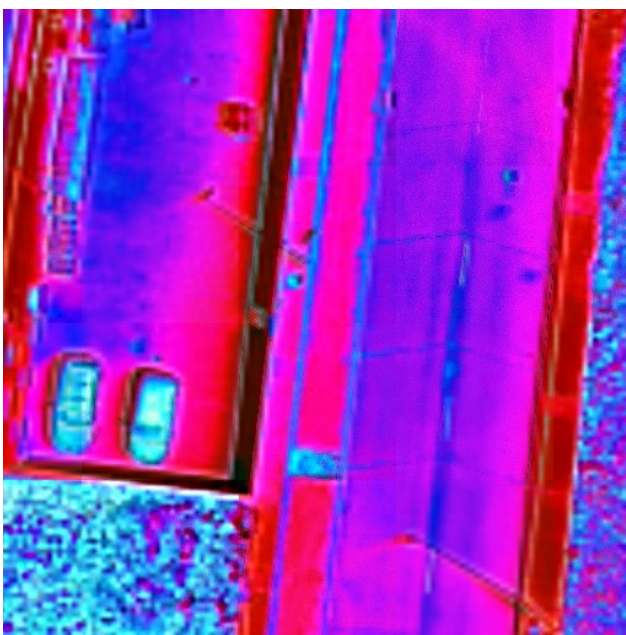
- PSNR: Proporción máxima de señal a ruido. Describe la reconstrucción espacial de las imágenes finales. Si las dos imágenes fueran idénticas, la PSNR tendería a infinito.
- UQI: Índice de calidad universal, propuesto por Wang and Bovik (2002), estima la distorsión combinando tres factores: pérdida de correlación, distorsión de la luminancia y distorsión del contraste. Los valores de UQI se mueven dentro del intervalo  $[-1,1]$  siendo 1 el valor óptimo.

Todos estos índices se calcularon de las imágenes procesadas de manera diferenciada. La imagen pseudo-multiespectral mejorada (PS-MS\_HR\*) se separó en dos: la imagen con las tres bandas de falso color y la última banda en escala de grises, que se compararon con sus originales correspondientes. Esto nos permitió distinguir la calidad de la transformación de modo independiente de la máscara de falso color elegida.

### 2.4. Datos

Para testar el resultado de los algoritmos de pansharpening aplicados a imágenes térmicas, se tomó un conjunto de imágenes con las características necesarias. Estas imágenes proceden de una misión tomada por un vehículo aéreo pilotado remotamente (UAV) sobre un edificio industrial localizado en la localidad de Illescas (Toledo – España) el día 13 de agosto de 2019.

El vehículo aéreo estaba equipado con dos sensores. Un sensor de espectro visible RGB 4K CMOS con una resolución de imagen de 3840 x 2160 píxeles, junto a un sensor infrarrojo térmico radiométrico por microbolómetro VOx, cuyas imágenes tienen 640 x 512 píxeles.



(a)



(b)

Figura 4: Imagen térmica de resolución mejorada por algoritmo BDSD: a) en falso color; b) en escala de grises.



Como la plataforma aérea equipaba ambos sensores con lentes y resoluciones diferentes, es necesario un trabajo previo de alineación. El alineamiento de imágenes consiste en transformar una imagen de forma que entidades de ambas imágenes queden perfectamente alineadas en el mismo campo de visión. Para ello, identificando entidades comunes en ambas imágenes, se calculan los parámetros de la transformación afín que transformará la imagen visual, por su mayor resolución, en el mismo campo que la imagen térmica.

El alineamiento no afectó al desempeño de los algoritmos de pansharpening pues así, ambas imágenes (térmica y visible) representaban el mismo objeto.

### 3. Resultados

Como se ha indicado en el apartado de metodología, las imágenes térmicas procedentes del vuelo UAV se han procesado siguiendo los pasos necesarios para obtener la imagen pseudo multiespectral en la resolución original (PS-MS\_HR) y la imagen pseudo multiespectral en baja resolución (PS-MS\_LR). Por otro lado, la imagen de la cámara de espectro visible RGB, después del alineamiento necesario, se expresó en escala de grises dando lugar a la imagen pancromática (PAN).

Aplicando todos los algoritmos de pansharpening seleccionados a la imagen en baja resolución (PS-MS\_LR) junto a la imagen pancromática (PAN), el producto final se denomina imagen pseudo-multiespectral mejorada (PS-MS\_HR\*) correspondiente a cada uno de ellos.

Los índices de calidad se han calculado, como se ha comentado, de forma diferenciada: por un lado, la imagen en falso color y por otro la imagen térmica en escala de grises. Los índices se han calculado sobre la imagen en resolución original (PS-MS\_HR) y la imagen de resolución mejorada (PS-MS\_HR\*). En las Tablas 1 y 2 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los distintos algoritmos.

### 4. Discusión

Una vez analizados los resultados obtenidos, podemos afirmar:

- Los resultados respecto a las imágenes en falso color y la correspondiente en escala de grises son cuantitativamente diferentes. Las imágenes térmicas en escala de grises se comportan mucho mejor que aquellas en falso color, como se muestra en las Tablas 1 y 2. El índice RMSE de las imágenes en escala de gris es similar o incluso más bajo que en otros trabajos de investigación consultados (Mandanici *et al.* 2019). Por ello, las imágenes en escala de grises deben ser las utilizadas en procesos posteriores, incluso en el caso de aplicar la misma u otra máscara de falso color.
- Salvo algunos valores específicos, las dos familias de algoritmos de pansharpening obtienen valores similares en los índices de calidad. Diferencias menores en la manera en que los distintos algoritmos procesan los datos producen mejores resultados. En la familia de algoritmos de sustitución de componentes, el algoritmo BDSO obtiene mejores resultados que el resto.

**Tabla 1:** Índices de calidad (valores medios) de imágenes mejoradas en falso color.

Algoritmo	RMSE	ERGAS	SAM	PSNR	UQI
PCA	66.084	40.524	0.323	11.883	0.854
IHS	46.524	27.716	0.224	14.798	0.891
BDSO	26.167	17.235	0.125	19.789	0.925
GS	88.872	29.372	0.438	9.241	0.798
PRACS	42.932	17.977	0.207	15.537	0.919
HPF	38.962	23.463	0.187	16.350	0.947
SFIM	44.139	29.593	0.212	15.284	0.951
INDUSION	40.867	24.698	0.197	15.951	0.917
MTF-GLP	39.435	23.585	0.190	16.243	0.945
MTF-GLP-HPM	44.432	29.617	0.214	15.222	0.951
MTF-GLP-HPM_PP	42.047	39.971	0.202	15.675	0.950
MTF-GLP-ECB	43.876	33.677	0.211	15.314	0.931
MTF-GLP-CBD	30.612	18.023	0.147	18.503	0.959

**Tabla 2:** Índices de calidad (valores medios) de imágenes mejoradas "brutas", en escala de gris

Algoritmo	RMSE	ERGAS	SAM	PSNR	UQI
PCA	31.774	5.209	0.208	18.353	0.954
IHS	39.167	5.837	0.250	16.322	0.940
BDSO	7.400	1.084	0.048	31.014	0.995
GS	32.743	4.974	0.211	17.915	0.954
PRACS	25.352	2.885	0.159	20.934	0.972
HPF	15.108	2.274	0.096	24.693	0.994
SFIM	16.610	2.436	0.106	23.847	0.994
INDUSION	16.848	2.565	0.106	23.754	0.991
MTF-GLP	15.441	2.315	0.098	24.496	0.993
MTF-GLP-HPM	16.892	2.471	0.107	23.693	0.994
MTF-GLP-HPM_PP	17.210	2.540	0.109	23.519	0.993
MTF-GLP-ECB	26.334	3.640	0.168	19.917	0.982
MTF-GLP-CBD	8.567	1.283	0.054	30.125	0.997

- Desde el punto de vista radiométrico, no hay una opción claramente óptima respecto a las otras. Los índices ERGAS y SAM tienen valores similares entre los distintos métodos, aunque los algoritmos MRA funcionan algo mejor. Esto concuerda con el comportamiento general descrito en la literatura (Aiazzi *et al.* 2009).
- La reconstrucción espacial es mejor en los algoritmos de análisis multiresolución. El índice PSNR es mayor, informando de una mayor calidad geométrica de los detalles espaciales. De nuevo, el algoritmo BDSF es el mejor en términos de reconstrucción espacial.
- Nuestro trabajo permite el uso de sensores térmicos con menor resolución a la de otros usados simultáneamente en el mismo proyecto, debido a que estos algoritmos mejoran y homogeneizan la resolución. Una limitación es que es dependiente de la razón de resolución entre los distintos sensores. Una razón entre las resoluciones mayor a 4 puede provocar artefactos inesperados y el fallo de los procesos (Dumitrescu and Boiangiu 2019)
- Aunque los resultados pueden ser dependientes de la máscara de falso color elegida para expresar la información térmica en la imagen pseudo-multiespectral, la validación de los algoritmos de pansharpening en las imágenes térmicas aquí demostrada subraya el interés en futuros desarrollos e investigaciones para ajustar los parámetros de los algoritmos para adaptarlos específicamente a las imágenes térmicas.

## 5. Conclusiones

El uso de ciertos algoritmos de pansharpening aplicados a imágenes térmicas había sido estudiado en investigaciones anteriores. Nuestro trabajo contiene una completa revisión de un amplio número de algoritmos, y provee de un estudio en profundidad de su funcionamiento y un análisis cuantitativo, no realizado hasta la fecha.

Nos hemos enfocado en imágenes procedentes de plataformas aéreas UAV como aplicación principal, pues su uso es cada vez más común en la inspección de instalaciones y edificios, por su versatilidad.

La disponibilidad de una estimación precisa de la calidad de los productos de algoritmos de pansharpening sobre imágenes térmicas hará en el futuro más fácil el desarrollo de sistemas de teledetección robustos y fiables.

## Agradecimientos

Queremos agradecer a Vivone *et al.* (2015) por hacer disponibles para la comunidad investigadora las herramientas MATLAB de algoritmos de pansharpening, y a los componentes del grupo de investigación Geovisualización, Espacios Singulares y Patrimonio (GESyP) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) por su trabajo y apoyo.

El primer autor, Javier Raimundo, quiere agradecer al Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) por su apoyo.

## References

- AIAZZI, B., ALPARONE, L., BARONTI, S., and GARZELLI, A., 2002. Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, **40**(10), pp. 2300-2312. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803623
- AIAZZI, B., ALPARONE, L., BARONTI, S., GARZELLI, A., and SELVA, M., 2006. MTF-tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**(5), pp. 591-596. DOI: 10.14358/PERS.72.5.591
- AIAZZI, B., BARONTI, S., LOTTI, F., and SELVA, M., 2009. A comparison between global and context-adaptive pansharpening of multispectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **6**(2), pp. 302-306. DOI: 10.1109/LGRS.2008.2012003
- CHANG, N. B., and BAI, K., 2018. Multisensor data fusion and machine learning for environmental remote sensing. *CRC Press*. DOI: 10.1201/9781315154602
- CHAVEZ, P., SIDES, S. C., and ANDERSON, J. A., 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data- Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, **57**(3), pp. 295-303. DOI: 10.1306/44b4c288-170a-11d7-8645000102c1865d
- CHEN, C. H., 2012. Land Cover Estimation with Satellite Image Using Neural Network. In *Signal and Image Processing for Remote Sensing* (pp. 546-553). CRC Press. DOI: 10.1201/b11656-30
- CHOI, J., YU, K., and KIM, Y., 2010. A new adaptive component-substitution-based satellite image fusion by using partial replacement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **49**(1), pp. 295-309. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2051674
- DUMITRESCU, D., and BOIANGIU, C.A., 2019. A Study of Image Upsampling and Downsampling Filters. *Computers*, **8**(2), p. 30. DOI: 10.3390/computers8020030.
- GARZELLI, A., NENCINI, F. and CAPOBIANCO, L., 2008. Optimal MMSE pan sharpening of very high resolution multispectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**(1), pp. 228-236. DOI: 10.1109/TGRS.2007.907604

- HASELWIMMER, C., 2013. Thermal remote sensing Sensors, Methods, Applications. In Kuenzer, C. and Dech, S. (eds) *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 287–313. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6
- KHAN, M. M., CHANUSSOT, J., CONDAT, L., and MONTANVERT, A., 2008. Indusion: Fusion of multispectral and panchromatic images using the induction scaling technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **5**(1), pp. 98–102. DOI: 10.1109/LGRS.2007.909934
- MANDANICI, E., TAVASCI, L., CORSINI, F., and GANDOLFI, S., 2019. A multi-image super-resolution algorithm applied to thermal imagery. *Applied Geomatics*, **11**(3), pp. 215–228. DOI: 10.1007/s12518-019-00253-y
- LABEN, C. and BROWER, B., 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pansharpening. *United States Patent* **6**(11), p. 875.
- LIU, J. G., 2000. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details. *International Journal of Remote Sensing*, **21**(18), pp. 3461–3472. DOI: 10.1080/014311600750037499
- RANCHIN, T. and WALD, L., 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: The ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **66**(1), pp. 49–61.
- TU, T. M., SU, S. C., SHYU, H. C., and HUANG, P. S., 2001. A new look at IHS-like image fusion methods. *Information fusion*, **2**(3), pp. 177–186. DOI: 10.1016/S1566-2535(01)00036-7
- VIVONE, G., ALPARONE, L., CHANUSSOT, J., DALLA MURA, M., GARZELLI, A., LICCIARDI, G. A., and WALD, L., 2014. A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **53**(5), pp. 2565–2586. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2361734
- WALD, L., RANCHIN, T. and MANGOLINI, M., 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**(6), pp. 691–699.
- WANG, Z. and BOVIK, A. C., 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, **9**(3), pp. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823



## ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOFTWARE PARA OBTENER MDT CON FOTOGRAMETRÍA RPAS

### COMPARATIVE SOFTWARE ANALYSIS TO OBTAIN DTM WITH RPAS PHOTOGRAMMETRY

Alba N. Arévalo-Verjel<sup>a,\*</sup>, José Luis Lerma<sup>a</sup>, José Fernández<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [alarver@doctor.upv.es](mailto:alarver@doctor.upv.es); [jllerma@cgf.upv.es](mailto:jllerma@cgf.upv.es)

<sup>b</sup> Instituto de Geociencias (IGEO), CSIC-UCM, Calle del Doctor Severo Ochoa 7, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. [jft@mat.ucm.es](mailto:jft@mat.ucm.es)

#### Abstract:

RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) are widely used in photogrammetry for taking images due to their high spatial resolution and speed of response, being able to reach areas of difficult access, being important to design a good procedure in the field to minimize errors in data collection. It is recommended to use ground control points (GCP) using conventional RPAS, when they do not work with RTK (Real Time Kinematic) systems. Likewise, there are free and licensed photogrammetric programs on the market to generate digital surface models (DSM), terrain models (DTM) and orthophotomosaics. In this article, two photogrammetric programs are used to process images captured with RPAS, such as Agisoft Metashape and Recap Photo, using GCP and check points. The study was carried out in Almenara (Spain) where the topographic survey was carried out with RPAS, capturing 100 digital images, in an area of 0.38 km<sup>2</sup>. 6 GCP were used in order to orient the digital images well in the local coordinate system and to properly georeference the images obtained during the flight. To obtain the MDT, the CloudCompare software was used to filter the cloud of points obtained from both software. The results show a difference in height between the two DTMs of less than 28 cm, taking as a reference the DTM of the Agisoft Metashape point cloud and regarding the error in the check points, Recap Photo presented a greater error.

**Key words:** photogrammetry, RPAS, digital terrain model, GCP and check points, georeferencing

#### Resumen:

Los RPAS (Sistemas de aeronaves pilotados a distancia) son muy utilizados en fotogrametría para la toma de imágenes por su alta resolución espacial y rapidez de respuesta, pudiendo llegar a zonas de difícil acceso, siendo importante diseñar un buen procedimiento en campo para minimizar los errores en la toma de datos. Se recomienda utilizar puntos de apoyo (PA) terrestres utilizando RPAS convencional, que no trabajan con sistemas RTK (Real Time Kinematic). Asimismo, existen en el mercado programas fotogramétricos libres y licenciados para generar modelos digitales de superficie (MDS), del terreno (MDT) y ortofotomosaicos. En este artículo se utilizan dos programas fotogramétricos para procesar imágenes capturadas con RPAS como son Agisoft Metashape y Recap Photo, utilizando puntos de apoyo y control terrestre. El estudio se llevó a cabo en Almenara (España) donde se hizo el levantamiento topográfico con RPAS, capturándose 100 imágenes digitales, en un área de 0.38 km<sup>2</sup>. Se utilizaron 6 PA con la finalidad de orientar bien las imágenes digitales en el sistema de coordenadas local y realizar de forma adecuada la georreferenciación de las imágenes obtenidas durante el vuelo. Para la obtención del MDT se utilizó el software CloudCompare para hacer el filtrado en la nube de puntos obtenidas de ambos softwares. Los resultados muestran una diferencia en altura entre los dos MDT menor a 28 cm tomando como referencia el MDT de la nube de puntos de Agisoft metashape y en cuanto al error en los puntos apoyo Recap Photo presento mayor error.

**Palabras clave:** fotogrametría, dron, modelo digital del terreno, puntos de apoyo y de control, georreferenciación

### 1. Introducción

Las técnicas fotogramétricas son muy utilizadas para obtener información a partir de las fotografías o imágenes digitales, obtenidas por distintos sensores, (RPAS con cámaras fotográficas o fotogramétricas, cámaras 360°, teléfonos móviles, etc.). En la actualidad existen diversos programas, unos que requieren de licencia y otros de uso libre, capaces de procesar millones de puntos obtenidos mediante el procesamiento de estas fotografías.

Por otro lado con la fotogrametría con RPAS se pueden obtener modelos digitales del terreno (MDT) con algoritmos de filtrado, de manera similar a como se hace con las nubes de puntos LIDAR (Light Detection and Ranging), debido a sus características intrínsecas para clasificar puntos terrestres y no terrestres (Serifoglu Yilmaz and Gungor 2018), pero a un menor costo.

Los RPAS son muy utilizados en la actualidad por: i) ser uno de los sistemas que mejor resolución y nitidez presentan en la adquisición de imágenes utilizados en

\* Corresponding Author: Alba N. Arévalo-Verjel, [alarver@doctor.upv.es](mailto:alarver@doctor.upv.es)

teledetección ii) la información espacial capturada es más densa que la registrada con trabajos de topografía clásica (Hernández 2006). Además los RPAS se utilizan para obtener imágenes aéreas en menor tiempo, y a diferentes alturas manteniendo una alta resolución para su uso en fotogrametría digital (Colomina and Molina 2014).

Para mejorar la precisión de los resultados obtenidos con RPAS es necesario el uso de herramientas adicionales como la estación total o el uso de GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), nivelación (Jiménez *et al.* 2017). Para la validación en campo, se recurre a la implementación de PA (puntos de apoyo terrestres), y PC (puntos de control), logrando así generar productos fiables y comparables con la topografía convencional, pero con una densidad sensiblemente superior.

Los PA aumentan considerablemente la precisión del proyecto permitiendo desplazar el modelo a la posición exacta en el terreno (Agüera-Vega *et al.* 2017). Los PC sirven para cuantificar la precisión de los productos fotogramétricos obtenidos (Jiménez *et al.* 2017).

## 2. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en Almenara (España), donde se realizó el levantamiento topográfico con fotogrametría RPAS, siendo esta una técnica fotogramétrica utilizada para obtener MDT y ortomosaicos a partir de imágenes aéreas (Galeana *et al.* 2021). A una altura de vuelo de 120 m, se capturaron 100 imágenes cubriendo un área de 0.38 km<sup>2</sup>, el modelo de la cámara usada es ILCE-5000 (16 mm) con una resolución de 5456 x 3632 y una distancia focal de 16 mm con un tamaño de pixel de 4.4 x 4.4 micras.

Para mejorar la precisión de los resultados se tomaron 6 PA distribuidos adecuadamente en el sitio de estudio, y 7 PC como se puede apreciar en la Figura 1.

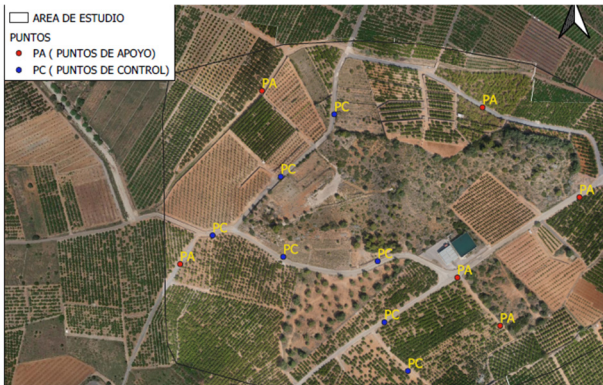


Figura 1: Distribución de puntos de apoyo (PA) y de control (PC) en el área de estudio.

Para el procesamiento de datos se utilizó el software Agisoft Metashape y el software Recap Photo de Autodesk, con licencia educativa (Autodesk 2021).

El equipo utilizado es un lenovo procesador Intel (R) core (TM) i5 -4210U CPU 1.70 GHz 2.40 GHz, RAM 6 GB, Windows 10 de 64 bits, tarjeta grafica NVIDIA GEFORCE 820 M.

### 2.1. Procesamiento mediante Agisoft Metashape

El software Agisoft Metashape realiza el proceso fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D que pueden ser utilizados en aplicaciones SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Antes de iniciar con el proceso en Agisoft se debe activar en preferencias la opción de GPU (Unidad de Procesamiento Gráfico), para mejorar la velocidad de procesamiento, dado que el software no la detecta automáticamente. A continuación, se sigue el flujo de trabajo que se indica en la Figura 2.



Figura 2: Flujo de trabajo Agisoft Metashape.

Para dar continuidad al proceso se deben ingresar las coordenadas de los GCP, manualmente o importando un archivo como fichero txt, y configurar el proyecto en el mismo sistema de coordenadas. Adicionalmente se activa la opción de optimizar cámaras para que toda la nube de puntos sea corregida (Alexander and Acurio 2018). Se dejan activos solo los PA, que para este proyecto son los puntos 87, 89, 90, 95, 105, 107 (Fig. 3). Se busca que la distribución de los puntos queden en lados opuestos para lograr una mejor georreferenciación y los puntos restantes quedan como PC.



Figura 3: Localización de los PA y PC.

En el flujo de trabajo se procede a crear la nube de puntos densa. Con base a esta se procede a generar el MDT y ortomosaico.

Para generar el MDT se usa la opción de filtrado de puntos con la opción de herramientas - nube de puntos densa - clasificación del terreno, que debe ser estudiado para ver la calidad de este proceso.

## 2.2. Proceso mediante Recap Photo

Recap photo es un servicio incluido con Recap Pro, que procesa fotografías de RPAS para crear representaciones 3D. También admite la creación de nubes de puntos, mallas y ortofotos (Autodesk 2021).

El procedimiento en este software es similar al de Agisoft: primero se usa el tipo de datos aerial para el caso de las fotografías con RPAS, el flujo de trabajo se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Flujo de trabajo en Recap Photo.

Después de ingresar las fotos se introducen los PA y PC como se muestra en la Figura 5. Estos pueden ser importados desde un archivo txt, después se activa la herramienta filtrado por GNSS para que muestre las imágenes para cada punto, que debe ser marcado como mínimo en tres fotografías diferentes. Después de esto se procesa y se guarda el reporte en el equipo de trabajo, de lo contrario quedará almacenado en la nube del software.

## 3. Resultados

El MDT, modelo digital de elevación que describe la superficie de terreno, es un conjunto de datos de dimensión 2.5, es decir, extrapolan la coordenada z a partir de las coordenadas planimétricas XY,  $Z=f(X, Y)$ . Parar cada punto XY sólo existe una z (Lerma 2002). Son muy utilizados en ingeniería para el cálculo de volúmenes, perfiles longitudinales, medir asentamientos del terreno entre otros.

Actualmente los MDT se pueden generar a través de varias técnicas que incluyen principalmente el radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), la detección y

determinación de distancia de la luz en el aire (LiDAR) y la fotogrametría digital basada en imágenes aéreas y satelitales (Chen *et al.* 2016), y la presentada en este artículo utilizando fotografías tomadas con RPAS.

Los MDS y el ortomosaico es la etapa final del procesamiento de imágenes obtenidas con RPAS. Para la generación de estos modelos la nube de puntos debe pasar por una triangulación y rasterización (Escalante and Porras 2016). Para la generación del ortomosaico las imágenes individuales son rectificadas a partir del MDT, eliminando la distorsión asociada al relieve.

Figura 5: Ingreso de PA y PC en el software Recap Photo.

### 3.1. Resultados con Agisoft Metashape

El GSD (Ground sampling distance) que indica el tamaño aproximado que representa un pixel en el terreno (Quispe 2015). Para este proyecto es de 3.67 cm/pix., que coincide con el teórico, indicando que el vuelo se mantuvo a una altura constante.

Es importante desmarcar los PC cuando se generen los modelos para que el programa no procese todos los puntos como PA. En la Tabla 1 se presentan los errores obtenidos para los 6 PA, generando un error total en X de 0.29 cm, en Y de 0.68 cm, y un error en Z de 1.12 cm que es el que más interesa para validar el MDT, dando muy buena precisión en los PA, porque los errores son menores a los 2 cm.

Tabla 1: Error en los PA.

Punto	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)
90	-0.2	-1.4	1.1	1.8
95	0.6	0.1	0.5	0.8
89	-0.1	0.8	-1.7	1.9
87	-0.2	0.0	1.6	1.6
107	0.1	0.3	-0.7	0.8
105	-0.3	0.3	-0.3	0.5
Total	0.3	0.7	1.1	1.3

#### 3.1.1. Modelo digital del terreno (MDT)

El MDS que se generó en Agisoft se obtuvo con una resolución de 6.71 cm/pix y una densidad de puntos de



222 puntos/m<sup>2</sup> con un valor de altura mínima de 22 m y máximo de 52 m como se observa en la Figura 6. Dentro de la etapa de procesamiento de las imágenes, la discretización de la nube de puntos densa en tres clases es un paso fundamental para obtener los modelos que representan la topografía del sitio de estudio. La discretización permite triangular únicamente los puntos de terreno para generar los MDT (Jiménez *et al.* 2017). Hay que clasificar la nube puntos en puntos de ruido (valores atípicos por encima y debajo del suelo), objetos y puntos del terreno.

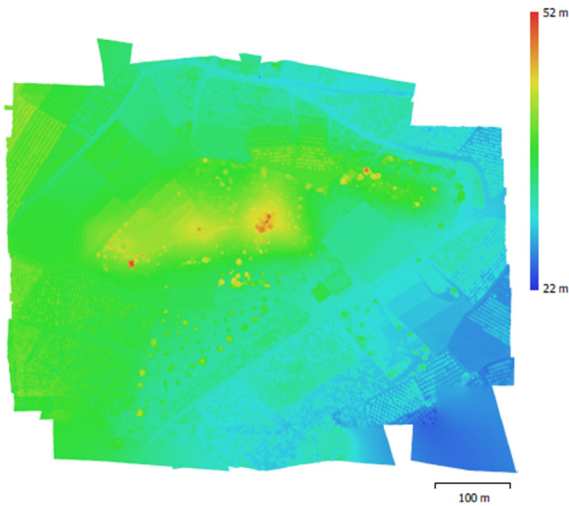


Figura 6: Raster de MDS software Agisoft Metashape.

Para convertir el MDS en MDT el software cuenta con una herramienta a partir de la nube de puntos densa y con la opción de clasificar puntos en terreno como se observa en la Figura 7. También se utilizó el visor de nubes de puntos ColudCompare para clasificar solo los puntos que son del terreno.

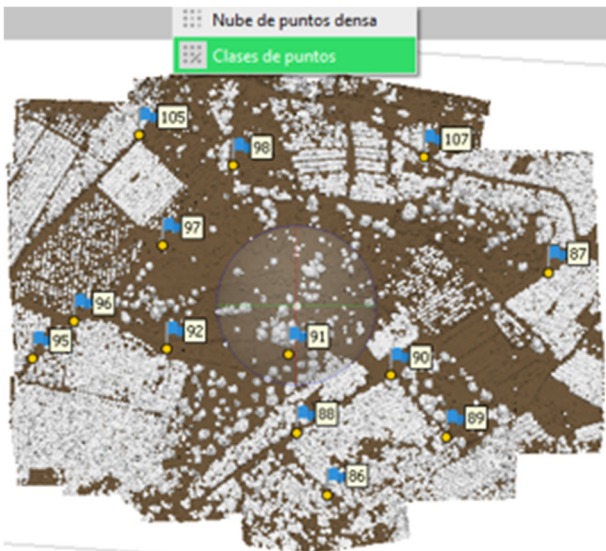


Figura 7: Clasificación de puntos software Agisoft Metashape.

Analizando los resultados con CloudCompare utilizando la nube de puntos generada por el software Agisoft Metashape, se creó un campo escalar con la coordenada Z para la nube de puntos. Posteriormente, se ajustó el

histograma resultante. La Figura 8 muestra un valor mínimo de 24 y un máximo de 48 m.

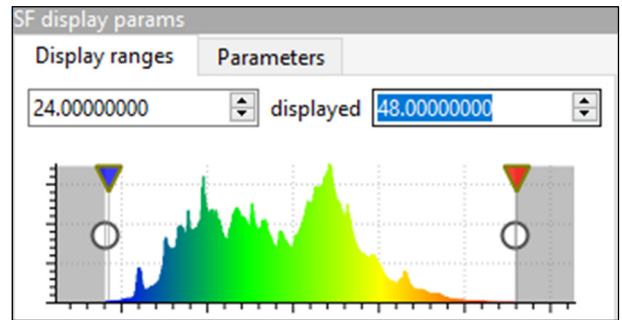


Figura 8: Mejora del histograma de la nube de puntos generada con Agisoft Metashape en CloudCompare.

En la Figura 9 se muestra los resultados después de ajustar el histograma a la nube de puntos con el nuevo campo escalar Z generado. Se puede comprobar que se aprecia mejor el contenido del MDS.

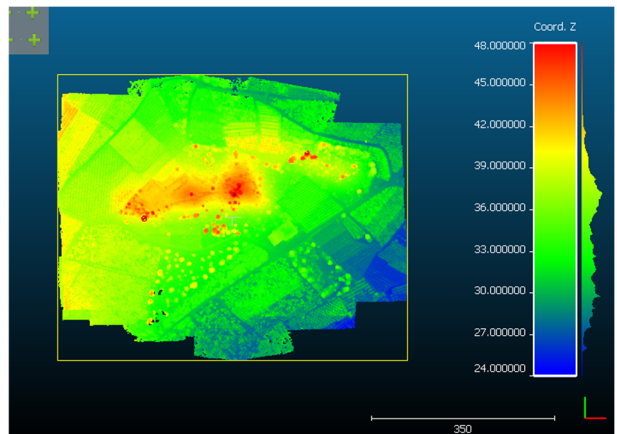


Figura 9: Resultado de mejorar el contraste del campo escalar Z en CloudCompare.

Para realizar el filtrado de puntos en CloudCompare se utilizó la herramienta CSF filter (siglas en inglés de *Cloth Simulation Filter*), que permite clasificar la nube de puntos en nube de puntos terreno y no terreno (Fig. 10). Se escogió la opción de relieve porque el terreno no es plano, procesado con pendiente, y se repitió este proceso tres veces hasta que la nube quedara solo con puntos pertenecientes al terreno. Con la herramienta de Edit→Merge se fusionaron las tres nubes de puntos ya filtradas. Los resultados se muestran en la Figura 10.

Los resultados los podemos exportar en formato ráster. ASC II, las, laz, PLY, DXF etc.

### 3.2. Resultados con el software Recap Photo

Recap Photo se encuentra dentro de la suscripción de Recap pro, es una aplicación conectada a la nube, generando la ortofoto y un MDS como se muestra en la Figura 11, dando como resultado una resolución de 10 cm/pix para una altura mínima de 22.34 m y máxima de 51.22 m. Comparándolo con el resultado que genero Agisoft, estos se asemejan ya que cuando se genera el reporte en este software se aproximan las alturas, aunque presentó un cambio en la resolución. En cuanto



al tiempo necesario para el procesado, este depende de cuantos proyectos estén en cola en la nube, si usamos licencia educativa este proceso tardara mas y para procesar mas de 100 fotografías hay que adquirir la licencia, el tiempo que tardo este proyecto fue de 8 horas.

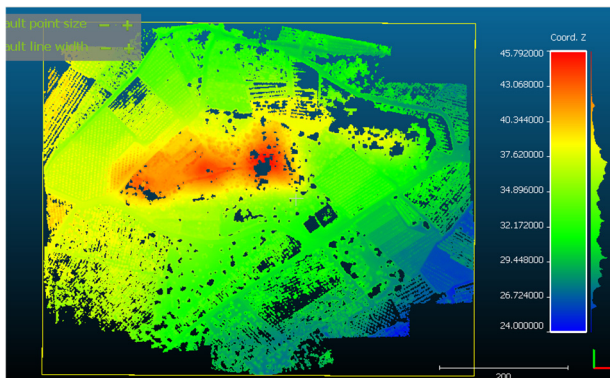


Figura 10: Filtrado de puntos de la nube generada por Agisoft Metashape utilizando CSF Filter de Cloud Compare.

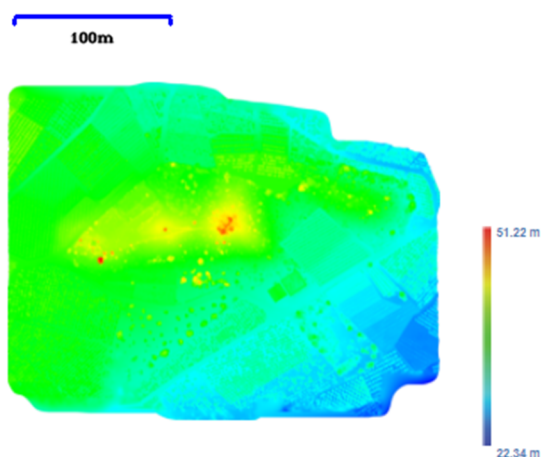


Figura 11: Digital Elevation Model. Software Recap Photo (MDS).

En cuanto a los PA, el error es menor de 6.7 cm en XYZ como se observa en la Tabla 2. Estos son calculados por las diferencias entre las entradas del usuario (precisión al ubicar el punto en el software) y los puntos de coordenadas calculadas por el sistema, y está relacionado con el GSD los valores X, Y y Z de la tabla corresponden al sistema de coordenadas geográficas.

Tabla 2: Error en los PA.

Pto	X (latitud)	Y (longitud)	Z (altitud)	Error XY (m)*	Error Z (m)*
95	-0.25	39.7	37.74	< 0.067	< 0.067
90	-0.24	39.7	30.78	< 0.067	< 0.067
89	-0.24	39.7	28.45	< 0.067	< 0.067
87	-0.24	39.7	29.68	< 0.067	< 0.067
105	-0.25	39.7	32.58	< 0.067	< 0.067
107	-0.24	39.7	29.98	< 0.067	< 0.067

Para convertir el MDS en MDT se exportó la nube de puntos en formato X, Y, Z para ser analizada en CloudCompare y se realizó el mismo procedimiento que

se manejo para la nube de puntos generada por Agisoft Metashape. Los resultados se muestran en la Figura 12.

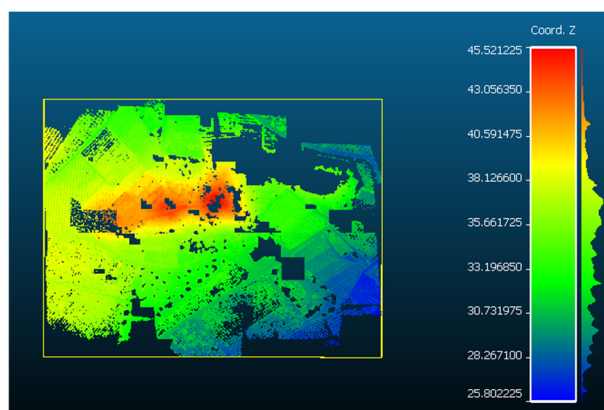


Figura 12: Filtrado de puntos de la nube generada por Recap Photo utilizando CSF Filter de CloudCompare.

#### 4. Discusión

Los resultados de las dos nubes de puntos obtenidas después de clasificar solo los puntos del terreno son analizados con la herramienta compute cloud distance de CloudCompare que busca el punto más cercano en la nube de referencia y calcula su distancia euclidea.

Tomando como referencia la nube de puntos generada por Agisoft Metashape y comparándola con la nube de Recap Photo, y utilizando la herramienta tools-statistics-compute-stats-params se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 13.

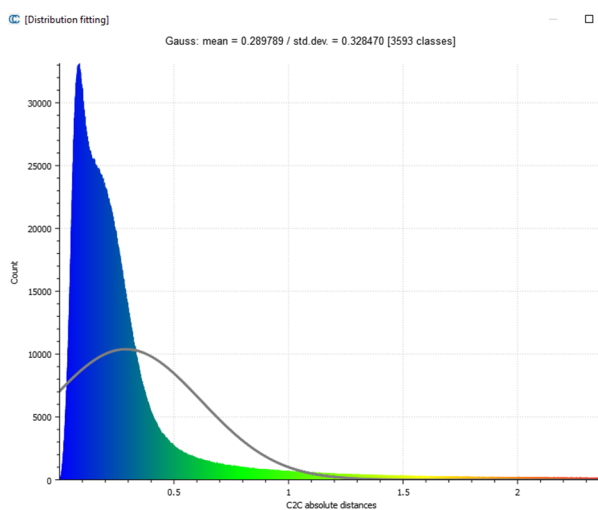


Figura 13: Comparación entre las nubes de puntos con la campana de Gauss.

De la Figura 13, el eje de la abscisa representa la distancia en metros entre los dos modelos y el de la ordenada representa la cantidad de puntos, podemos observar que la media de las distancias calculadas entre las nubes de puntos es de 28 cm, con una desviación estándar de 32 cm. Estos valores no siguen una distribución normal, y la mayoría de puntos entre los dos modelos se encuentran por debajo de los 28 cm.

En cuanto a la densidad de puntos el MDT de la nube de puntos generada en Metashape y filtrada en CloudCompare es de 51 ppm<sup>2</sup> con una altura mínima de

24 m y la máxima 45.792 m; para la nube de Photo obtenemos una densidad de 47 ppm<sup>2</sup> una altura mínima de 25.8 m y una máxima de 45.52 m.

En la Tabla 3 se presentan en resumen las diferencias en cuanto al tiempo de procesamiento de las imágenes y errores en los PA de los dos softwares utilizados. Es necesario aclarar que el tiempo en Agisoft varía en función de las características de hardware utilizado.

**Tabla 3:** Comparativa entre Agisoft metashape y Recap Photo.

Características	Agisoft Metashape	Recap Photo
Tiempo de procesamiento (h)	5	8
Error total en Z en los PA (cm)	1.1	< 6.7

El tiempo en Recap Photo depende de los proyectos que estén en cola dependiendo el tipo de licencia que se utilice, debido a que este procesa en la nube.

## 5. Conclusiones

En la actualidad existen diferentes tipos de programas capaces de realizar todas las funciones de procesamiento necesarias para generación de ortomosaicos y MDT. La diferencia entre Agisoft y Recap Photo, es que recap procesa todo en la nube y no se sabe cuanto tiempo pueda durar el procesamiento, y además no se puede ir ajustando los parámetros de procesamiento, mientras que en Agisoft se puede ir ajustando al tiempo y las necesidades del proyecto.

Para generar un MDT Agisoft Metashape tiene la herramienta para filtrar solo los puntos del terreno pero la calidad no es muy óptima porque se pueden apreciar los árboles en el modelo. El software Recap Photo da un resultado similar al de Agisoft Metashape en cuanto al MDS pero para el filtrado de puntos que no son del terreno, se requiere del software Civil 3D para realizar este procedimiento, porque dentro de Recap Photo no existe la opción. Otra alternativa para utilizar este software es extraer la nube de puntos en formato OBJ o como XYZ para poder hacer el filtrado del MDS a MDT, por ejemplo, en CloudCompare. En cuanto a exportar archivos, Agisoft Metashape tiene múltiples opciones de formatos de salida, y Recap Photo es más limitado.

El MDT resultado de Agisoft presenta mayor densidad en la nube de puntos que el resultado en la nube de puntos de Recap Photo. En cuanto a la calidad del MDT los dos softwares presentan una diferencia menor a los 28 cm.

Ambos softwares, Agisoft Metashape y Recap Photo, son muy eficientes para el procesamiento de imágenes y creación de ortomosaicos, pero para generar MDT se deben complementar con otros softwares que tienen implementados mejores procesos de filtrado, como son CloudCompare o LAStools.

## Agradecimientos

Se agradece a Autodesk por la licencia otorgada por un año de todos sus programas con fines académicos.

Esta investigación se ha sufragado parcialmente por el proyecto de la AEI DEEP-MAPS (RTI2018-093874-B-I00).

## Referencias

- AGÜERA-VEGA, F., CARVAJAL-RAMÍREZ, F., and MARTÍNEZ-CARRICONDO, P., 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, **98**, pp. 221–227. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.12.002
- AUTODESK, INC. 2021. Software de Recap. Available: <https://www.autodesk.es/products/ Recap/overview?term=1-YEAR> [8/22, 2021]
- ALEXANDER, G., and ACURIO, C., 2018. *Análisis comparativo entre los software de prueba agisoft photoscan y pix4d para el procesamiento de datos obtenidos con fotogrametría de vehículo aéreo no tripulado (uav) de bajo costo*. Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- CHEN, Q., WANG, H., ZHANG, H., SUN, M., and LIU, X., 2016. A point cloud filtering approach to generating DTMs for steep mountainous areas and adjacent residential areas. *Remote Sensing*, **8**(1). DOI: 10.3390/rs8010071
- COLOMINA, I., and MOLINA, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **92**, pp. 79–97. DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.02.013
- GALEANA, V. M., CHÁVEZ, O., and MEDELLÍN, G., 2021. On the measure of land subsidence throughout DEM and orthomosaics using GPS and UAV. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, **22**(1), pp. 1–12. DOI: 10.22201/ii.25940732e.2021.22.1.006
- HERNÁNDEZ, D., 2006. Introducción a la fotogrametría digital. *ETSI Agrónomos: Universidad de Castilla la Mancha*.
- JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S., OJEDA-BUSTAMANTE, W., ONTIVEROS-CAPURATA, E., FLORES-VELÁZQUEZ, J., MARCIAL-PABLO, M DE J., BRAULIO, and ROBLES-RUBIO, D., 2017. Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, **9**(2), pp. 85-100. DOI: 10.5154/r.inagbi.2017.03.007
- LERMA, J. L., 2002. *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. Universidad Politécnica de Valencia, pp. 556. ISBN: 978-84-9705-210-8
- QUISPE, O. C., 2015. *Análisis de GSD para la generación de cartografía utilizando la tecnología drone*. Huaca de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 18.

- SERIFOGLU YILMAZ, C., and GUNGOR, O., 2018. Comparison of the performances of ground filtering algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud. *Geocarto International*, **33**(5), pp. 522–537. DOI: 10.1080/10106049.2016.1265599
- ESCALANTE, J. O., and PORRAS, H., 2016. Orthomosaics and digital elevation models generated from images taken with UAV systems. *Tecnura*, **20**(50), pp. 119–140. DOI: 10.14483/22487638.11566



## A REVIEW OF THE USE OF REMOTE SENSING FOR MONITORING AND QUANTIFYING CARBON SEQUESTRATION IN MARGINAL LANDS

### REVISIÓN SOBRE EL USO DE LA TELEDETECCIÓN EN LA MONITORIZACIÓN Y PREDICCIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TIERRAS MARGINALES

Juan Pedro Carbonell-Rivera<sup>a,\*</sup>, Javier Estornell<sup>a</sup>, Luis A. Ruiz<sup>a</sup>, Alfonso Abad<sup>b</sup>, Bettina Felten<sup>c</sup>, Jesús Torralba<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [juacarri@upv.es](mailto:juacarri@upv.es); [jaescre@cgf.upv.es](mailto:jaescre@cgf.upv.es); [laruiz@cgf.upv.es](mailto:laruiz@cgf.upv.es); [jedorpe@upv.es](mailto:jedorpe@upv.es)

<sup>b</sup> Cesefor (Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León). Polígono Industrial las Casas, calle C, parcela 4, 42005 Soria, Spain. [alfonso.abad@ceseфор.com](mailto:alfonso.abad@ceseфор.com)

<sup>c</sup> Industriebetriebe-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), Hermann-Reichelt-Str. 3, 01109 Dresden, Germany. [Felten@iabg.de](mailto:Felten@iabg.de)

#### Abstract:

In recent years, Remote Sensing (RS) and its derived products have been used as a key tool for the detection, monitoring, management and future use of Marginal Lands (ML). Currently, there is no single, universally accepted definition of the term and there is a wide variety of synonyms. In this paper, we conduct a compilation of synonyms and meanings that encompass the term, as well as propose a definition. To reach this objective, an overview of the state of the art of ML is done, visualising trends by science maps, based on bibliographic data of established research journals, found in Google Scholar, Web of Science (WoS) and Scopus search engines. The bibliographic review carried out shows that the study of ML has traditionally been carried out with an ad hoc basis focused on the objective to be achieved, this aspect and other knowledge gaps are discussed to analyse the global study of ML. Due to the broad spectrum of uses in which ML have been studied, the work has been focused on RS for monitoring and characterizing ML, focusing on two different aspects: (i) satellite monitoring of marginal lands; and (ii) determining carbon sequestration potential of marginal lands using remote sensing.

**Key words:** marginal lands, remote sensing, carbon sequestration, land use

#### Resumen:

En los últimos años, la teledetección y sus productos derivados se han utilizado como herramienta clave para la detección, seguimiento, gestión y uso futuro de las tierras marginales (ML). Actualmente, no existe una definición única y universalmente aceptada del término y existe una gran variedad de sinónimos. En este artículo llevamos a cabo una recopilación de sinónimos y significados que engloban el término, además de proponer una definición universal. Para alcanzar este objetivo, se realiza un resumen del estado del arte de las ML, visualizando las tendencias mediante mapas científicos, basadas en datos bibliográficos de revistas de investigación consolidadas, encontradas en los buscadores *Google Scholar*, *Web of Science (WoS)* y *Scopus*. La revisión bibliográfica realizada muestra que el estudio de las ML se ha realizado tradicionalmente con una base *ad hoc* centrada en el objetivo a alcanzar. Se discute este aspecto y otras lagunas de conocimiento para analizar el estudio global de las tierras marginales. Debido al amplio espectro de usos en que se han estudiado las tierras marginales, los trabajos se han centrado en la teledetección para su seguimiento y caracterización, centrándose en dos aspectos diferentes: (i) el seguimiento por satélite de las tierras marginales; y (ii) determinación de su potencial en el almacenamiento de carbono mediante teledetección.

**Palabras clave:** tierras marginales, teledetección, captura de carbono, uso del suelo

## 1. Introduction

The international sustainable development goals set by the United Nations General Assembly (The Millennium Development Goals (United Nations 2000); The Sustainable Development Goals (United Nations 2015)) have encouraged studies to achieve a better and more sustainable future for everyone. In this sense, the objective of taking urgent action to combat climate change and its impacts has promoted the scientific community to consider marginal lands (ML) as an opportunity in the face

of limited arable land resources. (Koonin 2006; Kurbanov *et al.* 2007; Milbrandt & Overend 2009; Kang *et al.* 2013). In recent years, there has been an increased interest in the potential use of ML for biofuels, food security or carbon sequestration (Gelfand *et al.* 2013; Kang *et al.* 2013; Emery *et al.* 2017; Qureshi 2017). This trend has led to an increase in the number of studies identifying and evaluating the use of ML. Unfortunately, many of these studies have developed their own definition of the concept, differing across epoch, discipline and geographical areas (Liu *et al.* 2011; Lewis & Kelly 2014).

\* Corresponding Author: Juan Pedro Carbonell-Rivera, [juacarri@upv.es](mailto:juacarri@upv.es)

In addition, the term ML is often related to other terms that could be considered interchangeable. This lack of a unified concept of the term has also meant that the methods for identifying and monitoring ML have been diverse and focused on an ad hoc basis. According to Kang *et al.* in 2013, there is no widely accepted method for evaluating ML and generally the methods used are qualitative and empirical, and some of them are very subjective.

In recent years, the use of remote sensing (RS) has allowed the characterisation of ML based mostly on biophysical characteristics, reducing the subjectivity of the studies (Nalepa & Bauer 2012). However, these studies have implemented widely differing methodologies to study ML, making necessary a compilation of the techniques used, as well as a study of the trends in remote sensing applied to the study of ML.

This article aims to compile the related terms which have been used interchangeably with the term ML, as well as the different descriptions that have been given to these terms. In this sense, a global description of the term is proposed. In addition, a literature review of the use of RS on ML is carried out. This work has been focused on one of the most currently interesting uses of ML for their contribution to climate change mitigation, the use of ML as carbon storage.

## 2. Analogous concepts

The concept ML is related with different terms that have been used as synonyms. The lack of an overall definition has meant that the concept has been used in a vague and non-concise way, leading to the use of different adjectives to talk about the same concept (Milbrandt & Overend 2009). Some of these terms are "abandoned lands", "degraded lands", "idle lands", "set-aside lands", "underutilized lands", "unproductive lands", or "waste lands" (Lal 1991; Sugrue 2008; Wiegmann *et al.* 2008; Kang *et al.* 2013).

To analyse the use of each term in the scientific and academic field, an analysis of the results in Google Scholar, WoS (using the databases belonging to the Core Collection of Clarivate Analytics) and Scopus search engines was carried out for each term. These search engines are the most widely used in the search for academic and scientific literature (Martín-Martín *et al.* 2018).

The results of this search are shown in Table 1. A global analysis shows that Google Scholar systematically yields a higher number of indexed publications compared to WoS and Scopus. These results are due to Google's method of indexing documents. Google Scholar uses an automated method that indexes any document with a seemingly academic structure, giving an additional view of the scientific and scholarly literature compared to WoS and Scopus (Martín-Martín *et al.* 2018).

Analysing the table in depth, the most used terms in the Google Scholar search engine are "waste lands" and "abandoned lands", followed by "marginal lands". In the WoS search the most frequently used term is "waste lands", while the terms "abandoned lands", "degraded lands" and "marginal lands" are used less frequently. Finally, the Scopus search engine agrees with WoS in determining the term "waste lands" as the most used

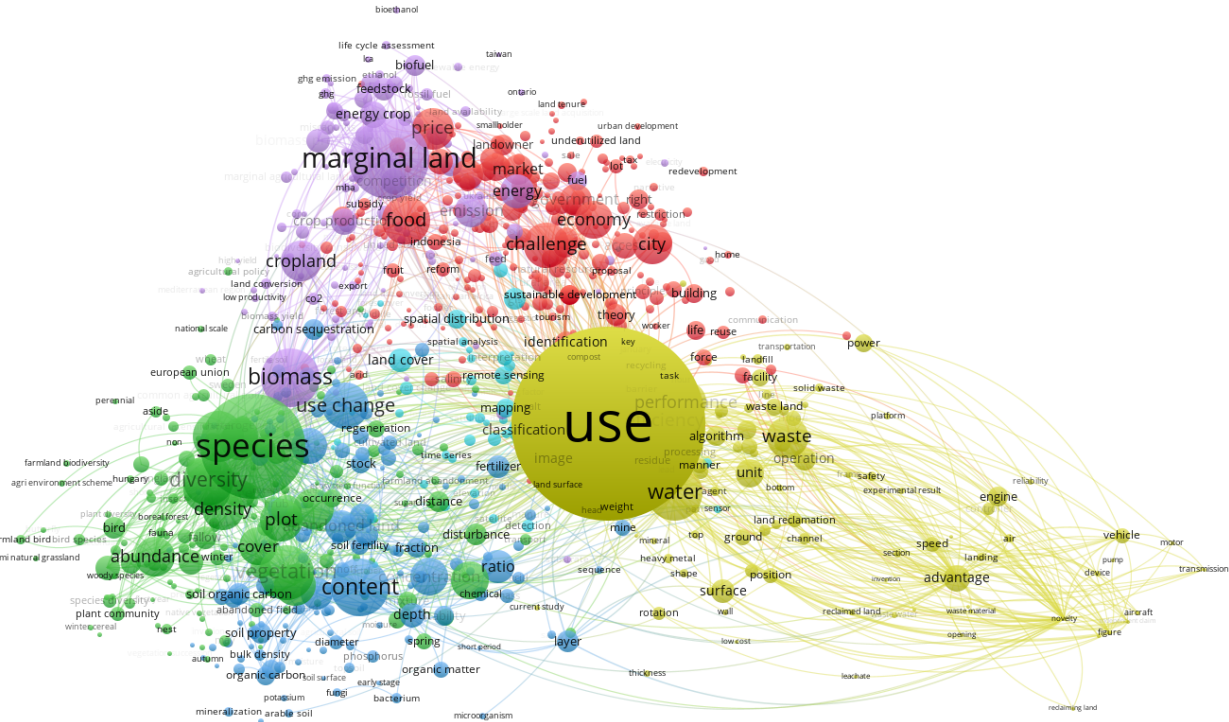
term, followed by the terms "abandoned lands", "degraded lands" and "marginal lands". The results also show that, regardless of the search engine used, the terms "degraded lands", "idle lands", "set-aside lands", "underutilized lands" and "unproductive lands" are not commonly used.

**Table 1:** Search results by search term and search engine.

Search term	Google Scholar	Web of Science	Scopus
Abandoned lands	1,250,000	11,603	8,088
Degraded lands	389,000	17,100	9,982
Idle lands	257,000	1,139	523
Marginal lands	842,000	11,375	7,800
Set-aside lands	317,000	1,765	1,085
Underutilized lands	51,100	584	516
Unproductive lands	144,000	703	518
Waste lands	1,420,000	46,564	35,940

In this sense, it is also interesting to study the number of citations received by the most relevant paper according to each search term used. To this end, a search was carried out for the most cited papers according to WoS by search term. In the case of the term "abandoned lands" the most cited paper explores the future of abandoned farmlands in Europe (Verburg & Overmars 2009), obtaining 451 citations. Regarding the term "degraded lands", the most relevant document deals with restoring forests and ecosystem services on degraded lands (Chazdon 2008), obtaining 918 citations. Also noteworthy for this term is a paper on catalysing the regeneration of native forests on degraded tropical lands (Parrotta *et al.* 1997), which gets 416 citations. In relation to the term "marginal lands", the paper with the most citations is about sustainable bioenergy production from ML (Gelfand *et al.* 2013), with 426 citations. Finally, a search for the term "waste lands" reveals that the most cited paper is not related to the scope of this study, but to plastic waste inputs from land into the ocean (Jambeck *et al.* 2015), a paper with 3,073 citations, and in which it can be seen that the title contains the search term, creating confusion in WoS. This fact is repeated in the following search results, as the papers with the most citations have a different final scope, finding that the paper with the most citations that includes the "waste lands" concept studied in this research has less than 30 citations. Analysing the number of citations for the rest of the search terms, we find that the most relevant publications have no more than 30 citations either.

In order to extend this analysis, we carried out a bibliometric map with the search results obtained from the different synonyms of the term ML (Fig. 1). To produce this map, titles and abstracts of the 500 articles with the highest relevance according to WoS were obtained for each of the synonymous terms showed in Table 1, analysing a total of 4000 items. This bibliometric map shows the number of publications where there is a co-occurrence between two terms. Thus, the higher the number of co-occurrences of a term with other terms, the larger display size of the term, as well as higher number of links (van Eck and Waltman 2010).



**Figure 1:** Bibliometric network of co-occurrences found in the titles and abstract of the first 500 search results offered for the terms "Marginal lands", "Unproductive lands", "Waste lands", "Idle lands", "Abandoned lands", "Underutilized lands", "Degraded lands" and "Set-aside lands" in WoS.

The bibliometric map also shows a cluster of the literary network. This cluster is calculated using the following formula (Duan *et al.* 2020), Eq. (1) and (2):

$$V(c_1, \dots, c_n) = \frac{1}{2m} \sum_{i < j} \delta(c_i, c_j) \omega_{ij} (c_{ij} - \gamma \frac{c_i c_j}{2m}) \quad (1)$$

$$\omega_{ij} = \frac{2m}{c_i} c_j \quad (2)$$

Where:

$c_i$  = cluster of the element  $i$

$\gamma$  = resolution of clustering

In this study, the value of the resolution clustering was set to 1.0. Analysing the bibliometric map obtained, we can see that 6 clusters have been created.

The first cluster, in red, has 239 items related to economic terms, being the most relevant the term "food". This term is linked to others such as "challenge", "price", "economy" or "government". In this regard, the relationship between these items highlights the relevance of government decisions not to produce biofuels on existing agricultural lands, to avoid an indirect land use change which could increase food prices, changing local economies (Ahlgren and Di Lucia 2014). In this cluster is located the term "underutilized" relating it to a purely economic aspect.

The second cluster showed in green colour has 175 terms related to ecologic terms. It includes items related to flora, such as "species" (being the item with a higher number of co-occurrences), "vegetation", "diversity", "density", "agricultural policy" or abundance. In this cluster we find the term "set-aside lands", which is normally used to refer to land temporarily unused due to political interventions (Dauber *et al.* 2012).

The third cluster is composed of 144 items in indigo blue colour. This cluster is related with natural and agricultural terms, being "content" and "use change" the most relevant items. This cluster includes terms related to soil characteristics such as "soil fertility", "soil organic carbon", or "organic matter". In this cluster we find the ML synonym "abandoned land". This fact highlights the use of this term, which is usually designated for lands that have had a previous anthropic use, mainly in natural resources and agriculture, but where due to the low quality of the soil they have been left uncultivated (Imbrenda *et al.* 2014).

The fourth cluster is shown in purple, with 111 items related with energy harvesting. In this cluster the item with the most co-occurrences is the term ML, which is widely related to terms such as biomass, biofuel, energy crop, or cropland, all of them related to the use of ML for biofuel production.

The fifth cluster, in yellow, has 104 items. It presents as the item with the highest co-occurrence the term "use". To this cluster belongs the term "waste land". This term is used to identify the lands with unfavourable physical and biological conditions (Wiegmann *et al.* 2008). In this sense, terms such as "heavy metal", "solid waste", or "residue" are found in this cluster. Examples of such land are mainly brownfield sites, such as quarries or other types of mining areas with the presence of tailings dumps, lands that are not currently in use that may be potentially contaminated.

Finally, the sixth cluster is represented in cyan colour, having only 49 items related with geomatics. The item with the highest number of co-occurrences is the term "land cover", which is related to other terms such as "GIS", "remote sensing", "classification" or "mapping",



relating the keywords of the tools and techniques used in the identification and management of ML.

From this analysis, we can extract that of the synonymous terms analysed, the term with the highest number of co-occurrences was "marginal land". Other synonymous terms which are widely used, such as "abandoned lands" and "waste lands", have less weight in the search for co-occurrences. In the case of "abandoned lands", the term is limited by the previous anthropic use. Whereas the term "waste lands" is constrained by the specificity of the concept, since waste lands are defined as empty and desolate lands, with no sign of life or growth.

### 3. Meanings and definitions

The overall vision of the term "marginal land" was initially related to land uses that are not economically profitable. One of the first definitions of the concept was made by Hollander in 1895, defining ML as the poorest land used above the margin of profitability. Similarly, Peterson and Galbraith proposed in 1932 a purely economic concept of the term, defining ML as farmland where income is equal to (or less than) the cost of production. It was not until the late 20th century when it was proposed an environmental approach of the concept, referring to ML as those with low production, which are unsuitable for agricultural practices and ecosystem function (Heimlich 1989).

Since the beginning of the 21st century, the growing scientific interest in the identification and management of ML has led numerous authors to define the term. In 2006 Schroers defined the concept as the area where production is not profitable under certain conditions related to agricultural policies, farming techniques, legal and macroeconomic conditions. The author provides an economic definition of the term, including a political perspective, which was necessary due to the application of agricultural subsidies that began to develop in the mid-20th century, such as the European Common Agricultural Policy.

Milbrandt and Overendin in 2009 gave a technical definition of the term, stating that ML are characterised by poor climate, poor physical characteristics, or difficult cultivation. An approach that Schweers *et al.* expanded in 2011, indicating that land marginality is due to the long-term loss of ecosystem function and services, caused by factors from which the system cannot recover unaided. This definition implies that the determination of land as marginal must be purely technical and must be based on multi-temporal studies, allowing the characterisation over a long period.

In 2012, Liu *et al.* proposed a mercantilist view of the term, focused on the generation of biofuels. The author indicates that ML are those not suitable for crop production, but ideal for the growth of energy crops with high stress resistance. One year later, Kang *et al.* indicated that ML are usually characterised by low economic and productive returns or those with severe limitations for agricultural cultivation. Following this view, Shortall in 2013 also proposed a similar definition, stating that all ML must meet three requirements. These lands cannot be used for food production, they must be characterised by their low quality and their economic use must be marginal.

In contrast, Lewis and Kelly in 2014 provided a technical definition of the term, stressing that ML areas are characterised by a low nutrient content, poorly drained soils with reduced water availability and steep slopes. Following this approach, Blanco-Canqui in 2016 indicated that ML are lands that have physical and chemical problems, or are uncultivated, or negatively affected by climatic conditions.

One of the most recent definitions was proposed by Schröder *et al.* in 2018 indicating ML are those that have lost their ecological and/or economic value to the community and their degradation is increasing over time.

A review of the term over the years shows that most of the authors have defined it by focusing merely on the economic aspect. This definition is explained by its initial economic nature in a context of economic crisis context.

At the end of the 20th century, a greater environmental awareness began to emerge and factors such as ozone depletion or climate change have caused a change in global consciousness (Leiserowitz 2007), affecting and evolving the term ML to a more environmental approach. The term "marginal land" is a living concept, changing over time, which has incorporated other anthropic aspects such as cultural, social, or political factors (Baldock 1996; Mehretu *et al.* 2000; Krcmar *et al.* 2005; Kang *et al.* 2013). One of the most relevant aspects to consider is the temporal variability of the concept of marginal land, since what may be classified as marginal land now may not be so in the future (i.e., economic crises may make land use profitable again, agricultural policies). The temporal dynamics on the land should be explicitly included in the definition as the phenomenon of marginality should be stable over time, being due to degradation (natural) or abandonment (anthropic) processes over a long period of time. In this sense, the definition must be global to adapt to the anthropic circumstances and environmental conditions of each region. All these constrains are interrelated with each other as shown in the Figure 2.

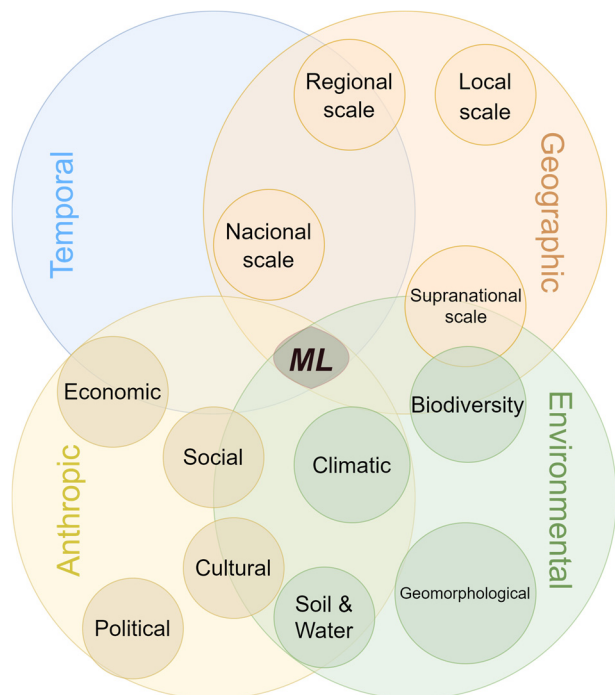


Figure 2: Diagram of the different factors affecting the Marginal Lands (ML) concept.



Our proposed definition of ML is "Land without change over time, with significant constraints either cultural, economic, environmental, political or social, where a land use change would result in a gain in any of these aspects."

#### 4. Remote sensing and marginal lands

RS and modern interpretation techniques are being widely used in recent years for objective identification, monitoring, management and future utilization of underutilized lands at a regional or global scale (Nalepa & Bauer 2012). Due to the broad spectrum in which remote sensing has been applied to marginal lands, we conducted an overview of the most relevant papers on the topics "satellite monitoring of marginal lands" and "carbon sequestration potential of marginal lands using remote sensing".

##### 4.1. Satellite monitoring of marginal lands

One of the first studies that applied RS for monitoring ML was published by W. Ray *et al.* in 1993, who identified agricultural areas that were abandoned in south-eastern California in the mid-20th century due to the rising price of electricity needed to pump irrigation water. To achieve this purpose, polarimetric SAR was used to detect ploughed concentric circular planting furrows, as well as the NDVI index obtained from Landsat-5 TM images.

The use of RS has provided information on land cover and land use patterns, making possible the identification of gradual land abandonment from multi-temporal comparisons. Witmer and O'Loughlin in 2009, conducted a study of the effects of the war in Bosnia-Herzegovina on the agricultural environment. Using Landsat-5 TM and Quickbird imagery, multi-temporal studies were carried out to identify agricultural land that was abandoned due to the war. In this paper, the author highlights the importance of RS data for tracking the course of conflicts and assessing their long-term impacts.

Hermosilla *et al.* proposed in 2012 a methodology to identify abandoned agricultural plots in northwest Spain. The classification of these plots was object-oriented, using spectral, textural, structural and shape features extracted from orthophotos that were used as inputs for three different classification methods (decision trees, linear discriminant analysis and support vector machine). This methodology showed a high capability of the object-based image classification techniques as a tool for updating and managing ML.

Milenov *et al.* in 2014 developed the "Abandoned agricultural land" tool to detect potentially abandoned agricultural land based on SPOT multi-temporal data. The objective of this study was to detect abandoned agricultural land to corroborate the correct functioning of the European Common Agricultural Policy, verifying that the expansion of abandoned agricultural lands was avoided and that they were reactivated.

Löw *et al.* in 2015 conducted a study with the same objective, mapping abandoned agricultural land, but for a different purpose, to monitor and limit crop abandonment in Central Asia. For this, Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI and RapidEye imagery were classified using Random forest and support vector machines. Liu *et al.* (2015) studied changes in land use of ML using Landsat-7 ETM+

and SPOT5 imagery. Since the early 1960s, oil exploration in the Yellow River delta (China) has led to the fragmentation of protected wetlands. In this study it was reported how the ML generated by oil extraction are restored to their original environmental function.

The overall assessment of the papers on satellite monitoring of ML shows how studies have addressed a wide range of issues, but there are currently no mechanisms that routinely generate accurate, consistent and regular data on land degradation at the national scale (Giuliani *et al.* 2020). The large volumes of freely and openly available satellite Earth observation data are not used to create a comprehensive ML monitoring product.

##### 4.2. Carbon sequestration potential of marginal lands using remote sensing

RS technology has the potential to be useful for frequent monitoring of carbon sequestration projects (Brown 1996). A wide variety of RS missions have been used to quantify carbon sequestration, as AVHRR, Landsat (MSS and TM), SPOT, AVIRIS, GEDI or Sentinel (Brown 1996; Castaldi *et al.* 2019). In this sense, the methodology to obtain the carbon sequestration of ML does not differ from others that assess this variable in other types of land use. There is a great interest to calculate the potential that reforestation or afforestation of ML would have on its use as carbon stock.

In 2000, Silver *et al.* published one of the first papers on the potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned lands. In his paper they conclude that forests growing on abandoned agricultural land accumulate biomass faster than other land uses, while soil carbon accumulates faster on sites that were cleared without agricultural development. This opens a new research focus, long-term carbon sequestration potential for the mitigation of atmospheric emissions of CO<sub>2</sub>.

In 2007, Potter *et al.* conducted satellite-derived estimations of the carbon sequestration potential through afforestation of ML in the United States. This paper reported one of the first estimations of carbon sequestration by afforesting ML. The study was conducted using direct inputs of satellite data from the AVHRR sensor into the NASA-CASA carbon model to estimate monthly variability in net primary production and potential biomass accumulation rates. The paper concludes that afforestation of ML in the US would offset at least one-fifth of annual carbon emissions in the country.

DiRocco *et al.* in 2014, conducted a discussion on the best land-use options for carbon-based management in ML, emphasising the need for current and post-restoration management. In this regard, the author points out the uncertainty in global carbon stock estimations with current techniques, highlighting the need for continuous improvement of these techniques.

## 5. Conclusions

In this paper, a search has been carried out for analogous concepts to the term ML, concluding that there are different terms that are more commonly used for certain topics, being the term ML the one that encompasses them all. The meaning of this term has varied with respect to

the political, economic, socio-cultural and environmental context in which it has been used. The lack of a fixed definition has led to the term being used with an ad hoc and independent view of each paper, rather than a global one. In this paper, we proposed a definition that considers all these constraints, making a dynamic definition from a temporal point of view and independent of the geographical location in which it is applied.

RS is becoming a key element in the identification and management of ML, making its use indispensable in any large-scale study. In this sense, the biggest challenge facing remote sensing is that there is no visible spectral

response or pattern that is directly associated with ML. Therefore, studies that have considered its use for carbon identification, management or quantification have used different methodologies and sensors.

## Acknowledgements

This work was supported by the Spanish Ministerio de Economía, Industria y Competitividad through the scholarship for Training of Research Staff BES-2017-081920 and the European Commission through the H2020-MSCA-RISE-2018 MAIL project under Grant Agreement 823805.

## References

- AHLGREN, S., and DI LUCIA, L. 2014. Indirect land use changes of biofuel production—a review of modelling efforts and policy developments in the European Union. *Biotechnology for biofuels*, **7**, pp. 1–10.
- BALDOCK, D. 1996. *Farming at the Margins*. IEEP and LEI-DLO.
- BLANCO-CANQUI, H. 2016. Growing dedicated energy crops on marginal lands and ecosystem services. *Soil Science Society of America Journal*, **80**, pp. 845–858.
- BROWN, K. 1996. The utility of remote sensing technology in monitoring carbon sequestration agroforestry projects. Winrock International.
- CASTALDI, F., HUENI, A., CHABRILLAT, S., WARD, K., BUTTAFUOCO, G., BOMANS, B., VREYS, K., BRELL, M., and VAN WESEMAEL, B. 2019. Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **147**, pp. 267–282.
- CHAZDON, R. L. 2008. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, **320**, pp. 1458–1460.
- DAUBER, J., BROWN, C., FERNANDO, A. L., FINNAN, J., KRASUSKA, E., PONITKA, J., STYLES, D., THRÄN, D., VAN GROENIGEN, K. J., and WEIH, M. 2012. Bioenergy from “surplus” land: environmental and socio-economic implications. *BioRisk*, **7**(5).
- DIROCCO, T. L., RAMAGE, B. S., EVANS, S. G., and POTTS, M. D. 2014. Accountable accounting: Carbon-based management on marginal lands. *Forests*, **5**, pp. 847–861.
- DUAN, P., WANG, Y., and YIN, P. 2020. Remote sensing applications in monitoring of protected areas: A bibliometric analysis. *Remote Sensing*, **12**(772).
- EMERY, I., MUELLER, S., QIN, Z., and DUNN, J. B. 2017. Evaluating the potential of marginal land for cellulosic feedstock production and carbon sequestration in the United States. *Environmental science & technology*, **51**, pp. 733–741.
- GELFAND, I., SAHAJPAL, R., ZHANG, X., IZAURRALDE, R. C., GROSS, K. L., and ROBERTSON, G. P. 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, **493**(7433), pp. 514–517.
- GIULIANI, G., CHATENOUX, B., BENVENUTI, A., LACROIX, P., SANTORO, M., and MAZZETTI, P. 2020. Monitoring land degradation at national level using satellite Earth Observation time-series data to support SDG15—exploring the potential of data cube. *Big Earth Data*, **4**, pp. 3–22.
- HEIMLICH, R. E. 1989. Productivity and erodibility of US cropland. US Department of Agriculture, Economic Research Service.
- HERMOSILLA, T., DÍAZ-MANSO, J. M., RUIZ, L. A., RECIO, J. A., FERNÁNDEZ-SARRÍA, A., and FERRADÁNS-NOGUEIRA, P. 2012. Analysis of parcel-based image classification methods for monitoring the activities of the Land Bank of Galicia (Spain). *Applied Geomatics*, **4**, pp. 245–255.
- HOLLANDER, J. H. 1895. The concept of marginal rent. *The Quarterly Journal of Economics*, **9**, pp. 175–187.
- IMBRENDA, V., D’EMILIO, M., LANFREDI, M., RAGOSTA, M., and SIMONIELLO, T. 2014. Indicators of land degradation vulnerability due to anthropic factors: tools for an efficient planning. In *Sustainable Practices: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, IGI Global, pp. 1400–1413.
- JAMBECK, J. R., GEYER, R., WILCOX, C., SIEGLER, T. R., PERRYMAN, M., ANDRADY, A., NARAYAN, R., and LAW, K. L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, **347**, pp. 768–771.
- KANG, S., POST, W. M., NICHOLS, J. A., WANG, D., WEST, T. O., BANDARU, V., and IZAURRALDE, R. C. 2013. Marginal lands: concept, assessment and management. *Journal of Agricultural Science*, **5**, pp. 129.
- KOONIN, S. E. 2006. Getting serious about biofuels. *Science (New York, NY)*, **311**(5760), pp. 435–435.

- KRCMAR, E., VAN KOOTEN, G. C., and VERTINSKY, I. 2005. Managing forest and marginal agricultural land for multiple tradeoffs: compromising on economic, carbon and structural diversity objectives. *Ecological Modelling*, **185**, pp. 451–468.
- KURBANOV, E., VOROBYOV, O., GUBAYEV, A., MOSHKINA, L., and LEZHININ, S. 2007. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **22**, pp. 488–499.
- LAL, R. 1991. Tillage and agricultural sustainability. *Soil and Tillage Research*, **20**, pp. 133–146.
- LEISEROWITZ, A. 2007. International public opinion, perception, and understanding of global climate change. *Human development report*, 2008, pp. 1–40.
- LEWIS, S. M., and KELLY, M. 2014. Mapping the potential for biofuel production on marginal lands: differences in definitions, data and models across scales. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **3**, pp. 430–459.
- LIU, Q., LIU, G., HUANG, C., SHI, L., and ZHAO, J. 2015. Monitoring vegetation recovery at abandoned land. *2015 8th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, pp. 104–108.
- LIU, T., MA, Z., MCCONKEY, B., KULSHRESHTHA, S., HUFFMAN, T., GREEN, M., LIU, J., DU, Y., and SHANG, J. 2012. Bioenergy production potential on marginal land in Canada. *2012 First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, pp. 1–6.
- LIU, T. T., MCCONKEY, B. G., MA, Z. Y., LIU, Z. G., LI, X., and CHENG, L. L. 2011. Strengths, weaknessness, opportunities and threats analysis of bioenergy production on marginal land. *Energy Procedia*, **5**, pp. 2378–2386.
- LÖW, F., FLIEMANN, E., ABDULLAEV, I., CONRAD, C., and LAMERS, J. P. A. 2015. Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing. *Applied Geography*, **62**, pp. 377–390.
- MARTÍN-MARTÍN, A., ORDUNA-MALEA, E., THELWALL, M., and LÓPEZ-CÓZAR, E. D. 2018. Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of informetrics*, **12**, pp. 1160–1177.
- MEHRETU, A., PIGOZZI, B. W., and SOMMERS, L. M. 2000. Concepts in social and spatial marginality. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, **82**, pp. 89–101.
- MILBRANDT, A., and OVEREND, R. P. 2009. Assessment of biomass resources from marginal lands in APEC economies. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- MILENOV, P., VASSILEV, V., VASSILEVA, A., RADKOV, R., SAMOUNGI, V., DIMITROV, Z., and VICHEV, N. 2014. Monitoring of the risk of farmland abandonment as an efficient tool to assess the environmental and socio-economic impact of the Common Agriculture Policy. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, **32**, pp. 218–227.
- NALEPA, R. A., and BAUER, D. M. 2012. Marginal lands: the role of remote sensing in constructing landscapes for agrofuel development. *Journal of Peasant Studies*, **39**, pp. 403–422.
- PARROTTA, J. A., TURNBULL, J. W., and JONES, N. 1997. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, **99**, pp. 1–7.
- PETERSON, G. M., and GALBRAITH, J. K. 1932. The concept of marginal land. *Journal of Farm Economics*, **14**, pp. 295–310.
- POTTER, C., KLOOSTER, S., HIATT, S., FLADELAND, M., GENOVESE, V., and GROSS, P. 2007. Satellite-derived estimates of potential carbon sequestration through afforestation of agricultural lands in the United States. *Climatic Change*, **80**, pp. 323–336.
- QURESHI, A. S. 2017. Sustainable use of marginal lands to improve food security in the United Arab Emirates. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, **5**.
- RAY, T. W., FARR, T. G., BLOM, R. G., and CRIPPEN, R. E. 1993. Monitoring land use and degradation using satellite and airborne data.
- SCHRÖDER, P., BECKERS, B., DANIELS, S., GNÄDINGER, F., MAESTRI, E., MARMIROLI, N., MENCH, M., MILLAN, R., OBERMEIER, M. M., and OUSTRIÈRE, N. 2018. Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—a vision how to mobilize marginal lands. *Science of the total environment*, **616**, pp. 1101–1123.
- SCHROERS, J. O. 2006. Towards the development of marginal land use depending on the framework of agricultural market, policy and production techniques. University of Giessen, Germany.
- SCHWEERS, W., BAI, Z., CAMPBELL, E., HENNENBERG, K., FRITSCHÉ, U., MANG, H.-P., LUCAS, M., LI, Z., SCANLON, A., and CHEN, H. 2011. Identification of potential areas for biomass production in China: Discussion of a recent approach and future challenges. *Biomass and bioenergy*, **35**, pp. 2268–2279.



- SHORTALL, O. K. 2013. "Marginal land" for energy crops: Exploring definitions and embedded assumptions. *Energy Policy*, **62**, pp. 19–27.
- SILVER, W. L., OSTERTAG, R., and LUGO, A. E. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restoration ecology*, **8**, pp. 394–407.
- SUGRUE, A. 2008. Bioenergy production on marginal and degraded land: the potential social impacts. Issue Paper prepared for the Joint International Workshop on High Nature Value Criteria and Potential for Sustainable Use of Degraded Lands-June, 30.
- UNITED NATIONS. 2000. United Nations Millennium Declaration (A/RES/55/2). Available: [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_55\\_2.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_55_2.pdf) [6/17, 2021].
- UNITED NATIONS. 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). SDGs Transform Our World. Available: [https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E) [6/17, 2021].
- VERBURG, P. H., and OVERMARS, K. P. 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape ecology*, **24**, pp. 1167–1181.
- WIEGMANN, K., HENNENBERG, K. J., and FRITSCHE, U. R. 2008. Degraded land and sustainable bioenergy feedstock production. Joint international workshop on high nature value criteria and potential for sustainable use of degraded lands.
- WITMER, F., and O'LOUGHLIN, J. 2009. Satellite Data Methods and Application in the Evaluation of War Outcomes: Abandoned Agricultural Land in Bosnia-Herzegovina After the 1992–1995 Conflict. *Annals of the Association of American Geographers*, **99**, pp. 1033–1044.

# UTILIZACIÓN DE SERIES TEMPORALES DE ÍNDICES ESPECTRALES BASADOS EN TELEDETECCIÓN PARA EL MONITOREO DE CULTIVOS DE TOMATE *SOLANUM LYCOPERSICUM*

## USE OF TIME SERIES OF SPECTRAL INDICES BASED ON REMOTE SENSING FOR MONITORING *SOLANUM LYCOPERSICUM* TOMATO CROPS

Edier Fernando Ávila<sup>a,b,\*</sup>, Bibiana Royero<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. [edierfernando.avila@alumnos.upm.es](mailto:edierfernando.avila@alumnos.upm.es)

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Fusagasugá Colombia, Universidad de Cundinamarca, Colombia. [efernandoavila@ucundinamarca.edu.co](mailto:efernandoavila@ucundinamarca.edu.co); [broyero@ucundinamarca.edu.co](mailto:broyero@ucundinamarca.edu.co)

### Abstract:

The cultivation of tomato *solanum lycopersicum* is of great economic importance in Colombia, being Cundinamarca the fifth producing department of the country with an average of 371,827 tons for the year 2019. New emerging technologies such as precision agriculture applied to the agricultural sector represent an opportunity to monitor physiological processes. Through the application of Remote Sensing with aerial images taken by UAV unmanned aerial vehicles and time series calculations of plant indices such as the Green Chlorophyll Index (GCI), information on the production potential of the crop was quantified. The objective of this research was to extract relevant information from the production process in the batches, using Geomatic techniques. As results, the main batches with the highest production were identified, based on photosynthetic activity and growth height using a digital surface model, generated from the information obtained by photogrammetric flights. It was also possible to identify some microclimates generated in the lots, as a consequence of the difference in height found in the study area. As a final conclusion of achievement, obtain information and current characteristics of the plantation in order to make decisions in the next plantings.

**Key words:** remote sensing, plant indices, precision agriculture

### Resumen:

El cultivo de tomate *solanum lycopersicum* es de gran importancia económica en Colombia, siendo Cundinamarca el quinto departamento productor del país con un promedio de 371.827 toneladas para el año 2019. Las nuevas tecnologías emergentes como la agricultura de precisión aplicada al sector agrícola, representan una oportunidad para monitorear procesos fisiológicos. Mediante la aplicación de la teledetección con imágenes aéreas tomadas por vehículos aéreos no tripulados UAV y cálculos de series de tiempo de índices vegetales como el Green Chlorophyll Index (GCI), se cuantificó información sobre el potencial de producción del cultivo. El objetivo de la presente investigación fue extraer información relevante del proceso productivo en los lotes, mediante técnicas geomáticas. Como resultados se identificaron los principales lotes con mayor producción, basados en la actividad fotosintética y la altura de crecimiento utilizando un modelo digital de superficie, generado partir de la información obtenida por los vuelos fotogramétricos. También se pudo identificar algunos microclimas generados en los lotes, como consecuencia de la diferencia de altura encontrada en la zona de estudio. Como conclusión final se logró obtener información y características actuales de la plantación con el fin de tomar decisiones en las próximas siembras.

**Palabras clave:** teledetección, índices vegetales, agricultura de precisión

## 1. Introducción

La gestión de la información geográfica ha permeado casi todas las áreas de las ciencias tanto básicas como aplicadas. La consecución de los datos geo científicos en el campo de la agricultura, está tomando gran relevancia para la toma de decisiones a nivel de producción y optimización del recurso, tanto ambiental físico y económico.

Según pronosticó la FAO, será necesario aumentar la producción de alimentos para el 2050 en un 70% y en los

países en vías de desarrollo casi duplicarse para responder al crecimiento poblacional estimado en 9100 millones de personas (Radoglou-Grammatikis *et al.* 2020).

Para ello, los agricultores, las agremiaciones, la comunidad de investigación agrícola, y las empresas en general, requieren acceso a herramientas de alta precisión. Especialmente analizar y estimar áreas productivas, facilitar la toma de decisiones tempranas en el desarrollo de los cultivos (fertilización, podas, manejo sanitario) y obtener con ello, un mayor rendimiento

\* Corresponding Author: Edier Fernando Ávila, [efernandoavila@ucundinamarca.edu.co](mailto:efernandoavila@ucundinamarca.edu.co)

productivo y sostenibilidad ambiental y social (Srivastava *et al.* 2019).

Hoy en día el seguimiento a los campos agrícolas en Colombia, y en otros países en vía de desarrollo se realiza de una manera artesanal y empírica, recurriendo a la experiencia de los agricultores y a su percepción visual de las deficiencias en el cultivo. La detección de alteraciones en los cultivos como plagas y enfermedades, requieren gran esfuerzo en tiempo y en recurso. Además, los profesionales capacitados en estas áreas son escasos y pueden tomar decisiones subjetivas en términos agronómicos. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), equipados con sensores multispectrales, pueden disminuir el tiempo de recopilación de datos y reducir los costos operativos (Ampatzidis *et al.* 2020).

En la investigación realizada por (Deng *et al.* 2018), utilizaron cámaras multispectrales para recopilar información del cultivo de maíz, se comparó las precisiones de varios índices vegetales, sin embargo existen limitaciones a nivel general de estas técnicas en la adquisición, el procesamiento y la generación de datos.

Se reportan estudios con diseños experimentales en el campo de la agricultura de precisión, donde utilizando UAV, se obtuvo información a nivel submétrico del orden de 10 centímetros de píxel (Rokhmana 2015). Esta resolución espacial es ideal para el seguimiento y monitoreo de la salud de las plantas (Rokhmana 2015). También se reportan resultados a partir de modelos digitales de elevación (DEM), por sus siglas en inglés (Doering *et al.* 2014), para evaluar la topografía y la configuración del terreno donde se ubican plantaciones agrícolas.

Investigaciones recientes arrojan resultados donde identifican la calidad de las hojas en un cultivo, detectando hongos, y áreas infectadas mediante levantamientos topográficos, basado en el reconocimiento de patrones espectrales. Principalmente mediante la recolección de fotografías, que son tomadas por UAVs (Nakshmi *et al.* 2020). Los resultados arrojados detectan malezas, hojas secas y sanas en función de su actividad fotosintética.

Se puede estimar el vigor vegetativo de los cultivos a partir de índices vegetales I. V. y capas topográficas, lo cual permite resaltar aquellas áreas donde las plantas gozan de una alta actividad fotosintética (Modica *et al.* 2020). Se ha establecido diferentes I. V. para cultivos determinados, entre ellos está el índice, Green Chlorophyll Index (GCI). Esta técnica demuestra el potencial para rastrear remotamente el estado fisiológico de los cultivos (Gitelson *et al.* 2005).

En Argentina, mediante el sistema de telemetría, analizaron el manejo del riego por goteo de una parcela experimental del cultivo de tomate, en el que se aplicaron imágenes termográficas y multispectrales para apreciar condiciones de estrés hídrico en el cultivo aplicando Índices de vegetación diferenciada normalizada (NDVI), (Caparro *et al.* 2019).

En Colombia, las investigaciones y aplicaciones en el área agricultura de precisión son muy escasas, solo algunos centros investigativos y universidades han desarrollado algunas técnicas de monitoreo (Ávila *et al.* 2019).

La presente investigación pretende analizar mediante una serie de tiempo de imágenes tomadas por UAV, el índice de vegetación GCI aplicado a una plantación de tomate (*Solanum lycopersicum*). Este índice aporta información relevante en el comportamiento de la actividad fotosintética de los cultivos, lo cual repercute en la producción agrícola de la parcela (Gitelson *et al.* 2005).

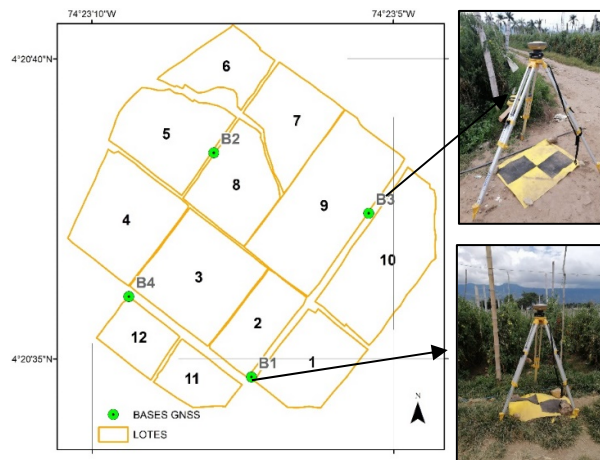
## 2. Método

La zona de estudio se ubica en el municipio de Fusagasugá y Silvania Cundinamarca, con coordenadas geográficas latitud 4.344 grados decimales y longitud oeste de -74.385 grados decimales. Posee una topografía relativamente plana y un área aproximada de 2.47 Hectáreas dividida en 12 lotes productivos.

Se utilizó un cuadricoptero agrícola de la serie Parrot Bluegrass Fields, con cámara multispectral Parrot Sequoia. Este instrumento contiene cuatro bandas multispectrales en verde 550 nm, rojo 660 nm, borde rojo 735 nm e infrarrojo cercano con 790 nm.

### 2.1. Georeferenciación de la parcela

Como primera etapa de la investigación, se garantizó la exactitud posicional y altimétrica (altura elipsoidal) de los diferentes vuelos realizados. Es así, que se navegaron y materializaron cuatro puntos con tecnología de sistema de navegación global por satelital GNSS, los cuales se ajustaron con archivos Rinex (Receiver INdependent EXchange) de la estación Boga (IGAC 2021) perteneciente al Instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC (Fig. 1).



**Figura 1:** Descripción general de la zona de estudio y ubicación de los puntos GNSS.

Para la adquisición de los datos GNSS se utilizaron antenas Topcon de la serie Hiper SR, las cuales son de una frecuencia L1, y pueden recolectar datos de las constelaciones GPS y GLONAS.

### 2.2. Postproceso de los datos navegados GNSS

El postproceso de los datos navegados con las antenas Hiper SR (Topcon 2021), se realizó en el software Topcon Tools. Cada punto se navegó aproximadamente tres horas que es el estándar según la normatividad del IGAC para Colombia. En la Figura 2 se observa el tiempo de

recepción de la señal en las Bases B1 y B2. Al postprocesar los cuatro puntos B1, B2, B3, B4, se obtuvieron muy buenos resultados en planimetría y la altura elipsoidal, según se muestra en la Tabla 1.

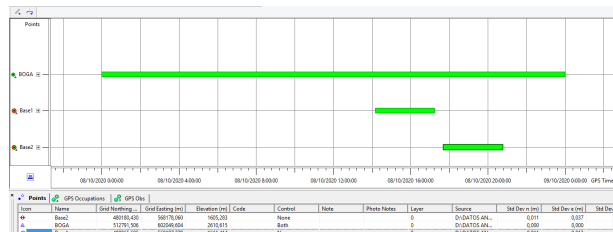


Figura 2: Visual del ajuste a la navegación de los puntos B1 y B2 en software Topcon Tools.

Tabla 1: Resultados de las coordenadas de los cuatro puntos navegados ya ajustados.

Base	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m)	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)
B1	480065.60	568197.27	1611.41	0.01	0.02
B2	480180.43	568178.06	1605.28	0.03	0.02
B3	480149.44	568257.18	1612.56	0.01	0.02
B4	480106.80	568134.64	1609.98	0.02	0.03

Los datos de la Tabla 1, son importantes dentro de la generación de los ortofotomosaicos de cada vuelo fotogramétrico, con el fin de buscar una relación espacial de superposición temática pixel a pixel. Se observa en los datos de la Tabla 1, que poseen una exactitud milimétrica con un máximo de error en el punto B3 de 3 centímetros en planimetría.

### 2.3. Realización de los vuelos fotogramétricos

Una vez obtenidas las coordenadas ajustadas, se procede con la realización de los vuelos fotogramétricos sobre el cultivo de tomate. En la Tabla 2, se observa las fechas de realización, partiendo como fecha de siembra del cultivo la segunda semana del mes de mayo del 2020.

Para la realización de los vuelos fotogramétricos, se garantizó en lo posible tener las mismas condiciones atmosféricas y técnicas para el pilotaje de la aeronave, la cual se realizó de forma automática, teniendo los mismos parámetros de recubrimiento o traslape tanto horizontal como vertical. También se conservó la misma resolución espacial y líneas de vuelo como se observa en la Figura 3 y Tabla 2.

### 2.4. Cálculo del índice vegetal GCI

Después de realizado cada vuelo fotogramétrico, se calculó el índice vegetal Green Chlorophyll Index (GCI) (Ec. 1). Este índice según varios estudios, es un buen indicador del contenido de clorofila en el dosel (Wu *et al.* 2012). El índice relaciona las bandas verdes e infrarrojas cercanas, lo cual, es importante en el monitoreo de la actividad fotosintética de las plantas (Gitelson *et al.* 2005). Los mapas derivados de este índice pueden observarse en la Figura 4.

$$GCI = \left( \frac{NIR}{VERDE} \right) - 1 \quad (1)$$

Donde:

$NIR$  = Longitud de onda del Infrarrojo cercano

$VERDE$  = Longitud de onda del verde

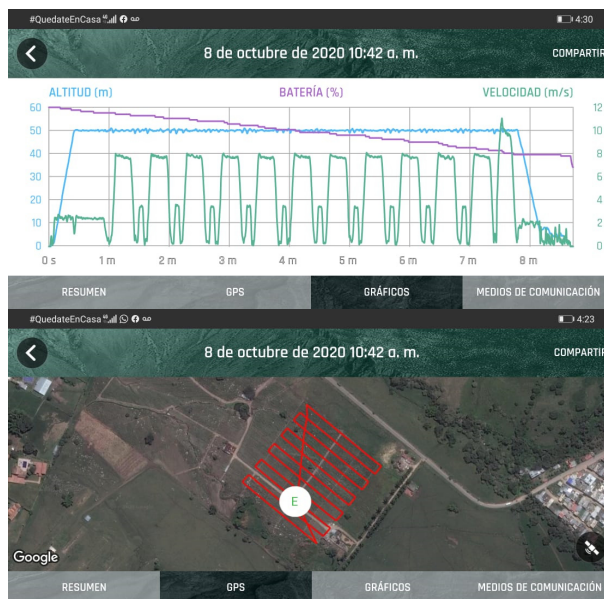


Figura 3: Visual del plan de vuelo y parámetros de las líneas de vuelo sobre el cultivo de tomate.

Tabla 2: Descripción de los seis vuelos realizados en el cultivo de tomate.

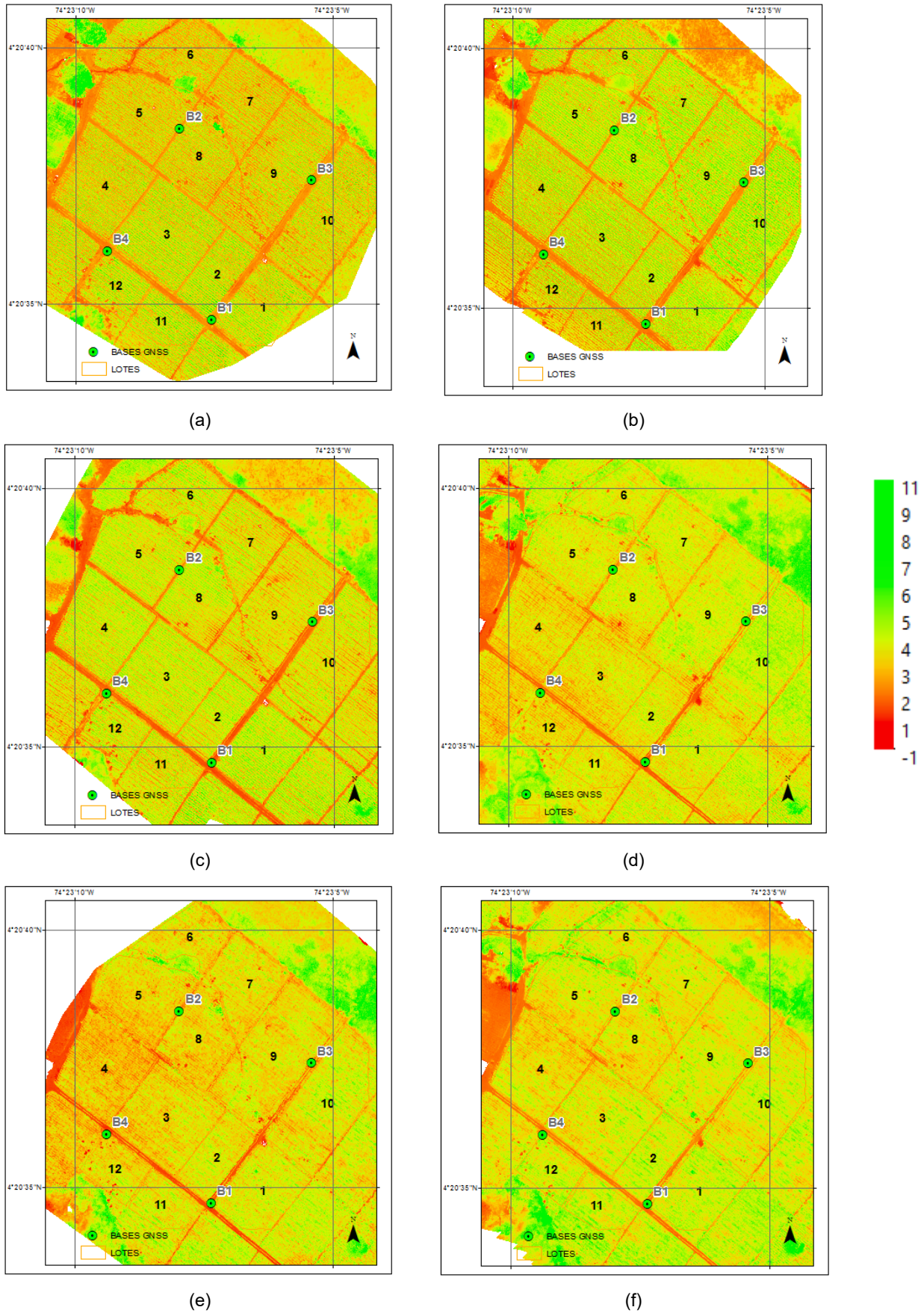
Vuelo	Fecha	Fotografías	Altura (m)	GSD (m)	Días
1	23/06/2020	600	50	0.06	0
2	07/07/2020	912	40	0.04	14
3	31/07/2020	524	60	0.06	24
4	24/09/2020	796	60	0.06	55
5	08/10/2020	752	50	0.05	14
6	13/10/2020	1104	50	0.05	5

En la anterior serie temporal del índice vegetal GCI (Ec. 1), se observa el comportamiento espectral vegetativo del cultivo de tomate. A mayor valor se deduce que contiene una alta actividad fotosintética, lo que se observa en el vuelo 2 (Fig. 4b), donde hay un máximo visual de contraste del contenido de clorofila.

### 2.5. Generación del modelo digital de superficie (DSM)

Con los puntos georeferenciados B1, B2, B3, B4 y una exactitud milimétrica, se generó en la investigación el Modelo Digital de Superficie MDS de la zona de cultivos. Esta información es de vital importancia ya que se puede correlacionar la actividad fotosintética con la altura que desarrolla la planta, consiguiendo realizar predicciones de rendimiento (Maes and Steppe 2019).





**Figura 4:** Visual del cálculo de la serie de tiempo del índice Vegetal GCI: a) Vuelo 1; b) Vuelo 2; c) Vuelo 3; d) Vuelo 4; ) Vuelo 5; f) Vuelo 6.

### 3. Resultados y discusión

Como resultado principal de la investigación se obtiene el promedio del comportamiento o caracterización de índice vegetal GCI (Ec. 1), en los diferentes momentos o series de tiempo por cada lote productivo. Una alta actividad fotosintética, información que arroja el estudio puede asociarse a una mayor productividad. Esta información es relevante en cuanto a las variaciones del contenido de clorofila que podrían predecir el rendimiento de los lotes de cultivo.

El valor del índice GCI es variable durante el periodo del cultivo en función al estado fenológico de las plantas y las diferentes variables ambientales, nutricionales, sanitarias que afectan al mismo, entre otras.

Se evidencia, en las Figuras 4 y 5 una correlación visual entre la actividad clorofílica de los lotes de mayor productividad y la altura de la planta. Para esta investigación no se tomaron datos de luminosidad o radiación solar, sería interesante para próximas aplicaciones tener en cuenta esta variable. Se infiere que los lotes con un desnivel topográfico más bajo o menos altura elipsoidal, tienden a tener menor valor de GCI, por ejemplo el lote 4 tuvo una suma total de GCI de 16, con respecto al lote 2 que tuvo un valor de 18.1, según la Tabla 3. Estos valores son adimensionales, lo que presume la generación de microclimas dentro de todo el sembradío. Estos desniveles pueden conllevar una alta humedad que favorece procesos infecciosos y ciclos reproductivos de hongos como *Mildiu Phytophthora infestans* y bacterias como la peca bacteriana *Pseudomonas syringae* presentes en este cultivo. Esto afecta severamente la producción de algunos lotes como se evidencia en la Tabla 3, con los lotes 9, 12 y 4.

**Tabla 3:** Ubicación del lote en función del valor del Índice vegetal GCI.

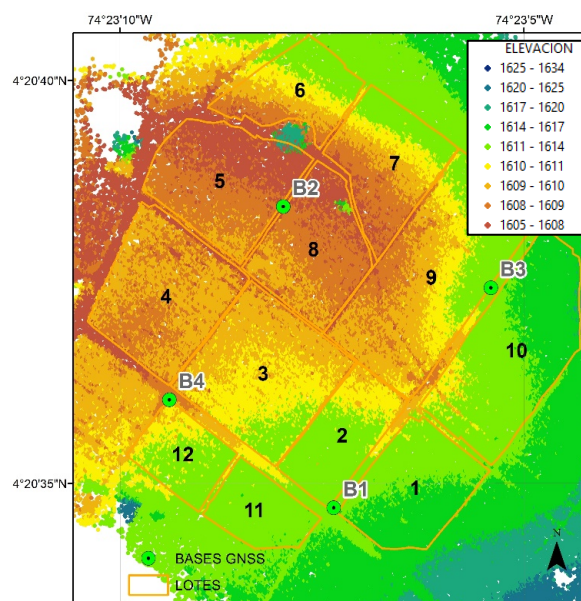
Lote	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	Suma GCI	Prod. (%)
L1	2.4	3.7	3.9	3.2	3.1	3.0	19.6	100.0
L10	2.1	3.9	3.3	3.6	3.0	2.7	18.8	96.0
L2	2.4	3.2	3.5	3.0	2.9	2.8	18.1	92.7
L11	2.6	2.9	3.3	2.9	3.0	2.9	17.9	91.4
L5	1.9	3.6	3.6	3.1	2.6	2.5	17.5	89.7
L6	1.8	3.3	3.4	3.2	2.9	2.7	17.5	89.6
L3	2.4	3.3	3.6	2.7	2.6	2.6	17.4	89.1
L7	1.8	3.5	3.2	3.1	2.8	2.5	17.2	88.0
L8	2.0	3.7	3.4	3.0	2.6	2.3	17.2	87.8
L9	1.9	3.5	2.9	3.2	2.7	2.6	17.1	87.6
L12	2.4	2.8	3.3	2.6	2.8	2.8	17.0	86.7
L4	2.0	3.1	3.6	2.6	2.2	2.3	16.0	82.0

Como resultado de la investigación, los lotes más productivos tuvieron mayores valores del índice vegetal GCI o fueron estables en un periodo de tiempo. Aplicando la Ec. (2), se obtiene la Tabla 3.

$$\lim_{GCI \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^6 GCI_n \approx \text{Alta productividad del lote} \quad (2)$$

Donde:

$GCI_n$  = El valor del índice GCI en el vuelo  $n$  por cada lote de producción



**Figura 5:** Modelo Digital de Elevación zona de estudio.

En el desarrollo de la fórmula anterior, se sumaron los valores promedios del índice GCI, en cada lote por cada vuelo, y la connotación de "límite", se aplica porque no conocemos un valor máximo del índice y lo que se busca, es encontrar ese máximo que traduce en una alta actividad fotosintética.

Como resultado de (2), se caracterizó los lotes de mayor porcentaje de producción en función del índice GCI, como lo muestra la Tabla 3 y Figura 5.

La columna Prod. de la Tabla 3, está calculada porcentualmente, en función del lote de máximo valor del índice GCI, asociando el valor de mayor índice como el 100%.

Este resultado fue contrastado con el administrador del cultivo, quien validó la información confirmando a los lotes 1 y 10 como "los más productivos". No fue posible obtener los valores de la producción por lote, ya que el mecanismo de cosecha del tomate es el número de kilos/finca y no la producción de cada lote de cultivo.

Se graficaron los promedios de GCI por cada lote, obteniendo una serie temporal, que puede observarse en la Figura 6. En esta gráfica se evidencia una tendencia a la baja del valor del índice GCI en particular para los últimos vuelos que coincide con el ciclo del cultivo. Esta información se genera como resultado del cambio en la edad fisiológica de la planta, la cual a medida que envejece disminuye su capacidad para realizar fotosíntesis y acelera la degradación de las clorofilas (Barraza *et al.* 2004). Las hojas jóvenes se convierten en depósito preferencial para donde se exportan los nutrientes, limitándolos en las hojas más senescentes (Cayón 1992; Morales 2013).



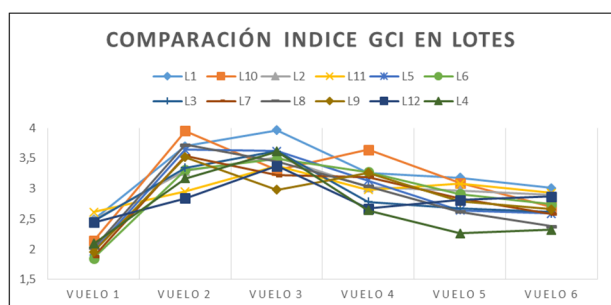


Figura 6: Serie temporal del índice GCI en los diferentes vuelos fotogramétricos.

Como se observa en la Figura 6, en el vuelo 2 de fecha 07/07/2020, el cultivo de tomate tiene 70 días de sembrado aproximadamente. En esta etapa del crecimiento de su fase vegetativa y de desarrollo floral alcanza su máxima actividad fotosintética según los datos del GCI. Después de este periodo comienza un descenso paulatino, que coincide con la aparición de problemas fitosanitarios en el cultivo y posteriormente con etapas fenológicas de menor eficiencia fotosintética.

En la Figura 7, se grafica una primera aproximación a la serie temporal del Índice Vegetal GCI, del cultivo de tomate. Estos datos modelan el comportamiento del índice GCI en función del crecimiento del cultivo. Este resultado es relevante para próximas cosechas, ya que se puede inferir una producción aproximada, según el valor del índice GCI. Se recomienda para próximos estudios de índices, tomar varios datos temporales, con el fin de obtener una curva robusta estadísticamente.

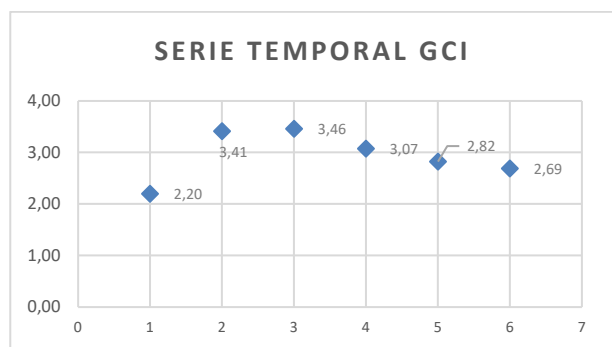


Figura 7: Aproximación de la función Índice Vegetal GCI.

Es importante destacar que esta investigación se realizó en un monocultivo de tomate a libre exposición destinado

a la producción a pequeña escala y no a la investigación. Debido a esto, no se controlaron algunas variables como la prescripción agronómica, dirección de los surcos en relación a factores medioambientales, el manejo nutricional y fitosanitario, la aplicación de fitohormonas entre otros. Estas variables dificultan la interpretación de los cambios en los resultados de la información espectral, y por ende limitan en alguna medida los alcances de esta herramienta en la gestión del cultivo. Por ello, es recomendable incorporar el uso de sensores clima-planta-suelo instalados directamente en campo, para obtener mayor información, que facilite la toma de decisiones de los agricultores y agrónomos en campo.

#### 4. Conclusiones

Con el desarrollo de la presente investigación, se realiza un aporte a las técnicas de la agricultura de precisión. Este aporte consisten en modelar una producción agrícola en función de la intensidad de la energía radiada por el cultivo. Con esta información los agricultores pueden monitorear la actividad fotosintética, y tomar decisiones a tiempo en cuanto a su fertilización y aplicación de agroquímicos, con el fin obtener una producción máxima en los cultivos de tomate *solanum lycopersicum*.

Se propone tomar imágenes con mayor frecuencia, antes de los 60 días después de la siembra, ya que los datos muestran una tendencia rápida al incremento de la actividad fotosintética, y es en esta parte del proceso productivo cuando se debe tener precaución en el cuidado y fortalecimiento de la planta.

Con la realización de este tipo de investigación, que son novedosas, en el campo de la agricultura en Colombia y más exactamente en Silvania, se realiza un aporte a la planificación y racionamiento en la aplicación de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades en los cultivos, disminuyendo los contaminantes generados por la actividad agrícola.

#### Agradecimientos

Se agradece al grupo de investigación geocartografía, y al proyecto de investigación "Herramienta geoespacial para la construcción del diagnóstico socioambiental del Plan de Desarrollo Territorial del municipio de Silvania - Cundinamarca.", código 63546, convocatoria Colciencias 2018.

#### References

AMPATZIDIS, Y., PARTEL, V., and COSTA, L., 2020. Agrovieo: Cloud-based application to process, analyze and visualize UAV-collected data for precision agriculture applications utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*, **174**(February), 105457. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105457

ÁVILA, E. F., ESCOBAR, N., and MORANTES, C. F., 2019. Applying satellite images to spectral signature development of maize production (*Zea mays* L.) under colombia's middle tropics conditions. *Entramado*, **15**(2), pp. 256–262. DOI: 10.18041/1900-3803/entramado.2.5734

BARRAZA, F. V., FISCHER, G., and CARDONA, C. E., 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana*, **22**(1), pp. 81-90.

CAPRARO, F., TOSETTI, S., MUT, V., CAMPILLO, P., OLGUÍN, A., and PACHECO, D., 2019. Implementación del sistema "Telemetría Agrícola" para el manejo y análisis de estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de tomate. In *XI Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 48* (Salta, 2019).

- CAYÓN, G., 1992. Fotosíntesis y productividad de cultivos. *Revista COMALFI* **19**(2), pp. 23-31.
- DENG, L., MAO, Z., LI, X., HU, Z., DUAN, F., and YAN, Y., 2018. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **146**(September), pp. 124–136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008
- DOERING, D., BENENMANN, A., LERM, R., DE FREITAS, E. P., MULLER, I., WINTER, J. M., and PEREIRA, C. E., 2014. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 19). DOI: 10.3182/20140824-6-za-1003.02261
- GITELSON, A. A., VINA, A., CIGANDA, V., RUNDQUIST, D. C., and ARKEBAUER, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, **32**(8). DOI: 10.1029/2005GL022688
- IGAC 2021. Datos Abiertos IGAC | GEOPORTAL. Available: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/geodesia-archivos-en-formato-rinex-estaciones-red-magna-eco> [1/09, 2021].
- MAES, W. H., and STEPPE, K., 2019. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, **24**(2), pp. 152–164. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.007
- MODICA, G., MESSINA, G., DE LUCA, G., FIOZZO, V., and PRATICÒ, S., 2020. Monitoring the vegetation vigor in heterogeneous citrus and olive orchards. A multiscale object-based approach to extract trees' crowns from UAV multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, **175**(February), 105500. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105500
- MORALES, D., 2013. Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Amalia). *Cultivos tropicales*, **27**(1), pp. 45-48.
- NAKSHMI, J. V. N., HEMANTH, K. S., and BHARATH, J., 2020. Optimizing Quality and Outputs by Improving Variable Rate Prescriptions in Agriculture using UAVs. *Procedia Computer Science*, **167**(Iccids 2019), pp. 1981–1990. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.229
- RADOGLU-GRAMMATIKIS, P., SARIGIANNIDIS, P., LAGKAS, T., and MOSCHOLIOS, I., 2020. A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, **172**(February), 107148. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107148
- ROKHMANA, C. A., 2015. The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, **24**, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.03.032
- SRIVASTAVA, K., BHUTORIA, A. J., SHARMA, J. K., SINHA, A., and PANDEY, P. C., 2019. UAVs technology for the development of GUI based application for precision agriculture and environmental research. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **16**(May), 100258. DOI: 10.1016/j.rsase.2019.100258
- TOPCON 2021. HiPer SR - Receptor GNSS ligero y compacto | Topcon Positioning Systems, Inc. Available: <https://www.topconpositioning.com/es/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-sr#panel-product-specifications> [1/09, 2021].
- WU, C., NIU, Z., and GAO, S., 2012. The potential of the satellite derived green chlorophyll index for estimating midday light use efficiency in maize, coniferous forest and grassland. *Ecological Indicators*, **14**(1), pp. 66–73. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.08.018



## ESPECTROMETRÍA DE IMAGEN PARA EL ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

### IMAGE SPECTROMETRY FOR THE STUDY AND CHARACTERIZATION OF CONTAMINATION BY HEAVY METALS

Francisco Cabrera-Torres<sup>a,b,\*</sup>, Mercedes Farjas-Abadía<sup>a</sup>, Juan Gregorio Rejas-Ayuga<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid, España. [fd.cabrera@alumnos.upm.es](mailto:fd.cabrera@alumnos.upm.es); [m.farjas@upm.es](mailto:m.farjas@upm.es)

<sup>b</sup> Instituto Geográfico Militar, IGM, 170413 Quito, Ecuador. [francesco\\_c7@hotmail.com](mailto:francesco_c7@hotmail.com)

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España. [juangregorio.rejas@upm.es](mailto:juangregorio.rejas@upm.es)

<sup>d</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA, 28850 Torrejón de Ardoz, España. [rejasaj@inta.es](mailto:rejasaj@inta.es)

#### Abstract:

Environmental degradation or contamination is subject to the presence of heavy metals such as: arsenic, cadmium, mercury, nickel, lead, etc., which may have a geogenic (natural) or anthropogenic origin (produced by hazardous waste), the latter bring with them negative consequences for human health, due to the bioaccumulation of trace elements. Today, spectrometric techniques, through the integration of geospatial technologies and multi-source data, are considered an alternative to traditional field sampling methods, and their use is gaining strength every day. This article uses the so-called “Crosta technique” to detect the presence of characteristic minerals existing in the Southeast Regional Park of the Autonomous Community of Madrid, and, on the other hand, to locate the existence of heavy metals. In a qualitative evaluation, applying the “Crosta composition”, a high concordance between the minerals bentonite and sepiolite is evidenced with the official contrast cartography, from the Geological and Mining Institute of Spain, in addition, a slight modification was made in the input bands of the “Crosta composition”, obtaining an overestimation of the minerals. Finally, by means of a visual interpretation of those main components that contain the spectral information related to heavy metals, a list of coordinates was generated, which will be validated in field campaigns, where the use of spectroradiometers and the chemical analysis of samples will be key to determine the goodness of the results.

**Key words:** remote sensing, heavy metals, imaging spectrometry, geospatial technologies, spectral characterization, advanced geomatics

#### Resumen:

La degradación o contaminación ambiental se encuentra sujeta a la presencia de metales pesados como: arsénico, cadmio, mercurio, níquel, plomo, etc., los cuales pueden tener origen geogénico (natural) o antropogénico (producidos por residuos peligrosos), estos últimos, traen consigo consecuencias negativas para la salud humana, debido a la bioacumulación de elementos traza. Hoy en día, las técnicas espectrométricas, mediante la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente, son consideradas como una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo de campo, y su empleo cada día cobra más fuerza. El presente artículo, emplea la denominada “técnica de Crosta” para detectar la presencia de minerales característicos existentes en el Parque Regional del Sureste de la Comunidad Autónoma de Madrid, y, por otro lado, para localizar la existencia de metales pesados. De manera cualitativa, aplicando la “composición Crosta”, se evidencia una alta concordancia entre los minerales bentonita y sepiolita con la cartografía oficial de contraste, procedente del Instituto Geológico y Minero de España, además, se realizó una leve modificación en las bandas de entrada de la “composición Crosta”, obteniendo una sobre estimación de los minerales. Por último, mediante una interpretación visual de aquellas componentes principales que contienen la información espectral relativa a metales pesados, se generó un listado de coordenadas, las cuales serán validadas en campañas de campo, en donde el uso de espectroradiómetros y el análisis químico de muestras serán claves para determinar la bondad de los resultados.

**Palabras clave:** teledetección, metales pesados, espectrometría de imagen, tecnologías geoespaciales, caracterización espectral, geomática avanzada

### 1. Introducción

Los metales pesados se caracterizan por presentar una densidad mayor que 4 g/cm<sup>3</sup> y son considerados

contaminantes prioritarios debido a su no degradabilidad y su larga persistencia en el ambiente. Su origen puede ser geogénico, procedentes de la meteorización de la roca madre, actividad volcánica o lixiviado de mineralizaciones, o de origen antropogénico, producto de

\* Corresponding Author: Francisco Cabrera-Torres, [francesco\\_c7@hotmail.com](mailto:francesco_c7@hotmail.com)

residuos peligrosos derivados de actividades: industriales, mineras, agrícolas, etc., y de residuos sólidos urbanos. Algunos elementos son transportados y distribuidos a los ecosistemas, e incorporados en la cadena trófica (Durães *et al.* 2017; Galán and Romero 2008; Londoño *et al.* 2016).

La falta de control de emisiones de estos residuos puede traer consigo consecuencias negativas para la salud humana, debido a la bioacumulación de elementos traza, originada por su incremento dentro del sistema alimenticio o por el consumo en bajas cantidades en un largo periodo de tiempo, trayendo como consecuencia enfermedades crónicas, incapacidad o la muerte (Siegel 2002). Las primeras evidencias de personas afectadas se encontraron en Japón, debido a la contaminación de metilmercurio en los años 50 y de Cd en los 60, además, en la India, entre los años 80 y 90, el As generó un estado de alarma entre sus pobladores (Adriano 2001).

De manera similar, la presencia de elementos traza en el suelo genera una modificación negativa denominada degradación o contaminación, y en la vegetación genera estrés, ocasionando cambios metabólicos y morfológicos considerables (Arellano *et al.* 2015; Davids and Tyler 2003; Galán and Romero 2008).

Hoy en día, una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo de campo, es a través de la espectrometría, mediante el uso de imágenes (satelitales o aerotransportadas) o espectroradiómetros, la cual permite identificar longitudes de onda diagnóstico de los metales pesados, así como diferencias de reflectancias por parte de los diferentes objetivos afectados por estos elementos (Arellano *et al.* 2015; Rosso *et al.* 2005). Shin *et al.* (2020) consideran a la espectrometría como no destructiva, rentable, repetible y como un método efectivo a la hora de determinar concentraciones de metales pesados en suelos.

Esta técnica tiene un amplio beneficio para estudios de agricultura de precisión, permitiendo a los agricultores refinar la fertilización, evaluar el estado nutricional de los cultivos, controlar la irrigación y/o detectar cambios fisiológicos en las especies vegetales por plagas o enfermedades, a partir de índices de vegetación, útiles para la determinación de parámetros agroforestales (actividad fotosintética, estrés hídrico, nivel de productividad, etc.) (Meza *et al.* 2020; Soca *et al.* 2020).

Varias técnicas espectrométricas son empleadas para la exploración e identificación de bandas sensibles a diferentes elementos químicos, por ejemplo, índices espectrales de diferencia normalizada (Das *et al.* 2020; Yao *et al.* 2010), y análisis de componentes principales (ACP) mediante "técnica de Crosta" (Rejas *et al.* 2014; Bragado *et al.* 2009).

Haciendo hincapié en la "técnica de Crosta", la misma fue desarrollada por Crosta y Moore en el año de 1989, y perfeccionada por Loughlin, en 1991, es considerada como una técnica rápida, robusta y fiable, la cual se basa en la transformación de componentes principales (CP) y en el análisis de las cargas factoriales de los vectores propios (Loughlin 1991).

La reducción en la entrada del número de bandas de la imagen, propuesta por Loughlin (1991), aumenta la probabilidad de que los objetivos o materiales de interés puedan ser mapeados. De manera específica, esta

técnica parte de la selección de bandas o longitudes de onda, las cuales presentan rasgos distintivos de absorptividad y reflectividad (Crósta *et al.* 2003; Bragado *et al.* 2009).

En función de lo descrito anteriormente, el objetivo del presente artículo es estudiar y caracterizar los minerales que contienen metales pesados mediante el empleo de la "técnica de Crosta", haciendo uso de imágenes procedentes del programa Copernicus, por ende, en los capítulos subsiguientes se describe el diseño experimental en base al estado de situación actual de la investigación.

## 2. Zona de estudio

La zona de estudio seleccionada corresponde al Parque Regional del Sureste (PRS) de la Comunidad Autónoma de Madrid (Fig. 1), debido a varios factores, uno de ellos corresponde a la existencia de un elevado número de canteras, además, existen reportes en prensa y foros, de diferentes fechas, en donde resaltan la contaminación que sufre el PRS (Castillejo 2019; Fonseca 2016), por último, la disponibilidad de geoinformación existente (cartografía temática, imágenes satelitales, etc.).

El PRS posee una superficie de 314,72 km<sup>2</sup>, extendiéndose de norte a sur, desde San Fernando de Henares hasta Ciempozuelos. En cuanto al aspecto físico se pueden diferenciar claramente dos unidades ambientales, la primera asociada a los relieves colinados terciarios, donde las zonas menores a 650 msnm presentan litologías asociadas a yesos, margas, sepiolita y arenas micáceas, y las superiores presentan calizas dolomíticas y sílex, y la segunda unidad hace referencia a los valles y terrazas aluviales, compuestos principalmente de gravas, arenas y arcillas (IGME 1998).

En cuanto a la cobertura vegetal priman los cultivos herbáceos sobre los valles o terrazas aluviales, al oeste del río Jarama se los encuentra asociados con pastizales y matorrales, y en los relieves colinados terciarios ubicados al sur del río Tajuña y al este de Arganda del Rey se asocian con cultivos como olivares y viñedos. A lo largo de toda la zona de estudio es característico encontrar áreas de extracción (canteras) y vertederos (IGN 2011).

En el aspecto fluvial se evidencia que los ríos Manzanares (atraviesa la ciudad de Madrid de noroeste a sureste), Henares, Tajuña y Tajo desembocan en el río Jarama (~30 m<sup>3</sup>/s), siendo el más representativo de esta unidad, ya que recorre longitudinalmente el PRS.

## 3. Caracterización y transformación de imagen

### 3.1. Materiales

Para la realización de esta fase del estudio se empleó geoinformación de acceso libre (Tabla 1), proveniente de organismos oficiales, la misma fue estandarizada bajo un mismo sistema de referencia (WGS84 UTM Z30N) y enmarcada en función del límite del PRS.

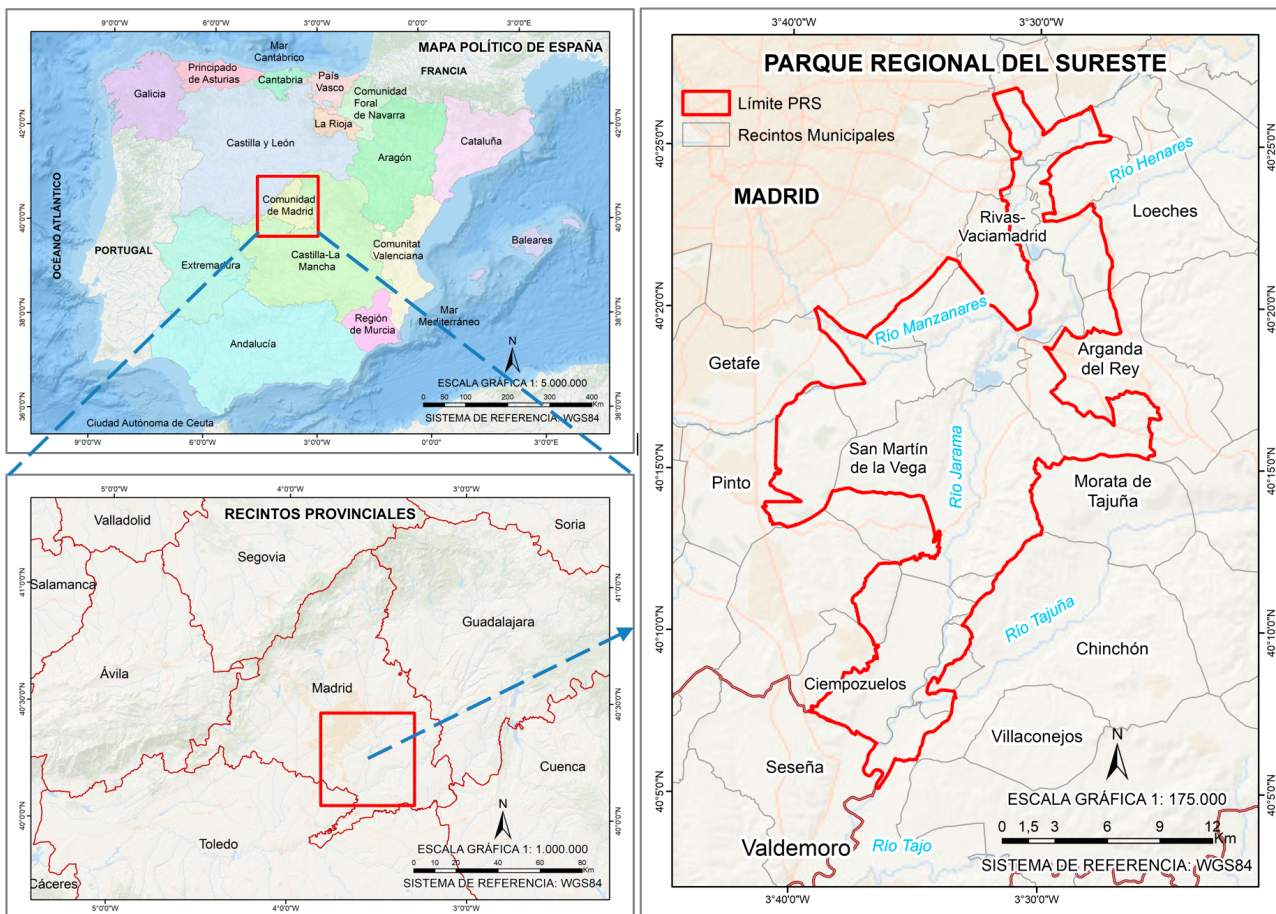


Figura 1: Localización del Parque Regional del Sureste. Fuente cartográfica: (IGN 2019; CM 2019).

Tabla 1: Fuentes de geoinformación. \*Bottom of Atmosphere reflectance images (p BOA). \*\*Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE).

Cobertura	Organismo	Descripción
Imágenes Sentinel-2	European Space Agency (ESA)	Fecha: 03/01/2021; Formato: .jp2; Tipo: L2A (p BOA*)
Límites administrativos	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Fecha: 01/02/2019; Formato: .shp
Límite del PRS	Datos abiertos de la Comunidad de Madrid (CM)	Fecha: 18/03/2019; Formato: .shp
Mapa geológico, metalogenético, y rx industriales	Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	Años: 1972 – 2003; Formato: .jpg; Esc: 50, 200 y 400k
SIOSE**	IGN	Año: 2011; Formato: .shp; Esc: 25k
Banco de firmas espectrales	Jet Propulsion Laboratory (JPL) y United States Geological Survey (USGS)	Formato: .asc; Longitud de onda: 0.4 a 2.5 µm

### 3.2. Técnica de Crosta

Los minerales con mayor abundancia en el PRS son la bentonita (compuesta por ~92% de montmorillonita) y la sepiolita (de la familia de los filosilicatos) en base a las cartas geológicas del IGME (1998), los cuales fueron seleccionados para demostrar el flujo de procesos de la técnica en estudio. Para esto, preliminarmente se extrae del banco de firmas espectrales (Fig. 2), dos longitudes de onda absorbivas y dos reflectivas de cada mineral, dichas longitudes deben ser análogas a las bandas en las que opera el Sentinel-2, como se expone en la Tabla 2.

Cabe mencionar que, las bandas 11 (reflexión) y 12 (absorción) exhiben el mayor contraste espectral en

ambos casos, esto permitirá hallar la CP adecuada derivada de la transformación lineal, denominándose imagen B para la bentonita e imagen S para el caso de la sepiolita. Dicho hallazgo se sustenta en el análisis de los signos y cargas factoriales presentes en la matriz de vectores propios. Se debe considerar que, la CP1 corresponde al brillo de la escena, la CP2 describe el contraste entre grupo de bandas, por ende, el análisis per se recae sobre la CP3 y CP4, seleccionando preferencialmente aquella PC con cargas fuertes y signos opuestos (Loughlin 1991; Rejas *et al.* 2014).

Una vez seleccionadas las CP, se vincula al canal rojo la imagen B, al canal azul la imagen S, y para el canal verde se procede a calcular la imagen mediante la operación



( $BxS$ ), la cual presenta una leve modificación a la “composición Crosta” original. Los resultados fueron presentados visualmente en el plano RGB, siendo esta una manera usual de hacerlo. Cabe mencionar que, la modificación implementada tiene por finalidad resaltar características o elementos específicos en la zona de estudio mediante el empleo de nuevos algoritmos.

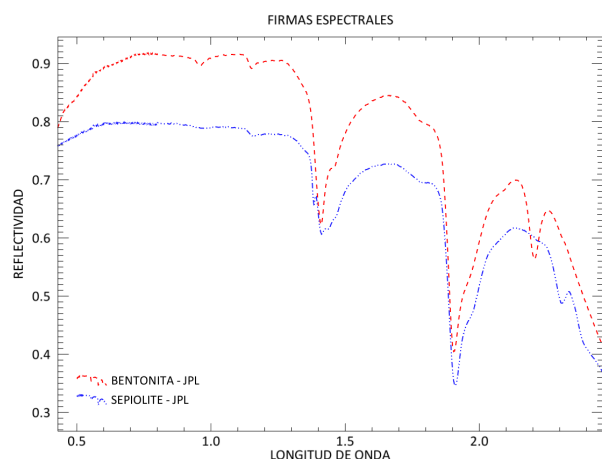


Figura 2: Firmas espectrales tipo. Fuente: (JPL 2018).

Tabla 2: Bandas absorbivas y reflectivas de Sentinel-2 empleadas en el ACP para la detección de bentonita y sepiolita.

Mineral	Absortividad	Reflectividad
Bentonita	B9 (945 nm)	B7 (783 nm)
	B12 (2190 nm)	B11 (1610 nm)
Sepiolita	B3 (560 nm)	B5 (705 nm)
	B12 (2190 nm)	B11 (1610 nm)

Todo el proceso descrito en este apartado fue aplicado para la detección de los siguientes metales pesados: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn, los cuales se consideran como muy tóxicos, fácilmente disponibles y fácilmente movilizados por la actividad humana (Galán and Romero 2008). Para esto se analizó la importancia geológica-económica con la finalidad de seleccionar minerales que contienen estos elementos traza y presenten rasgos distintivos de absorbividad y reflectividad.

## 4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos fueron contrastados con información geológica, metalogenético, y de minerales y rocas industriales generados por el IGME, esto en cuanto a los minerales de mayor abundancia. Para el caso de los minerales con alto contenido de metales pesados, se generó una tabla, la cual contiene coordenadas de aquellas localidades con supuesta presencia de estos elementos traza, la misma que será verificada a través de campañas de campo.

### 4.1. Minerales característicos del PRS

#### 4.1.1. Técnica de Crosta

Como se mencionó anteriormente el análisis de las cargas factoriales y de sus signos, dentro de la matriz de vectores propios, es fundamental para seleccionar la CP

que contiene la información espectral relativa a la bentonita y sepiolita, como se indica en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3: Matriz de vectores y valores propios – Bentonita.

2021_PRS	B7	B9	B11	B12	Valor propio (%)
CP1	-0.48	-0.37	-0.61	-0.51	78.92
CP2	-0.54	-0.57	0.35	0.51	17.04
CP3	-0.69	0.72	0.08	0.02	3.14
CP4	0.06	0.12	-0.71	0.69	0.90

Tabla 4: Matriz de vectores y valores propios - Sepiolita

2021_PRS	B7	B9	B11	B12	Valor propio (%)
CP1	0.35	0.47	0.60	0.54	89.11
CP2	0.70	0.44	-0.45	-0.33	8.42
CP3	0.31	-0.44	-0.47	0.70	1.49
CP4	0.54	-0.63	0.46	-0.32	0.99

En el caso de la bentonita (imagen B) se seleccionó la CP4 debido a que presenta fuertes cargas factoriales y de signos opuestos sobre las bandas 11 y 12, las cuales exhiben el mayor contraste espectral, debido a la presencia de AlOH y de contenido de agua en su estructura. Cabe mencionar que, la bentonita es una arcilla de grano muy fino, por ende, su presencia se manifiesta sobre todo en aquellas porciones del espectro que van de los 1100 a los 2500 nm (Shin *et al.* 2020). Posteriormente, se realizó una negación de la CP4 con la finalidad de que el mineral pueda ser resaltado por píxeles brillantes, en lugar de píxeles oscuros.

En cuanto a la sepiolita (imagen S), también perteneciente a la familia de los filosilicatos, el mayor contraste espectral, de igual forma, se encuentra en las bandas 11 y 12, por ende, se seleccionó la CP3, a la cual se le aplicó también una negación.

#### 4.1.2. Composición Crosta original y modificada

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos de las composiciones, evidenciándose en la Figura 3a que la bentonita es representada con colores naranja y café oscuro, la sepiolita con color azul claro, las zonas urbanas con color negro (ausencia de estos minerales), y aquellas zonas de color cian tenue corresponde a una mezcla de sepiolita y bentonita, predominando el primero.

Por otro lado, en la Figura 3b se evidencia una sobre estimación de minerales en lugares específicos, originado por el factor multiplicativo. Se distingue de manera general tres colores, el verde que se ubica sobre las zonas urbanas que correspondería en teoría a una mezcla entre bentonita y sepiolita, el color magenta pertenecería de igual forma a zonas con mixtura de ambos minerales, y el color violeta resalta aquellos lugares con mayor presencia de sepiolita.

De esta forma se constata que la “composición Crosta” original presenta una mayor concordancia con la información temática de contraste, sin embargo, no se

logra apreciar de una forma clara, aquellas zonas donde existen una mixtura de minerales. Por otro lado, el producto derivado de la modificación realizada, permite una clara detección del mineral sepiolita.

Adicionalmente, se presenta en la Figura 4, ejemplos puntuales de la "composición Crosta" original, contrastados con las menas del mapa metalogenético del IGME, en el cual se encuentran cartografiadas dieciséis localidades con presencia de los minerales en estudio.

En la Figura 4a se puede evidenciar la presencia de bentonita (color café oscuro), localizándose las zonas 1 y 2 junto a la desembocadura del río Manzanares en el Jarama. Por otro lado, en la Figura 4c se denota la presencia del mineral sepiolita, localizado en los alrededores de Vicálvaro (zonas 3 y 4). Se adjunta la Tabla 5 que contiene las coordenadas de las zonas previamente indicadas.

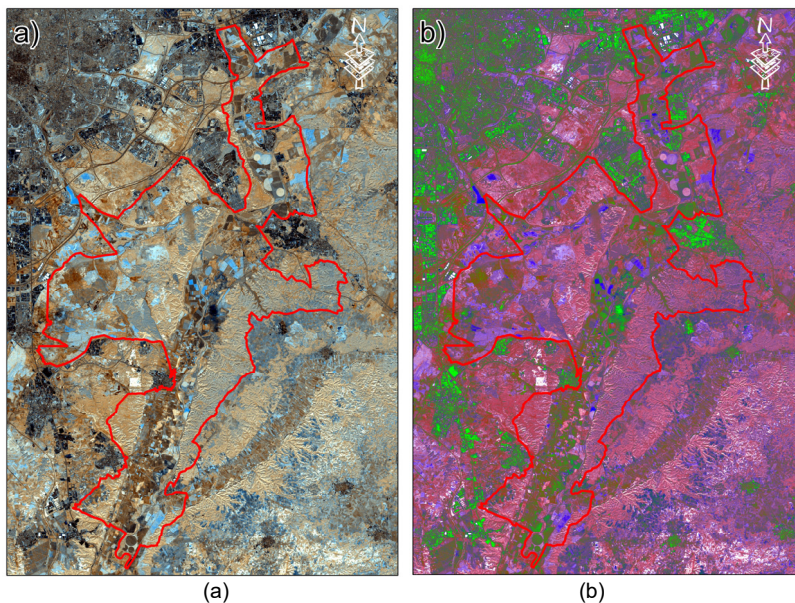


Figura 3: Composición Crosta: a) Original; b) Modificada.

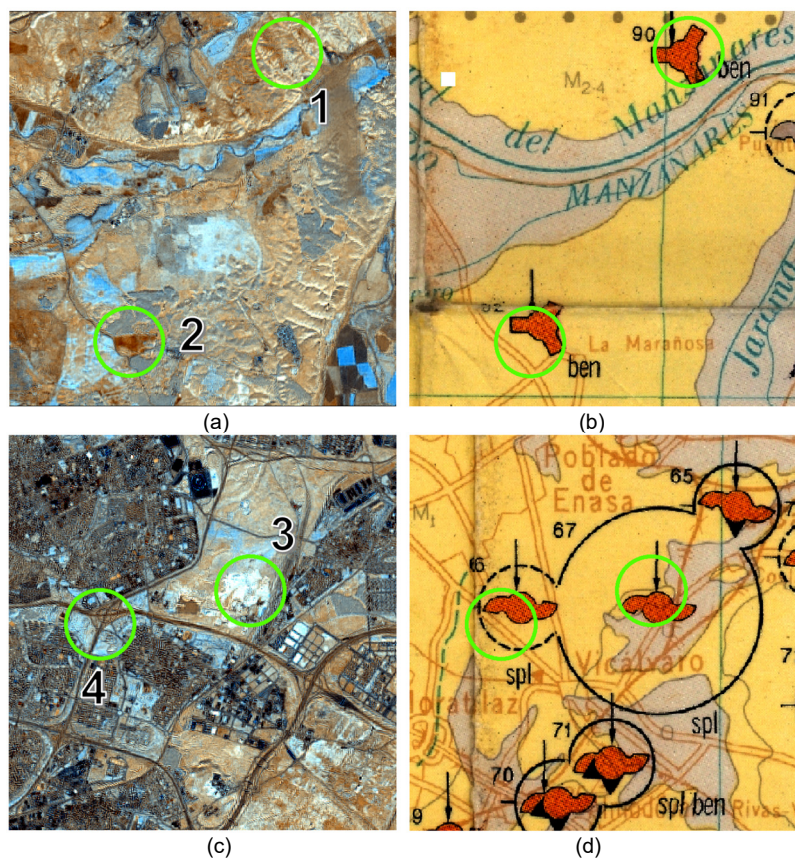


Figura 4: Ejemplos puntuales de la composición Crosta: a) Detección bentonita, Imagen Sentinel-2; b) Mapa metalogenético de a); c) Detección sepiolita, Imagen Sentinel-2; d) Mapa metalogenético de c).



Es de importancia mencionar que, debido a la estacionalidad y a las bandas empleadas en el ACP podría existir una variabilidad en los resultados obtenidos. Como se mencionó anteriormente, el presente estudio parte de una imagen Sentinel-2, la cual corresponde a la época de invierno (03/01/2021), sin embargo, para el caso puntual de la bentonita, se trabajó con una imagen adicional de las mismas características, correspondiente a la época de verano (12/08/2018), en la cual se detectó una menor presencia de dicho mineral a lo largo de la zona de estudio, sobre todo al este de Rivas Vaciamadrid y en la periferia de Torrejón de Ardoz.

**Tabla 5:** Coordenadas de zonas contrastadas (WGS84 UTM Z30N).

Número	X (m)	Y (m)
1	451 823	4 464 340
2	448 886	4 458 863
3	450 140	4 474 203
4	446 933	4 473 553

#### 4.2. Minerales con presencia de metales pesados

De manera similar, la “técnica de Crosta” fue empleada para la obtención de imágenes que manifiesten la presencia, o no, de metales pesados. En la Tabla 6 se detallan las bandas Sentinel-2 con mayor contraste espectral, empleadas en el ACP.

**Tabla 6:** Bandas absorbivas y reflectivas de Sentinel-2 empleadas en el ACP para la detección de elementos traza.

Metal	Bandas absorbivas	Bandas reflectivas
As	1 y 8	5 y 12
Cd	4 y 8	7 y 12
Cr	4 y 12	3 y 8A
Cu	4 y 11	6 y 12
Hg	8A y 12	7 y 11
Ni	8A y 11	9 y 12
Pb	3 y 6	5 y 12
Zn	6 y 12	4 y 11

Adicionalmente, mediante una interpretación visual apoyada en imágenes de alta resolución y mapas temáticos procedentes de organismos oficiales, se identificaron sitios con supuesta presencia de elementos traza, mismos que serán verificados en campañas de campo, con la finalidad de evaluar la bondad que tiene la “técnica de Crosta” para aislar metales pesados mediante imágenes Sentinel-2. Las coordenadas de dichos sitios y su respectiva espacialización se encuentran plasmadas en la Tabla 7 y en la Figura 5 respectivamente.

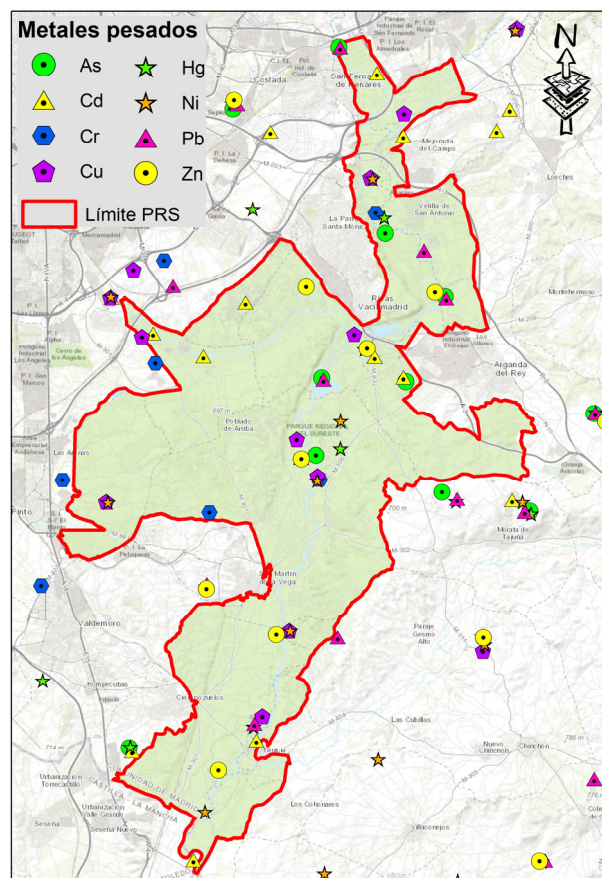
#### 5. Conclusiones y acciones a corto plazo

Se corrobora que la “técnica de Crosta” es de amplia utilidad para trabajar en la detección de minerales, obteniendo buenos resultados cualitativos al momento de contrastar los productos derivados con la geoinformación del organismo rector en geología dentro de España.

Previo a la aplicación de la multiplicación en la “composición Crosta” modificada sería conveniente normalizar los datos de entrada.

**Tabla 7:** Puntos representativos con posible presencia de metales pesados (WGS84 UTM Z30N).

Id	X (m)	Y (m)	Elementos	Uso
1	444 221	4 464 909	Cd, Cu, Ni	Cultivo
2	460 144	4 464 973	As, Pb	Cultivo
3	456 572	4 470 704	Cu, Ni	Cantera
4	467 272	4 459 416	As, Hg, Pb	Cantera
5	464 145	4 454 701	As, Hg, Ni, Pb	Cantera
6	454 143	4 456 226	Cr, Cu, Ni	Agua
7	443 936	4 455 146	Cu, Ni	Pastizal
8	438 205	4 459 988	Cd, Cr, Cu	Suelo
9	448 762	4 450 987	Hg, Pb, Zn	Cantera
10	452 699	4 449 002	Cu, Ni	Cultivo
11	463 074	4 433 043	As, Pb, Zn	Cultivo
12	468 687	4 433 275	As, Cd, Hg	Pastizal
13	463 487	4 477 754	As, Hg, Pb	Cantera
14	461 965	448 683	Hg, Zn	Suelo
15	462 019	4 448 352	Cu, Ni	Olivar
16	454 346	4 461 047	As, Pb	Agua



**Figura 5:** Espacialización de puntos con posible presencia de metales pesados a ser validados en campañas de campo.



La selección de la CP debe tomar en cuenta tanto las cargas factoriales como los signos opuestos, dentro de la matriz de vectores propios, principalmente a partir de aquellas bandas de mayor contraste espectral. En el supuesto caso de que los resultados presenten un sin número de falsos positivos se debería optar por otra CP, en caso de seguir con este inconveniente, se debería elegir otras bandas reflectivas y absorbivas de partida.

El bajo contenido de bandas que presenta la imagen Sentinel-2 es una limitación para poder trabajar con longitudes de onda específicas, donde se evidencian los mayores contrastes espectrales tanto de absortividad como de reflectividad. A pesar de esto, los resultados obtenidos de los minerales bentonita y sepiolita concuerdan con la cartografía de contraste. El escaso número de bandas podría ser una fuente de error, debido a que los metales pesados tenderían a traslaparse con longitudes de onda de absorción de óxidos de hierro, materia orgánica, agua y minerales arcillosos.

Se evidencia una similitud espacial por parte de algunos metales, por ejemplo, As, Cd y Pb se encuentran en los mismos objetivos o superficies, al igual que Ni y Cr. Todos estos puntos serán corroborados mediante medidas con espectroradiómetro, análisis químico de muestras e información de organismos rectores en la temática.

Otra de las acciones a corto plazo, es la aplicación de la metodología en tierras agro-forestales, para poder determinar posibles zonas afectadas por metales pesados, orientado a dar cumplimiento de la normativa

de la Unión Europea en cuanto a niveles máximos de elementos traza.

El empleo de datos multifuente como las imágenes super o hiperespectrales permitirá afinar la metodología que se presenta en el artículo, gracias a su elevado número de bandas, teniendo la posibilidad de aislar los elementos con una mayor precisión.

Por último, se realizará una transferencia de tecnología, en donde las habilidades, conocimiento y herramientas adquiridas, serán trasladadas desde España a Ecuador, con un doble enfoque, por un lado, esto permitirá la intercalibración de algoritmos generados, y por otro, se tendrá la capacidad para poder detectar aquellas zonas afectadas por metales pesados.

## Agradecimientos

La presente investigación tiene el apoyo de:

- Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), mediante la beca otorgada dentro del marco de la convocatoria abierta 2017 - componente general.
- Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), mediante la concesión del permiso respectivo para poder efectuar estudios regulares de posgrado en España.
- Tepro Consultores Agrícolas SL, mediante las prácticas doctorales realizadas a partir del 01/03/2021 hasta la actualidad.

## References

- ADRIANO, D., 2001. *Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. Second edn. Verlag, New York, Berlin, Heidelberg: Springer.
- ARELLANO, P., TANSEY, K., BALZTER, H. and BOYD, D.S., 2015. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environmental Pollution*, **205**, pp. 225-239.
- BRAGADO, E., REJAS, J.G., MARCHAMALO, M. and BONATTI, J., 2009. Delimitación de zonas de alteración hidrotermal en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica mediante imágenes Landsat y del sensor simulador MASTER, S. MONTESINOS and L. FERNÁNDEZ, eds. In: *XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, September 23, 2009*, pp. 265-268.
- CASTILLEJO, D.G., 2019. Ecologistas piden investigar un vertido de lodos de aguas residuales en el Parque Regional del Sureste.
- CM. 2019. Datos Abiertos de la Comunidad de Madrid.
- CRÓSTA, A.P., DE SOUZA FILHO, C. R., AZEVEDO, F. and BRODIE, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **24**(21), pp. 4233-4240.
- DAS, B., MANOHARA, K.K., MAHAJAN, G.R. and SAHOO, R.N., 2020. Spectroscopy based novel spectral indices, PCA- and PLSR-coupled machine learning models for salinity stress phenotyping of rice. *Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **229**, pp. 1-13.
- DAVIDS, C. and TYLER, A.N., 2003. Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone. *Remote Sensing of Environment*, **85**(1), pp. 30-38.
- DURÃES, N., NOVO, L.A.B., CANDEIAS, C. and DA SILVA, E.F., 2017. *Distribution, transport and fate of pollutants. Soil Pollution: From Monitoring to Remediation*. Elsevier, pp. 29-57.
- FONSECA, D., 2016, Nov 21. *La espuma que amenaza el Jarama*. El País. ISSN 1134-6582.
- GALÁN, E. and ROMERO, A., 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, **10**, pp. 48-60.
- IGME. 1998. Cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero de España.

- IGN. 2019. Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional.
- IGN. 2011. Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España.
- JPL. 2018. ECOSTRESS Speclib de Jet Propulsion Laboratory. Search Library — ECOSTRESS Speclib (nasa.gov). Available: <https://speclib.jpl.nasa.gov/library> [5/12, 2021].
- LONDOÑO-FRANCO L, LONDOÑO-MUÑOZ P, and MUÑOZ-GARCÍA F., 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, **14**(2), pp. 145-53.
- LOUGHLIN, W.P., 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **57**(9), pp. 1163-1169.
- MEZA, K., RUALES, B., MAIGUASHCA, J. and RIVADENEIRA, J.L., 2020. Caracterización espectral de estrés hídrico en el cultivo de pepino dulce (*Solanum muricatum*). *Geoespacial*, **17**(1), pp. 14-24.
- REJAS, J.G., MARTÍNEZ-FRÍAS, J., MARTÍNEZ, R., MARCHAMALO, M. and BONATTI, J., 2014. Spectral analysis of geological materials in the Central Volcanic Range of Costa Rica and its relationship to the remote detection of anomalies. *Estudios Geológicos*, **70**(2).
- ROSSO, P.H., PUSHNIK, J.C., LAY, M. and USTIN, S.L., 2005. Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination. *Environmental Pollution*, **137**(2), pp. 241-252.
- SHIN, H., YU, J., WANG, L., JEONG, Y. and KIM, J., 2020. Spectral interference of heavy metal contamination on spectral signals of moisture content for heavy metal contaminated soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **58**(4), pp. 2266-2275.
- SIEGEL, F.R., 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer.
- SOCA-MUÑOZ, J., RODRIGUEZ-MACHADO, E., ADAY-DIAZ, O., HERNANDEZ-SANTANA, L. and OROZCO-MORALES, R., 2020. Spectral signature of brown rust and orange rust in sugarcane. *Revista Facultad De Ingeniería-Universidad De Antioquia*, **96**, pp. 9-20.
- YAO, X., ZHU, Y., TIAN, Y., FENG, W. and CAO, W., 2010. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **12**(2), pp. 89-100.

# MODELOS EMPÍRICOS DE PREDICCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE VIVO MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES DE SENTINEL-2 Y DATOS METEOROLÓGICOS

## EMPIRICAL MODELS FOR PREDICTING LIVE FUEL MOISTURE CONTENT USING SENTINEL-2 SPECTRAL INDICES AND METEOROLOGICAL DATA

María Alicia Arcos<sup>a,\*</sup>, Ángel Balaguer-Beser<sup>a,b</sup>, Luis Ángel Ruiz<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [maar12m@doctor.upv.es](mailto:maar12m@doctor.upv.es); [laruiz@cgf.upv.es](mailto:laruiz@cgf.upv.es)

<sup>b</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [abalague@mat.upv.es](mailto:abalague@mat.upv.es)

### Abstract:

The water content of the vegetation affects the flammability of the vegetation and fire behavior. A standard measure of this parameter is the live fuel moisture content (LFMC), calculated as the percentage of humidity of the vegetation relative to its dry weight. The aim of this work was to predict LFMC values of *Rosmarinus officinalis* in forest areas of the Valencian Community (Spain) using spectral indices obtained from Sentinel-2 satellite images and meteorological data. For this, LFMC values of this species were obtained from field samples collected biweekly from June to October in years 2019 and 2020 in three forest plots in the province of Valencia (Spain). The meteorological data (precipitation, temperature, relative humidity and wind speed) were obtained from observatories of the State Meteorological Agency (AEMET) of Spain. Multiple linear regression models were applied to estimate LFMC, using as predictor variables different spectral indices generated from Sentinel-2 images, calculated using Google Earth Engine and R programming. The results obtained using smoothed spectral data with the Savitzky-Golay filter were compared with data without such smoothing, also considering the differential contribution of the meteorological variables in each of the interpolated dates for each plot with data from the study area.

**Key words:** live fuel moisture; mediterranean forests; Sentinel-2; spectral indices; meteorological data; Google Earth Engine

### Resumen:

El contenido de agua de la vegetación afecta a la inflamabilidad de la vegetación y al comportamiento del fuego. Una medida estándar de este parámetro es la humedad del combustible vivo (HCV), calculada como el porcentaje de humedad de la vegetación respecto a su peso seco. El objetivo de este trabajo ha sido predecir los valores de HCV de *Rosmarinus officinalis* en zonas forestales de la Comunitat Valenciana (España) utilizando índices espectrales obtenidos a partir de imágenes de los satélites Sentinel-2 y datos meteorológicos. Para ello, se obtuvieron valores de HCV de dicha especie en muestras tomadas quincenalmente entre los meses desde junio hasta octubre de los años 2019 y 2020 en tres parcelas forestales en la provincia de Valencia (España). Los datos meteorológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) se obtuvieron a partir de observatorios de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España. Se aplicaron modelos de regresión lineal múltiple para estimar los valores de HCV, usando como variables predictoras distintos índices espectrales generados a partir de imágenes Sentinel-2, calculados usando *Google Earth Engine* y programación en R. Se compararon los resultados obtenidos empleando datos espectrales suavizados con el filtro Savitzky-Golay y datos sin suavizar, considerando además el aporte diferencial de las variables meteorológicas en cada una de las fechas interpoladas para cada parcela con datos de campo.

**Palabras clave:** humedad de combustible vivo; bosques mediterráneos; Sentinel-2; índices espectrales; datos meteorológicos; *Google Earth Engine*

## 1. Introducción

La humedad de combustible vivo (HCV) está estrechamente relacionada con la inflamabilidad de las especies vegetales y, en consecuencia, con la ocurrencia y propagación de los incendios forestales. Yebra *et al.* (2013) revisaron el uso de datos de teledetección para estimar el contenido de HCV y encontraron relaciones

entre HCV y el comportamiento del fuego en experimentos de ignición de combustible a escalas pequeñas.

La humedad de combustible vivo corresponde al contenido de agua de la vegetación, calculada como el porcentaje de la masa de agua contenida en las especies muestreadas en campo respecto a su peso seco (ver Ecuación 1).

\* Corresponding Author: María Alicia Arcos, [maar12m@doctor.upv.es](mailto:maar12m@doctor.upv.es)



$$HCV = \frac{\text{PesoVerde} - \text{PesoSeco}}{\text{PesoSeco}} * 100 \quad (1)$$

El peso verde corresponde al peso de la especie tomado cuando se recoge la muestra en campo y el peso seco el que se obtiene después de introducirla en la estufa de secado a 100° C.

Existen varias referencias donde se relacionan los valores de HCV, tanto con índices espectrales extraídos de diferentes satélites (MODIS, Landsat, Sentinel), como con variables meteorológicas (véase García *et al.* (2020) Marino *et al.* (2018) o Myoung *et al.* (2018)). Marino *et al.* (2020) ajustaron modelos empíricos con diferentes métodos estadísticos: regresión lineal simple (LR) y múltiple (MLR), regresión no lineal (NLR) usando índices espectrales extraídos de imágenes MODIS o Sentinel-2. Sin embargo, los distintos enfoques que emplearon tendían a sobrestimar los valores más bajos de HCV, necesitándose más trabajo para mejorar las predicciones. En su estudio subrayan, además, que los datos de teledetección son una fuente importante de información para la estimación de modelos operativos de HCV que se pueden utilizar para el análisis de riesgo de incendios forestales.

Myoung *et al.* (2018) probaron un modelo utilizando varias variables meteorológicas como variables independientes, además del EVI (*Enhanced vegetation index*) obtenido usando datos MODIS. Los resultados indicaron que, entre las temperaturas diarias, la humedad y la precipitación, la mejora del modelo fue mayor con el uso de la temperatura mínima diaria, especialmente para valores más bajos de HCV. Sin embargo, la resolución espacial proporcionada por MODIS (500 m) puede no ser adecuada para monitorear la dinámica de HCV en áreas montañosas (Quan *et al.* 2017).

Los satélites Sentinel-2 incluyen un sensor óptico de alta resolución que opera en 13 bandas entre el visible y el SWIR (*Short wave infrared*). La resolución espacial es de 10 m para bandas del visible y NIR (*Near infrared*), 20 m para bandas del borde rojo y SWIR, y 60 m para bandas atmosféricas. De esta forma, Sentinel-2 ofrece actualmente una resolución temporal de 5 días y una resolución espacial de 10, 20 o 60 m, dependiendo de las bandas. Marino *et al.* (2018) usaron los índices VARI (*Visible Atmospheric Resistant Index*) y EVI extraídos de imágenes Sentinel-2. Sin embargo, las propiedades de los índices de humedad pueden ayudar a estimar mejor la HCV. Por otra parte, Martin-StPaul *et al.* (2018) establecieron un modelo lineal para predecir los valores anuales más bajos de HCV a través de datos meteorológicos.

El valor de HCV depende fundamentalmente de la especie, de su estado fenológico, la meteorología, el relieve y el suelo (Castro *et al.* 2003). Esta relación hace que los valores de HCV varíen en función de la localización espacial y de la época del año en estudio, aunque también puede variar de un año a otro. Debido a esta causa, la variación suele ser diferente en especies del estrato arbóreo (como *Pinus halepensis* y *Quercus ilex*) con respecto a las de estrato arbustivo (como *Rosmarinus officinalis*, *Quercus coccifera*, *Ulex parviflorus*, y *Juniperus oxycedrus*) y las de estrato herbáceo. En el caso de la Provincia de Valencia, donde han sido tomados los datos de HCV usados en este trabajo, la variación de HCV puede ser importante en los meses de verano y otoño atendiendo al régimen de

precipitaciones. La meteorología suele influir más en la variación de la HCV de especies del estrato herbáceo y en algunas de arbustos como la de *Rosmarinus officinalis* o *Ulex parviflorus*. En este análisis se ha elegido la especie de *Rosmarinus officinalis* debido a que es una de las más representativas del área de estudio, y sus valores de HCV sufren una mayor variación a lo largo del tiempo (Soriano and Quilez 2017). Se han analizado las series temporales para 2019 y 2020 de la humedad de combustible vivo en los meses de junio a octubre, en una zona forestal de la provincia de Valencia (España).

El objetivo de este trabajo, entonces, se centra en predecir los valores de HCV de la especie *Rosmarinus officinalis* en una zona de la provincia de Valencia usando índices espectrales extraídos de Sentinel-2 y algunos datos meteorológicos de la zona. Se analizaron las diferencias de HCV en 3 lugares que distan menos de 250 m (resolución de las bandas 1 y 2 de MODIS), durante los meses desde junio a octubre, con datos de los años 2019 y 2020. También, se examinaron las diferencias que ocurren al calcular los índices espectrales con ventanas de lado igual a 10, 30 o 90 metros, a fin de comprobar el grado de precisión espacial y robustez que proporcionarían en el diseño de modelos de predicción de HCV.

## 2. Datos y área de estudio

En la Figura 1 se ilustra la ubicación de los puntos de toma de las muestras de la especie *Rosmarinus officinalis*, correspondientes a las parcelas: G2, G3 y G5 en los municipios de Gilet y Sagunto, localizados en la provincia de Valencia (España). Las parcelas se encuentran a una elevación entre 255 y 310 msnm (ver Tabla 1).

**Tabla 1:** Características de las parcelas (P). FCC indica la fracción de cabida cubierta de la especie *Rosmarinus officinalis*.

P	Altitud (m)	Pendiente (°)	Orientación (Dirección)	FCC	Modelo_Combust
G2	255	25,2	SE	25	SH4
G3	310	16,2	SO	40	SH4
G5	295	25,9	SE	30	SH4

Las tres parcelas, distan entre sí menos de 250 m, sin embargo, a pesar de que los puntos están cerca y se analiza la misma especie pueden darse diferencias entre un sitio y otro en los valores de HCV, debido a la topografía, orientación, así como a las proporciones (FCC, fracción de cabida cubierta) de las especies coexistentes (ver Tabla 1).

El relieve es un factor importante dentro del comportamiento de la vegetación puesto que abarca varios aspectos como la altitud, la pendiente y la orientación. En base a la altitud se dan ciertas especies vegetales u otras, considerando que a mayor altitud aumentan las precipitaciones y desciende la temperatura. Dado que la altitud máxima de la provincia de Valencia es 1837 m, la mínima: 0 m y la altitud media: 591 m, las 3 parcelas de este estudio se encuentran por debajo de la altitud media, variando desde los 255 m a los 310 m. En cuanto a la precipitación de la zona analizada, ésta es relativamente baja, sin embargo, se trata de una variable

que depende tanto de la estación como del año en estudio.

Por otra parte, también la orientación provoca un desarrollo distinto en la vegetación. En el hemisferio norte, con una orientación sur o solana se tienen temperaturas más altas, mientras que con una orientación norte o de umbría la humedad es mayor. En este último caso, dado que la vegetación recibe menos radiación, tarda más en secarse. Las tres parcelas poseen orientación de solana y por tanto, mayor radiación solar y menor humedad.

Las pendientes de las parcelas G2 y G5 son elevadas (20-30%), mientras que G3 tiene una pendiente moderada (10-20%). Considerando la tendencia de que, a mayor pendiente, menor humedad (Martínez-González *et al.* 2010), G3 podría ser más húmeda que G2 y G5, lo cual se corroboró con los datos tomados en campo.

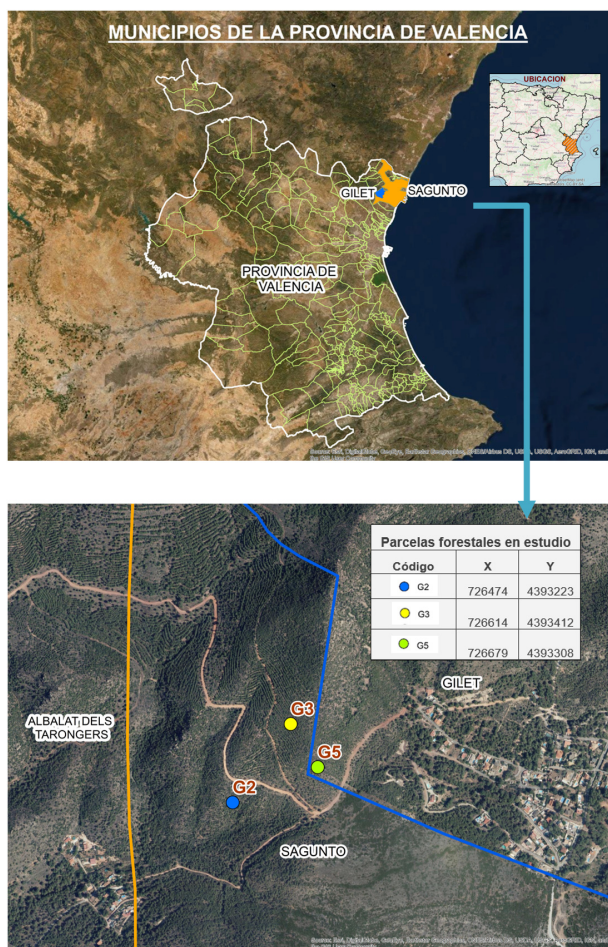


Figura 1: Área de estudio: Provincia de Valencia, municipios de Gilet y Sagunto, parcelas: G2, G3 y G5. Las coordenadas UTM X e Y corresponden al centro de cada parcela

### 3. Metodología

Las mediciones de la humedad de combustible vivo (HCV) se realizaron en cada punto (G2, G3 y G5) de forma quincenal, tanto para el año 2019 como para 2020, durante los meses de junio hasta octubre. Para construir modelos de estimación de HCV se emplearon no sólo índices meteorológicos sino también espectrales como variables explicativas.

### 3.1. Cálculo de índices espectrales

A fin de obtener los datos de imágenes con el menor tiempo posible de cálculo, se optó por calcular los índices de vegetación para Sentinel-2 usando *Google Earth Engine 14* (Google Earth Engine 2021). Con esto se aportó un mayor grado de operatividad para la obtención de modelos. Las series temporales del área de interés se procesaron con esta herramienta, con la reflectancia superficial y corregida atmosféricamente. Se consideraron los siguientes índices de vegetación: índice de vegetación normalizado (NDVI), índice de vegetación mejorado (EVI), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), índice de diferencia de agua normalizada (NDWI), índice de resistencia atmosférica visible (VARI), el índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI), el índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) y el índice de proporción de vegetación (RVI). La mayor parte de estos índices miden las variaciones de verdor, que pueden estar relacionadas indirectamente con el contenido de agua de la hoja.

Los valores de estos índices se calcularon en diferentes ventanas que contienen el centro de cada parcela: ventana formada por un único píxel de 10 m, ventana de 3x3 píxeles y ventana formada por 9x9 píxeles. Por ejemplo: NDVI\_10m significa que el índice NDVI está calculado en un solo píxel Sentinel-2, NDVI\_30m está calculado en una ventana de 9 píxeles (3x3) y NDVI\_90m en una ventana de 81 píxeles (9x9) centrada en cada punto de muestreo.

Es importante mencionar que, a fin de suavizar la serie temporal y reducir con ello el ruido atmosférico y los residuos de la corrección radiométrica, se usó el filtro Savitzky-Golay (Yang *et al.* 2019) implementado en un paquete con el software R. Este filtro usa los valores anteriores y posteriores a cada fecha en la serie temporal para realizar el suavizado.

### 3.2. Variables meteorológicas

La Agencia Espacial de Meteorología (AEMET) a través de la Generalitat Valenciana proporcionó los datos meteorológicos diarios de: precipitación, temperatura media, máxima y mínima, velocidad del viento y humedad mínima relativa, correspondientes a diferentes estaciones meteorológicas de la Comunitat Valenciana.

Tras el proceso de depuración de los datos de los observatorios meteorológicos, los valores se interpolaron a las ubicaciones de HCV utilizando el paquete *Meteoland R* (De Cáceres *et al.* 2018), que integra varias herramientas para facilitar la estimación del clima diario sobre paisajes. Se han adaptado las funciones de dicho paquete en un script de R propio para interpolar diariamente los datos de clima teniendo en cuenta los efectos topográficos; y para corregir los sesgos temporales de una serie meteorológica dada. También se han interpolado los datos de humedad mínima relativa y velocidad del viento a pesar de contar con un menor número de estaciones con este tipo de datos pues las condiciones climáticas extremas como los vientos fuertes pueden incidir en las relaciones entre los datos meteorológicos y los valores de HCV. El método de interpolación usado es similar a la distancia inversa ponderada, pero utiliza un filtro gaussiano truncado para seleccionar estaciones meteorológicas, e incluye

correcciones basadas en los efectos de la altitud en las variables meteorológicas.

Todas las variables meteorológicas se han promediado y, en el caso de la precipitación se han calculado valores acumulados, en los días anteriores a cada toma de datos en campo. Así, se ha calculado el promedio de las temperaturas medias diarias y el promedio de las temperaturas diarias máxima y mínima en ventanas temporales de 7, 15 y 30 días antes de la fecha de recolección de datos de campo. También se ha calculado la precipitación acumulada en los últimos 3, 7, 15, 30 y 60 días. Otros índices calculados han sido el promedio en los últimos 3, 7 y 15 días de estas variables: humedad relativa mínima diaria y velocidad promedio en km/h de las rachas máximas de viento en los últimos 7 días. A cada punto de muestreo se le asignaron los datos meteorológicos interpolados y de esta forma se pudo comparar la evolución temporal de los valores de HCV para la especie elegida junto con datos meteorológicos acumulados o promediados en los días anteriores a la fecha de toma de la muestra de HCV en campo.

### 3.3. Modelos de regresión

En base a los datos meteorológicos y espectrales obtenidos, se aplicó una regresión lineal simple para el caso de una sola variable, mientras que, para el análisis de dos, se consideró la regresión lineal múltiple usando el método de selección paso a paso hacia adelante.

En las regresiones simples se tomó la  $R^2$  como referencia para la comparativa de resultados, cuando se trata de dos variables se consideró tanto la  $R^2$  como la  $R^2$  ajustada. Para que los modelos fueran estadísticamente significativos se tuvo en cuenta, además, que el P-valor del estadístico T de todos los coeficientes fuera menor que 0,05.

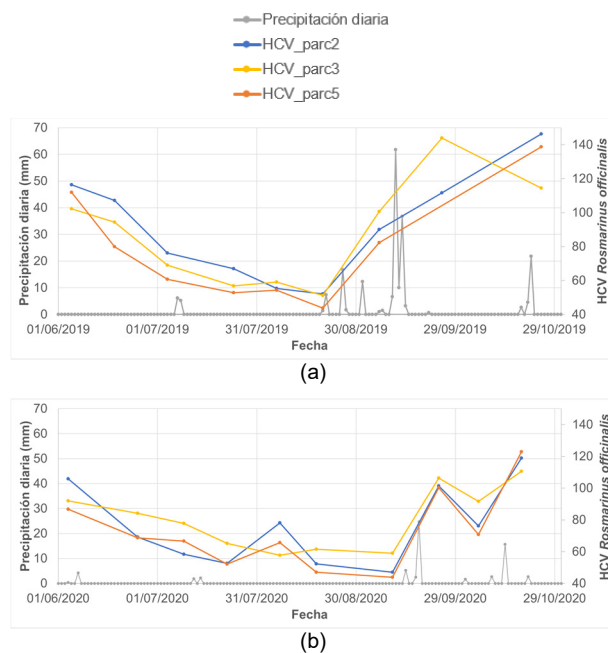
Adicionalmente, para los modelos de dos variables, se consideró el valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE) para su validación.

## 4. Resultados

### 4.1. Estudio de la influencia de los eventos de precipitación en la variación de los valores de HCV

En primer lugar, se realiza el análisis de la precipitación en nuestra zona de estudio para comprobar si esta variable meteorológica guarda algún tipo de relación con los valores de HCV de la especie *Rosmarinus officinalis* y por tanto influye en su comportamiento a lo largo de cada una de las fechas objeto de este estudio.

La Figura 2 muestra la evolución temporal de los valores de HCV junto con los valores de precipitación diaria registrada en la estación meteorológica (Indicativo: 8444, Nombre: Gilet Santo Espíritu) más cercana a las parcelas de estudio (1km), donde se realizaron las mediciones de HCV, en los meses de junio a octubre, tanto para el año 2019 como para el 2020. Por simplicidad, analizamos los valores tomados directamente en dicho observatorio sin interpolar, para evitar la posible influencia del método de interpolación utilizado.



**Figura 2:** Valores de HCV (eje izquierdo) y precipitación diaria (eje derecho) para los meses de junio a octubre de: a) 2019; b) 2020.

En 2020 los valores de HCV comenzaron más bajos que en 2019 y esta diferencia se mantuvo a lo largo de estos meses. El comportamiento de HCV en 2019 fue más estacional, con una tendencia descendente desde junio hasta mediados de agosto y un crecimiento posterior debido en parte a la precipitación acumulada durante el final de agosto e inicios de septiembre. Por su parte, en el año 2020 se evidenciaron picos/crecidas en julio, septiembre y octubre, motivados en parte por el aumento de HCV tras las lluvias experimentadas unos días antes de las mediciones de HCV en campo.

Como se ha señalado antes, los valores de HCV entre parcelas son diferentes a pesar de estar en una zona de características topográficas similares, ya que no sólo están influenciados por éstas sino también por la proporción en la que se encuentran las demás especies coexistentes en la parcela. Considerando la FCC de las parcelas y, a pesar de que según el “Mapa de Modelos de Combustible” de la Generalitat Valenciana, los tres puntos son de la categoría de SH4 (Matorral con arbustos leñosos y hojarasca de arbusto), en la parcela 5 hay menos presencia de *Pinus halepensis* (ver Tabla 2) lo cual puede influir en las características del lugar y en los valores que toman los índices espectrales calculados a partir de las imágenes Sentinel-2.

**Tabla 2:** FCC de *Pinus halepensis* en las tres parcelas de estudio.

Parcela	FCC
G2	35
G3	70
G5	20

Detalles completos del Mapa de Modelos de Combustible pueden verse en Generalitat Valenciana (2015).



## 4.2. Modelos de predicción para HCV con datos compilados 2019-2020

### 4.2.1. Índices espectrales con series temporales no suavizadas

En primer lugar, se construyen modelos de regresión lineal simple para el año 2019 y para el año 2020 por separado usando índices espectrales con series temporales no suavizadas. En este caso, el valor de la serie temporal de cada índice espectral en la fecha donde se ha tomado el dato de HCV en campo se aproxima mediante el valor obtenido en la fecha más próxima de paso de los satélites Sentinel-2. El valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es mayor para los datos de 2019 que para los de 2020 aunque el mejor índice es el NDMI para los dos años (ver Tabla 3).

**Tabla 3:**  $R^2$  de datos no suavizados por ventanas (10 m, 30 m, 90 m) y año (2019, 2020).

Índice/ $R^2$	10 m 2019	30 m 2019	90 m 2019	10 m 2020	30 m 2020	90 m 2020
NDMI	63,91	67,47	41,34	49,38	41,21	23,74
NDWI	47,64	47,08	20,32	43,15	34,64	17,59
NDVI	40,11	40,23	26,06	27,69	24,40	10,58
NMDI	20,24	12,48	11,68	28,05	29,65	19,51
RVI	45,86	48,89	29,57	29,20	26,54	11,51
SAVI	34,29	27,71	29,28	22,16	15,95	16,53
VARI	32,29	33,11	5,96	15,03	18,09	5,28
EVI	41,12	26,79	24,03	18,80	13,09	14,71

En cuanto al tamaño de las ventanas utilizadas, resulta mejor usar 10 m o 30 m en todos los índices, salvo en alguna excepción, la  $R^2$  baja al usar ventanas de 90 m.

Podemos diferenciar dos grupos de índices:

- Aquellos que contienen la banda roja como: EVI, SAVI, NDVI, RVI y VARI. Con RVI y NDVI se obtienen los mejores resultados.
- Índices que incluyen la banda SWIR: NDMI, NDWI y NMDI. Los dos primeros obtienen  $R^2$  en promedio superiores al 50% en las ventanas de 10 y 30 metros en el año 2019.

Al combinar los datos de 2019 junto con los de 2020, se obtiene menor precisión (ver Tabla 4). En los modelos en que se usan dichos datos espectrales no suavizados con la información combinada de los años 2019 y 2020, los valores de  $R^2$  más altos se obtienen generalmente con una ventana de 10 m, aunque la  $R^2$  más alta de este estudio corresponde al índice NDMI (43,68%), con una ventana de 30 m.

### 4.2.2. Series temporales suavizadas de índices espectrales

Considerando la serie temporal de cada índice espectral suavizada mediante el filtro Savitzky-Golay (Yang *et al.* 2019), en el año 2019 y usando ventanas de 30 m se obtienen mejores resultados con dicho suavizado (Tabla 5) que con datos sin suavizar (Tabla 3). Las ventanas de 10 m y 90 m presentan una tendencia opuesta: los datos que tienen valores de  $R^2$  más altos son los no suavizados.

**Tabla 4:**  $R^2$  de datos conjuntos no suavizados combinando los datos de los dos años.

Índice/ $R^2$	10 m	30 m	90 m
NDMI	43,47	43,68	21,38
NDWI	32,92	31,17	11,45
NDVI	25,23	24,73	11,51
NMDI	21,96	14,01	12,92
RVI	27,55	28,31	12,35
SAVI	21,80	17,20	13,98
VARI	14,93	18,51	2,47
EVI	24,92	17,00	13,00

**Tabla 5:**  $R^2$  de datos suavizados por ventanas (10 m, 30 m, 90 m) y año (2019, 2020).

Índice/ $R^2$	10 m 2019	30 m 2019	90 m 2019	10 m 2020	30 m 2020	90 m 2020
NDMI	61,16	69,63	34,89	36,68	30,63	18,56
NDWI	53,47	51,62	11,35	25,89	22,30	10,84
NDVI	35,17	43,83	8,15	19,52	20,43	8,68
NMDI	26,72	28,33	60,21	53,19	33,30	29,30
RVI	44,62	53,81	15,00	20,29	21,14	9,60
SAVI	27,32	27,88	8,24	13,67	12,87	14,10
VARI	26,75	34,56	5,75	8,53	11,58	3,84
EVI	30,97	27,17	9,26	11,72	11,38	15,16

En 2020, los valores de  $R^2$  son mayores sin suavizado (salvo el caso del índice NMDI). Esto se observa de una forma notoria en la ventana de 10 m.

Comparando las Tablas 3 y 5 podemos llegar a estas conclusiones.

- Entre los datos de 2019 y 2020, el mejor  $R^2$  (69,63%) corresponde al índice NDMI del año 2019, 30 m, con datos suavizados.
- Con la ventana de 90 m, los análisis presentan los peores resultados
- En general, los datos sin suavizar presentan mejores resultados que los suavizados.
- Los datos suavizados presentan mejores resultados con una ventana de 30 m en 2019 y con 10 m en 2020.
- Los datos no suavizados presentan mejores resultados con una ventana de 10 m, tanto en 2019 como en 2020.

Al combinar los datos de 2019 y 2020, los valores de  $R^2$  con datos suavizados disminuyeron notoriamente como se puede observar en la Tabla 6.

Los valores más altos se obtienen con una ventana de 30 m.

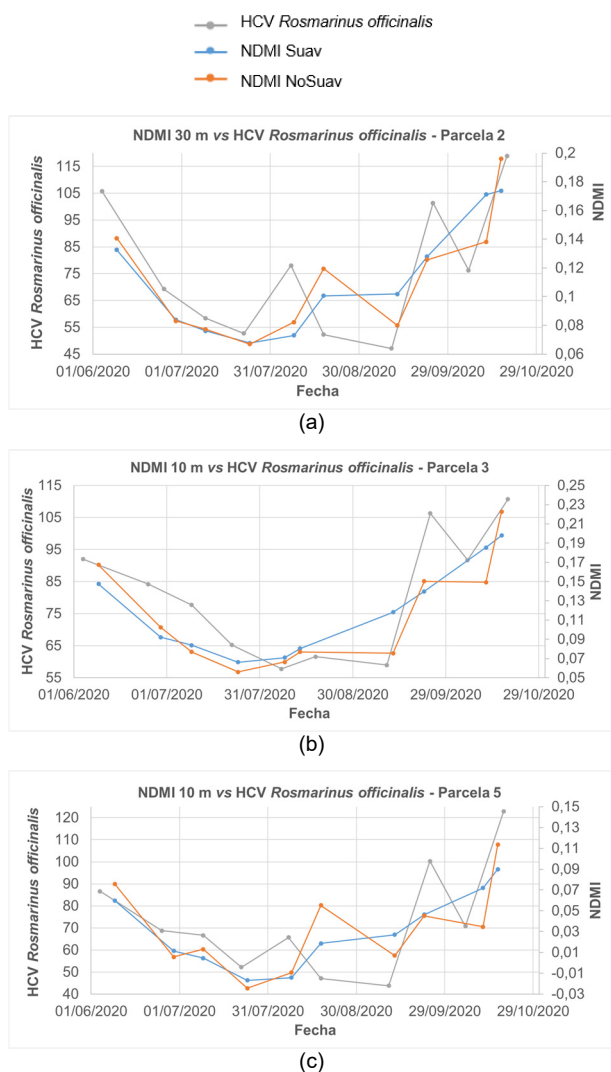
**Tabla 6:** R<sup>2</sup> de datos conjuntos suavizados combinando los datos de los dos años.

Índice/R <sup>2</sup>	10 m	30 m	90 m
NDMI	32,28	36,07	15,46
NDWI	22,90	23,40	4,86
NDVI	18,49	22,39	4,47
NMDI	31,55	26,76	49,24
RVI	20,95	24,23	6,43
SAVI	13,75	14,23	4,87
VARI	9,30	14,45	1,92
EVI	15,54	14,83	6,67

### 4.3. Modelos de HCV por índices espectrales y por parcelas

Este análisis se efectúa considerando los datos de los meses de junio a octubre del año 2020.

Dado que uno de los índices que mejor modeliza el comportamiento del HCV es el NDMI, en la Figura 3, se comparan las series temporales del HCV con la serie temporal del NDMI suavizada y no suavizada.

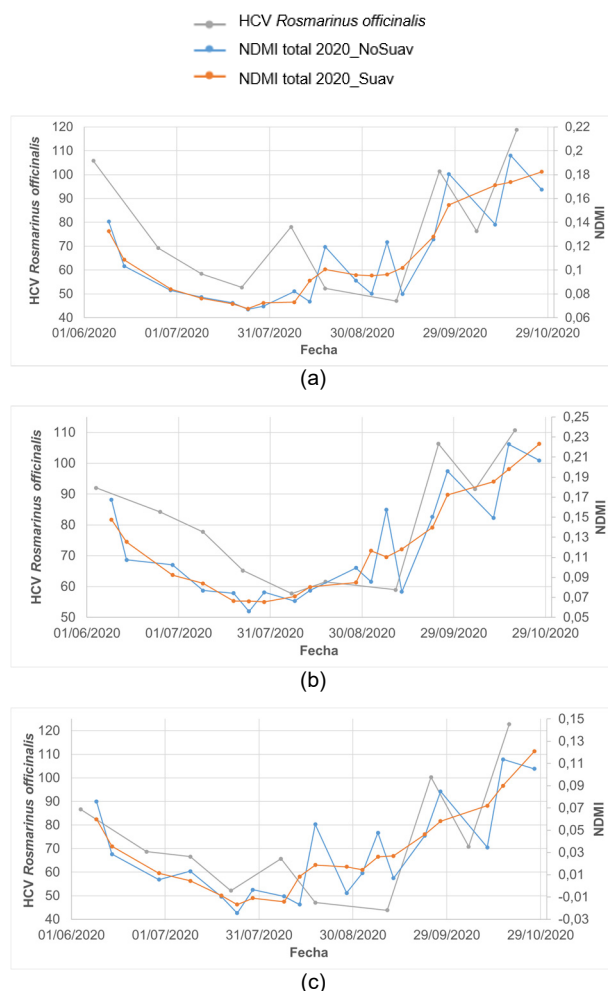


**Figura 3:** NDMI vs HCV: a) Parcela 2; b) Parcela 3; Parcela 5.

De las gráficas observadas, se puede destacar que en 2020 las series no suavizadas se ajustan mejor al HCV que las de los índices suavizados, lo cual se evidencia en la Figura 3. En ellas los datos no suavizados son los que siguen un patrón más semejante al de los valores de HCV de la especie de *Rosmarinus officinalis*. Estos cambios pueden estar asociados a las precipitaciones producidas en dichas fechas.

#### 4.3.1. Comparación de series completas

A fin de verificar si lo concluido en la anterior sección, también sucede en el año 2019 y teniendo en cuenta no sólo las fechas más cercanas a la toma de datos en campo, sino todas las fechas obtenidas a partir de las imágenes Sentinel-2, se muestra un análisis gráfico por año y parcela (ver Figuras 4 y 5).



**Figura 4:** Serie completa de NDMI suavizado y no suavizado vs HCV: a) Parcela 2, 30 m; b) Parcela 3, 10 m; c) Parcela 5, 10 m.

##### 4.3.1.1. Datos 2020

La Figura 4 muestra, además del HCV de *Rosmarinus officinalis*, las series completas (suavizadas y no suavizadas) del índice espectral NDMI para todo el período de estudio: junio – octubre de 2020. Con ello se ha querido reflejar una perspectiva más amplia del comportamiento de los datos al suavizarlos y al no hacerlo, aprovechando, de esta manera, la resolución temporal de Sentinel-2 y sin depender únicamente de la

fecha más cercana a la toma de datos de HCV en campo. Esto evita que se sesgue la apreciación del comportamiento del NDMI basándola en una cantidad mínima de información, que en ocasiones puede contener justamente los datos anómalos o menos representativos.

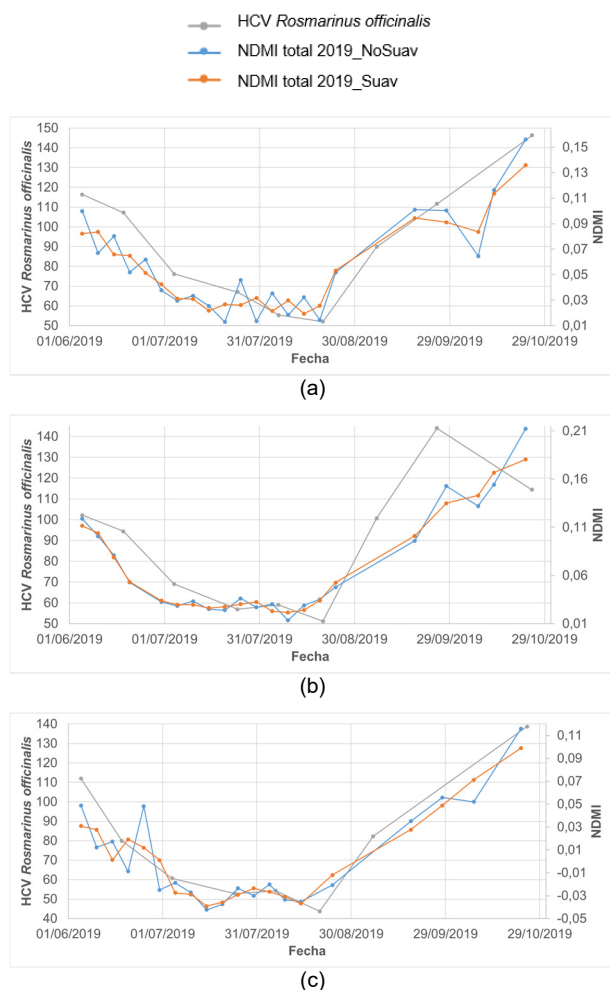


Figura 5: Serie completa de NDMI suavizado y no suavizado vs HCV: a) Parcela 2, 30 m; b) Parcela 3, 30 m; c) Parcela 5, 10 m.

La tendencia descendente de la HCV de *Rosmarinus officinalis* a lo largo de junio y julio 2020, así como los picos de cambio (presentes de agosto a octubre 2020), la recoge mejor el NDMI de los datos no suavizados, correspondiente a la línea marcada en color azul en la Figura 4.

#### 4.3.1.2. Datos 2019

A diferencia del año 2020 en el que son característicos los cambios bruscos de HCV, la tendencia en el 2019 es distinta, de algún modo más estacional, los valores de HCV descienden hasta finales de agosto y a partir de esa fecha empiezan a aumentar.

En base a la Figura 5, se puede aseverar que, al centrar la atención en el comportamiento del HCV para el año 2019, los datos que mejor se ajustan corresponden a los de los índices suavizados.

Las series de datos no suavizados son las que menos se adaptan al HCV, con ligeras oscilaciones representando cambios que realmente no existen.

Este análisis, al igual que el del ítem anterior, se realiza considerando las series completas de NDMI, tanto para datos suavizados como no suavizados, en las parcelas: 2, 3 y 5, y con las diferentes ventanas evaluadas (10, 30 y 90 m). Aunque por simplicidad solo se muestran los resultados para alguna resolución, para todos estos casos las conclusiones son las mismas, es decir, el comportamiento y ajuste de datos no cambia sino solo entre años: HCV 2019 se ajusta mejor con el NDMI de los datos suavizados, mientras que el correspondiente a 2020 con el NDMI de los datos sin suavizar.

#### 4.4. Modelos de regresión con dos variables combinando los datos de 2019 y 2020

Se realiza este análisis para los datos de HCV de *Rosmarinus officinalis* y teniendo en cuenta los datos no suavizados, debido a que son los que proporcionaron los mejores resultados para la mayoría de las variables espectrales.

Se emplean los datos de los años 2019 y 2020 juntos, desde junio hasta octubre.

##### 4.4.1. Modelo I: dos variables espectrales

En este modelo (Ec. 2) se consideran los índices NDMI y NDWI, ambos con ventana de 10 m, obteniendo los siguientes resultados:  $R^2$ : 52,51%,  $R^2$  ajustada: 50,72%, RMSE: 19,00 y MAE: 13,63.

$$HCV = 154,179 + 903,768 * NDMI_{10m} - 486,536 * NDWI_{10m} \quad (2)$$

##### 4.4.2. Modelo II: una variable espectral y una variable meteorológica de temperatura

En el segundo modelo (Ec. 3) participan las variables: NDMI con ventana de 10 m y la variable meteorológica de temperatura:  $t_{30}$  (promedio de las temperaturas medias diarias en los 30 días anteriores a la fecha de toma del valor de HCV en campo), obteniendo como resultados:  $R^2$ : 55,63%,  $R^2$  ajustado: 53,95%, RMSE: 18,37 y MAE: 14,05.

$$HCV = 172,866 + 200,544 * NDMI_{10m} - 4,35502 * t_{30} \quad (3)$$

##### 4.4.3. Modelo III: una variable espectral y una variable meteorológica de precipitación

En el tercer modelo (Ec. 4), al igual que, en el anterior, interviene la variable NDMI de ventana de 10 m, pero esta vez junto a la variable meteorológica de precipitación:  $p_{60}$ , calculada como la precipitación acumulada en los 60 días anteriores a la toma de HCV en campo.

Se obtienen los valores de correlación más altos, reflejados de la siguiente manera:  $R^2$ : 77,11%,  $R^2$  ajustado: 76,25%, RMSE: 13,19 y MAE: 10,46.

$$HCV = 55,8105 + 103,936 * NDMI_{10m} + 0,493315 * p_{60} \quad (4)$$

Como se puede observar de los tres modelos, el que presenta un mejor resultado ( $R^2$  ajustado más alto y



menores RMSE y MAE) y, por tanto, describe mejor el comportamiento de la humedad de combustible vivo es el tercero, en el que se toma en cuenta la precipitación, que como se mencionó anteriormente tiene gran relación con la HCV, especialmente en el año 2020. Sin embargo, el modelo I también mejora la correlación ( $R^2$ : 52,51%) en comparación a los modelos que usan una sola variable, que como vimos en la Tabla 4 alcanzan un  $R^2$  próximo al 44%.

## 5. Conclusiones

Los resultados de correlación entre el contenido de HCV de la especie *Rosmarinus officinalis* y cada uno de los índices espectrales presentan mejores resultados cuando el análisis se hace por separado en años diferentes: el año 2019 y el 2020.

Al combinar ambos años (2019 y 2020) y predecir los valores de la HCV de *Rosmarinus officinalis* considerando una sola variable explicativa, se pierde precisión y los valores de correlación entre la HCV y los índices espectrales disminuyen, de forma que se tiene que añadir una segunda variable para obtener modelos con un ajuste más representativo y por tanto más robustos.

Mediante el análisis de dos variables, se verifica cómo la precipitación es una variable que aporta más información

que la de temperatura, especialmente por su mayor correlación con los valores de HCV durante el año 2020.

Los tamaños de ventana que mejores resultados proporcionan son la de 10 m y la de 30 m. Se obtiene la mejor  $R^2$  con los datos no suavizados, especialmente durante el año 2020 en el que el régimen de precipitaciones fue más irregular, ya que el filtro de suavizado, al no tomar en cuenta los diferentes picos/cambios de la variación de HCV, hace que la relación sea baja. El suavizado resulta más eficiente con ventana de 30 m para el año 2019, por una parte, y por otra, con el índice espectral NMDI para el año 2020.

## Agradecimientos

M<sup>a</sup> Alicia Arcos agradece la ayuda recibida por la Universitat Politècnica de València mediante un contrato predoctoral financiado en la convocatoria, PAID-01-19, subprograma 1. Este trabajo ha sido financiado a través de un convenio de colaboración entre la empresa Red Eléctrica de España S.A.U. y la Universitat Politècnica de València (2020-2023). Los autores agradecen a la Empresa Pública VAERSA y a la Direcció General de Prevenció d'Incendis Forestals de la Generalitat Valenciana por proporcionar los datos de medición de HCV en campo y los datos meteorológicos a través de la AEMET.

## References

- CASTRO, F.X., TUDELA, A. and SEBASTIÀ, M.T., 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology*, **116**, pp. 49-59.
- DE CÁCERES, M., MARTIN-STPAUL, N., TURCO, M., CABON, A., and GRANDA, V., 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling and Software*, **108**, pp. 186–196.
- GARCÍA, M., RIAÑO, D., YEBRA, M., SALAS, J., CARDIL, A., MONEDERO, S., RAMIREZ, J., MARTÍN, M.P., VILAR, L., GAJARDO, J., and USTIN, S., 2020. A Live Fuel Moisture Content Product from Landsat TM Satellite Time Series for Implementation in Fire Behavior Models. *Remote Sensing*, **12**(11), 1714. DOI: 10.3390/rs12111714
- GENERALITAT VALENCIANA. 2015. Clave para la identificación de los Modelos de Combustible de la Comunitat Valenciana. Available: [https://agroambient.gva.es/documents/162905929/169203680/Clave+fotogr%C3%A1fica+modelos+combustible\\_20200430/fd5ae58d-3b3f-4e50-866a-d83544a6f1b2](https://agroambient.gva.es/documents/162905929/169203680/Clave+fotogr%C3%A1fica+modelos+combustible_20200430/fd5ae58d-3b3f-4e50-866a-d83544a6f1b2) [7/17, 2021].
- GOOGLE EARTH ENGINE. 2021. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (google.com). Available: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR) [7/17, 2021].
- MARINO, E., GUILLÉN-CLIMENT, M., ALGEET, N., TOMÉ, J.L., and HERNANDO, C., 2018. Estimation of live fuel moisture content of shrubland using MODIS and Sentinel-2 Images. *Advances in Forest Fire Research 2018 - D. X. Viegas* (Ed.) Chapter 2 – Fuel Management. DOI: 10.14195/978-989-26-16-506\_22.
- MARINO, E., YEBRA, M., GUILLÉN-CLIMENT, M., ALGEET, N., TOMÉ, J. L., MADRIGAL, J., and HERNANDO, C., 2020. Investigating Live Fuel Moisture Content Estimation in Fire-Prone Shrubland from Remote Sensing Using Empirical Modelling and RTM Simulations. *Remote Sensing*, **12**(14), 2251.
- MARTIN-STPAUL, N., PIMONT, F., DUPUY, J. L., RIGOLOT, E., RUFFAULT, J., FARGEON, H., and TOUTCHKOV, M., 2018. Live fuel moisture content (LFMC) time series for multiple sites and species in the French Mediterranean area since 1996. *Annals of Forest Science*, **75**(2), 57.
- MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, F., SOSA-PÉREZ, F., and ORTIZ-MEDEL, J., 2010. Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y ciencias del agua*, **1**(4), pp. 89-103.
- MYOUNG, B., KIM, S., NGHIEM, S., JIA, S., WHITNEY, K., and KAFATOS, M., 2018. Estimating Live Fuel Moisture from MODIS Satellite Data for Wildfire Danger Assessment in Southern California USA. *Remote Sensing*, **10**(1), 87.
- QUAN, X., HE, B., YEBRA, M., YIN, C., LIAO, Z., and LI, X., 2017. Retrieval of forest fuel moisture content using a coupled radiative transfer model. *Environmental modelling & software*, **95**, pp. 290-302.

- SORIANO, J.L. and QUILEZ, R, eds., 2017. Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana: Actas del Séptimo Congreso Forestal Español. Cáceres, Extremadura Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- YANG, Y., LUO, J., HUANG, Q., WU, W., and SUN, Y., 2019. Weighted Double-Logistic Function Fitting Method for Reconstructing the High-Quality Sentinel-2 NDVI Time Series Data Set. *Remote Sensing*, **11**(20), 2342. DOI: 10.3390/rs11202342.
- YEBRA, M., DENNISON, P. E., CHUVIECO, E., RIANO, D., ZYLSTRA, P., HUNT Jr, E. R., and JURDAO, S., 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, **136**, pp. 455-468.

## METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE IDENTIFICATION OF MARGINAL LANDS WITH REMOTE SENSING-DERIVED PRODUCTS AND ANCILLARY DATA

### PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TIERRAS MARGINALES MEDIANTE PRODUCTOS DERIVADOS DE TELEDETECCIÓN Y DATOS AUXILIARES

Jesús Torralba<sup>a,b,\*</sup>, Luis A. Ruiz<sup>a</sup>, Charalampos Georgiadis<sup>c</sup>, Petros Patias<sup>c</sup>, Rodrigo Gómez-Conejo<sup>d</sup>, Natalia Verde<sup>c</sup>, Maria Tassopoulou<sup>c</sup>, Fernando Bezares<sup>d</sup>, Ewa Grommy<sup>e</sup>, Sebastian Aleksandrowicz<sup>e</sup>, Elke Krätzschar<sup>b</sup>, Michał Krupiński<sup>e</sup>, Juan Pedro Carbonell-Rivera<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [jtorpe@upv.es](mailto:jtorpe@upv.es); [laruiz@upv.es](mailto:laruiz@upv.es); [juacarri@upv.es](mailto:juacarri@upv.es)

<sup>b</sup> Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft MBH (IABG), Hermann-Reichelt-Str. 3, 01109 Dresden, Germany. [Kraetzschmar@iabg.de](mailto:Kraetzschmar@iabg.de)

<sup>c</sup> School of Rural and Surveying Engineering, Laboratory of Photogrammetry and Remote Sensing Unit (PERS lab), The Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece. [harrisg@civil.auth.gr](mailto:harrisg@civil.auth.gr); [patias@auth.gr](mailto:patias@auth.gr); [nverde@auth.gr](mailto:nverde@auth.gr); [mtasso@live.com](mailto:mtasso@live.com)

<sup>d</sup> CESEFOR (Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León), Polígono Industrial las Casas, calle C, parcela 4. 42005 Soria, Spain. [rodrigo.gomez@cesefor.com](mailto:rodrigo.gomez@cesefor.com); [fernando.bezares@cesefor.com](mailto:fernando.bezares@cesefor.com)

<sup>e</sup> Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Bartycka 18A, 00-716 Warszawa, Poland. [egromny@cbk.waw.pl](mailto:egromny@cbk.waw.pl); [saleksandrowicz@cbk.waw.pl](mailto:saleksandrowicz@cbk.waw.pl); [mkrupinski@cbk.waw.pl](mailto:mkrupinski@cbk.waw.pl)

#### Abstract:

The concept of marginal land (ML) is dynamic and depends on various factors related to the environment, climate, scale, culture, and economic sector. The current methods for identifying ML are diverse, they employ multiple parameters and variables derived from land use and land cover, and mostly reflect specific management purposes. A methodological approach for the identification of marginal lands using remote sensing and ancillary data products and validated on samples from four European countries (i.e., Germany, Spain, Greece, and Poland) is presented in this paper. The methodology proposed combines land use and land cover data sets as excluding indicators (forest, croplands, protected areas, impervious areas, land-use change, water bodies, and permanent snow areas) and environmental constraints information as marginality indicators: (i) physical soil properties, in terms of slope gradient, erosion, soil depth, soil texture, percentage of coarse soil texture fragments, etc.; (ii) climatic factors e.g. aridity index; (iii) chemical soil properties, including soil pH, cation exchange capacity, contaminants, and toxicity, among others. This provides a common vision of marginality that integrates a multidisciplinary approach. To determine the ML, we first analyzed the excluding indicators used to delimit the areas with defined land use. Then, thresholds were determined for each marginality indicator through which the land productivity progressively decreases. Finally, the marginality indicator layers were combined in Google Earth Engine. The result was categorized into 3 levels of productivity of ML: high productivity, low productivity, and potentially unsuitable land. The results obtained indicate that the percentage of marginal land per country is 11.64% in Germany, 19.96% in Spain, 18.76% in Greece, and 7.18% in Poland. The overall accuracies obtained per country were 60.61% for Germany, 88.87% for Spain, 71.52% for Greece, and 90.97% for Poland.

**Key words:** land use, land cover, idle land, land degradation, GIS, remote sensing, Google Earth Engine

#### Resumen:

El concepto de tierra marginal (ML) es dinámico y depende de factores relacionados con el entorno, el clima, la escala, la cultura y la economía. los métodos actuales de identificación de ML son también diversos y están basados en múltiples parámetros y variables derivados del uso y cobertura del suelo reflejando, en su mayoría, fines de gestión específicos. En este artículo se presenta una propuesta metodológica para la identificación de tierras marginales mediante el uso de productos derivados de teledetección y datos auxiliares, validándose sobre muestras obtenidas en cuatro países europeos: Alemania, España, Grecia y Polonia. La metodología combina datos de usos y coberturas del suelo como indicadores excluyentes (bosque, tierras de cultivo, áreas protegidas, áreas impermeables, cambios de usos del suelo, cuerpos de agua y áreas de nieve permanente) e información ambiental como indicadores de marginalidad, esto es, (i) propiedades físicas del suelo como la pendiente, profundidad de suelo, erosión del suelo, textura, porcentaje de fragmentos de textura gruesa del suelo, etc.; (ii) factores climáticos como el índice de aridez; (iii) propiedades químicas del suelo como pH, capacidad de intercambio catiónico, contaminantes y toxicidad, entre otros, con el objetivo de abordar una visión común de la marginalidad que integre un enfoque multidisciplinar. Para obtener las coberturas de ML primero se analizaron los indicadores excluyentes para delimitar las áreas con un uso del suelo establecido. En segundo lugar, se determinaron los umbrales para cada indicador de marginalidad a través de los cuales el suelo se transforma,

\* Corresponding Author: [Jesus.Torralba@upv.es](mailto:Jesus.Torralba@upv.es)



disminuyendo progresivamente su aprovechamiento productivo. Finalmente, la superposición de las capas de indicadores de marginalidad se llevó a cabo con la herramienta *Google Earth Engine*. El resultado final se categorizó en 3 niveles de ML con diferente productividad: alta, baja y tierras potencialmente inadecuadas. Los resultados obtenidos indican que el porcentaje de tierras marginales sobre la extensión total de cada país analizado es de 11,64% en Alemania, 19,96% en España, 18,76% en Grecia y 7,18% en Polonia. La precisión global obtenida por país fue del 60,61% para Alemania, del 88,87% para España, del 71,52% para Grecia y del 90,97% para Polonia.

**Palabras clave:** uso de suelo, cobertura de suelo, tierra abandonada, degradación del suelo, SIG, teledetección, Google Earth Engine

---

## 1. Introduction

The concept of marginal land (ML) has evolved across time, location, discipline (Kang *et al.* 2013b) and management objectives. Traditionally, the term "marginal lands" has been used to refer, from a purely economic perspective, to those agricultural areas that have a limited production potential (Hollander 1895; Strijker 2005; Ciria *et al.* 2019). Later, its meaning changed to include areas with biophysical, climatic, and socioeconomic constraints (Eliasson *et al.* 2010; Elbersen *et al.* 2018; Gerwin *et al.* 2018). In this regard, only in recent decades the concept of marginal land has been used to define abandoned lands physically inaccessible, with high environmental risk or providing fragile ecosystem services (Kang *et al.* 2013a).

In addition, the definition has changed as a result of the dynamics of ML themselves. Under specific and transitory ML circumstances (e.g., policies, land regulations, economic incentives, land use benefits, market profitability), humans have claimed or abandoned these lands (Strijker 2005). These circumstantial dynamics have placed the ML in a transitional state of land resources, very sensitive to natural processes, economic impacts, and diverse management. The latter has generated the mentioned recent changes in the ML definition, as a consequence of the search of land to achieve a variety of management objectives, such as the increase the bioenergy crops (Ciria *et al.* 2019; Mellor *et al.* 2021), food production land (Zhang *et al.* 2018) or carbon sequestration through reforestation (Sauer *et al.* 2012).

Analogous to the ML definition, a single identification and classification method does not exist, and the available methods only reflect management goals. These methods range from approaches focused on physical characteristics (i.e., environmental factors) to purely socioeconomic factors. In general, biophysical constraints related to agricultural productivity or bioenergy are the most commonly used for the ML identification. For example, Cai *et al.* (2011) applied the Soil Rating for Plant Growth Index (SRPG) developed by the US Department of Agriculture, where they combined sixteen soil properties related to productivity, slope, soil temperature regimes, and moisture index. Using a multi-criteria decision approach based on Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing, Zolekar & Bhagat (2015) combined data on land use/land cover (LULC), slope, soil depth, erosion, moisture, water holding capacity, texture, and availability of nutrient to study the land suitability for agriculture in hilly zones. A similar approach based on an indicator of suitability for agricultural activity was applied by Li *et al.* (2017) using eight indicators (slope, soil erosion, soil organic carbon, texture, pH, cation exchange capacity, soil depth, and

drainage) in areas where LULC types, such as water bodies, protected areas, or human settlements had previously been excluded. The crop sustainability concern and economic focus were integrated into the ML identification by Gopalakrishnan *et al.* (2011). These authors identified ML based on soil health criteria (erosion, frequently flooded, poorly drained, steeply sloped, and low productivity), current land use (includes land categories such as idle and fallow), and environmental degradation criteria (contaminated land, contaminated water resources, and water-constrained areas).

In Europe, Bertaglia *et al.* (2007) applied a slightly different approach, since they targeted areas for extensive grazing. The main difference was to consider LULC as an aggregate of biophysical constraints and socioeconomic trends. In Germany, Reger *et al.* (2007) used satellite data and historical information on land cover dynamics to detect the trend of cropland abandonment and, in addition, to identify ML. Ivanina *et al.* (2016) and Gerwin *et al.* (2018) in the Sustainable Exploitation of Biomass for Bioenergy on Land (Seemla) European project and Elbersen *et al.* (2018) in the European project Marginal Lands for Growing industrialists (Magic) have assessed and quantified the area of ML in Europe by applying biophysical criteria on agricultural and forest lands using GIS tools. These projects also considered socio-economic constraints to classify ML (accessibility, status of infrastructure, demographic parameters, and economic density (income/km<sup>2</sup>)). In this same bioenergy context, Ciria *et al.* (2019) applied a holistic approach for the identification of arable marginal lands under rainfed conditions in Spain, combining biophysical constraints with the economic performance of crops and other sustainability aspects.

Most of these methodologies mainly employed soil analysis and agricultural production indicators for ML identification and, to a lesser degree, aspects of environmental quality and sustainability were considered. The criteria to define ML should cover the needs and constraints of each time and region, and integrate a multidisciplinary approach to reflect the synergy of multiple land functions, management objectives and ecosystem services. Consequently, a single index or criterion cannot fully satisfy these needs. This paper presents a methodological proposal for the identification, mapping and classification of ML without a defined management objective, combining the use of remote sensing derived products and ancillary data.

## 2. Datasets and Methodology

The study area was determined according to the location of the validation samples, which included different areas

throughout four European countries: Germany, Greece, Poland, and Spain.

To identify and classify ML, several data sets were combined (Tables 1 and 2) in two phases (Fig. 1) (Georgiadis *et al.* 2021). In the first phase, binary exclusion factors (“Hard” constraints) based on LULC were analyzed in a top-down stepwise approach, excluding those areas with a given land use or belonging to land cover types excluded from the general definition of ML. These “Hard” factors were used to identify and map the ML in the four countries.

In the second phase, the resulting potential ML were classified based on their marginality degree with variable thresholds (“Soft” constraints), including soil condition and biophysical factors, such as inherent properties of the soil or land, and climatic data as a transitory and restrictive property. Finally, three classes of ML were obtained according to their level of productivity: high, low and potentially unsuitable land.

## 2.1. Hard constraints datasets

The LULC selected in the bibliography review as excluding indicators to determine ML were: marshes, peatbogs, permanent snow-covered surfaces, water bodies, forest, croplands, impervious, protected areas and changed areas. Table 1 describes the datasets used to determine each LULC, their spatial resolution, the dates of each dataset and the sources in which they are described in detail. All datasets downloaded (Fig. 1.1) were free and open access. Products 1,3 and 4 were available on a global scale and the rest on a European scale.

## 2.2. Soft constraints datasets

A literature review, based on studies focused specifically on the methodological aspects of ML mapping, was carried out to determine the indicators that constitute the “Soft” constraints with non-thematic data (numerical data). In particular, those studies detailing soil, climate, terrain, sustainability, productivity and LULC constraints were considered. For each study, we registered the extent, minimum mapping unit (MMU), technology used, datasets, indicators used, the indicators thresholds and the ML classification scheme.

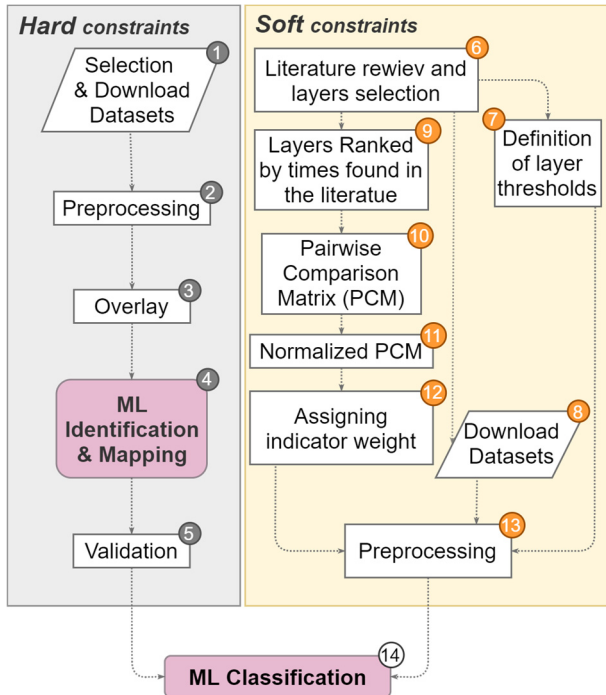
**Table 1:** Datasets used to determine the “Hard” constraints in ML identification.

<i>Hard Constraints</i>	<i>Source</i>	<i>Abbreviation</i>	<i>Resolution</i>	<i>Year</i>	<i>Reference</i>
Marshes, Peatbogs, Permanent snow- covered surfaces, Water bodies	(1) Sentinel-2 Global Land Cover	S2GLC	10 m	2017	(Malinowski <i>et al.</i> 2020)
	Forest	(2) Copernicus High-Resolution Layer - Tree Cover Density	HRL-TCD	20 m	2015
Forest	(3) Global Forest Change - Tree Cover	GFC-TC	30 m	2000	(Hansen <i>et al.</i> 2013)
	(4) Global Forest Change - Loss	GFC-LSS	30 m	2015 & 2018	(Hansen <i>et al.</i> 2013)
	Croplands	(5) Sentinel-2 Global Land Cover	S2GLC	10 m	2017
Croplands	(6) CORINE Land Cover	CORINE LC	25 ha	2018	(European Environment Agency 2019a)
	Impervious	(7) Copernicus High-Resolution Layer – Imperviousness Density	HRL-IMD	20 m	2017
(8) CORINE Land Cover		CORINE LC	25 ha	2018	(European Environment Agency 2019b)
Protected Areas	(9) EU Nationally designated protected areas inventory	CDDA	-	2018	(European Environment Agency 2019c)
	(10) Natura2000 Network	Natura2000	20 m	2018	(European Environment Agency 2019d)
Changed Areas	(11) Copernicus High-Resolution Layer - Tree Cover Density Change	HRL-TCDC	20 m	2012- 2015	(European Environment Agency 2018)
	(12) Copernicus High-Resolution Layer - Impervious Classified Change	HRL-IMCC	20 m	2012- 2015	(European Environment Agency 2018)
	(13) Corine Land Cover Change	CORINE LC CHA	25 ha	2012- 2018	(European Environment Agency 2019b)

In order to define the land marginality, the maximum and minimum thresholds for each indicator were determined (Fig. 1.7). These thresholds refer to the value ranges that could be reached by a particular indicator and were defined based on the examined literature. Each indicator was divided into 3 ranges: a) representing the best indicator values (score 10) and corresponding to suitable,

fertile, or productive land; b) representing the average values of the indicator (score 5), related to low fertile land and low productivity; and c) representing the restrictive indicator values (score 1) for land that could potentially be unsuitable or incompatible with any activity or management. In the case that more than one threshold was found in the literature, the threshold was established

based on the maximum and minimum values for all Europe. During this phase, we ensured that each indicator had a data set available for the four countries to be analyzed. Consequently, when an indicator could not be matched to a dataset (conceptually and in units) for the four countries, the indicator was omitted. The thresholds selected for each indicator, as well as the reference of the document from which it was obtained, are shown in Table 2.



**Figure 1:** General methodological workflow for identification, mapping and classification of ML

Furthermore, the “Soft” indicators were ranked according to the number of times that they were found in the literature (Fig. 1.9), as a way to analyze their importance. Once ranked, the Pairwise Comparison Matrix (PCM) of the ranks (Zolekar & Bhagat 2015) was calculated. Afterward, the normalized PCM was performed and a weight was obtained for each indicator (Fig. 1.11 and 1.12). To normalize the values, each PCM value was divided by the sum of the values of its column, then the weights of each indicator (Table 2) were calculated using the average of the values in its row. These weights were scaled from 0 to 1 in ascending order to preserve the hierarchy according to their importance in the marginality, and their sum is equal to 1.

### 2.3. Intermediate layer production

The different data sets for identifying and classifying ML were processed independently. In regard to the “Hard” indicators, six workflows were performed to determine LULC where different datasets were combined to produce binary intermediate layers.

1) The S2GLC product was selected to determine the land cover of marshes, peatbogs, permanent snow-covered surfaces and water bodies. The S2GLC product consists of thirteen land cover classes (overall accuracy = 86%) and was developed using classification algorithms for the analysis of more than 15,000 Sentinel-2 images (Malinowski *et al.* 2020).

- 2) The Copernicus HRL-TCD 2015, GFC-TC 2000, and GFC-LSS 2015 and 2018 layers were combined to delimit the forest zones (defined as those areas with a tree cover higher than 30% and a minimum area of 0.5 ha). All pixels that were selected as forest in 2000, 2015, and 2018 were considered as forest land cover.
- 3) To determine croplands, we selected S2GLC class 73 (cultivated areas) and 75 (vineyards) and CORINE LC class 2 where agricultural areas are included (except 231 which represents pastures). Both datasets were reclassified into two classes representing croplands/non-cropland areas. Then, a fuzzy overlay was performed to identify all pixels considered as crops in both datasets.
- 4) Impervious areas represent all sealed and constructed areas that are primarily covered by buildings or impermeable surfaces. To delimit impervious areas, CORINE LC class 1 (“Artificial areas”, except classes 131 (mineral extraction sites) and 132 (dumpsites)) and the Copernicus HRL-IMD product were used. In the latter, those areas with a threshold above 30% were defined as impervious. The final vector layer was converted to raster and both datasets were reclassified and combined in the same way that for croplands.
- 5) Protected areas were delimited by merging Natura2000 and CDDA from the European Environment Agency. The final vector layer was converted to raster and both datasets were reclassified into two classes representing protected/non-protected areas.
- 6) To incorporate the dynamic aspect of ML, changed areas were also included in the proposed methodology. Specifically, two main types of changes were considered: i) changes related to forest activities such as afforestation and reforestation and ii) changes in the urban fabric. The delineation of changes in forest areas was implemented using the Copernicus HRL-TCDC change product. This product shows real tree cover density (TCD) changes (%) between 2012 and 2015. To identify such changes in forest areas, a threshold of 50% was applied. This threshold ensured that the output included certain changes due to reforestation or deforestation and not sparse or random changes. On the other hand, changes in urban fabric and impervious areas were outlined using the classes “increased IMD” and “new cover” from the HRL-IMCC 2012-2015 product and the CORINE LC CHA 2012-2018 product. Specifically, we extracted class 1 except classes 131 and 132. All intermediate layers were reclassified into two classes (changed/non-changed areas) and finally a fuzzy overlay was performed to produce the final intermediate layer “changed”, representing all the occurred changes. In this case, the fuzzy overlay was performed to identify all pixels that were registered as changed in one of the three datasets.



**Table 2:** Summary of the "Soft" indicators used in the ML classification methodology. The indicators are grouped by data type: terrain and soil, sustainability, and productivity. "Threshold-based on" refers to the scientific publication from which the threshold was obtained. "Source" refers to the repository from which the data was freely downloaded. "Rank" refers to the position in which each indicator appeared in the bibliographic ranking. "Weight" refers to the weights obtained in the normalized PCM. "Score" refers to the value given to each of the thresholds in order to categorize them according to their marginality. The data sets with two weights were the indicators with information for Topsoil (T) and Subsoil (S) and they were treated as independent indicators.

Type	Rank	Layer name	Thresholds	Threshold-based on	Source	Weight	Score
Terrain and Soil	1	Slope (%)	[15 - 40]	(Gopalakrishnan <i>et al.</i> 2011)	(Europe Environment Agency 2017)	0.17	10
			[40 - 65]				5
			[65 - 90]				1
	1	Depth Available to Roots (cm)	[100 - 66.7]	(Ciria <i>et al.</i> 2019)	European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre	0.17	10
			[66.7 - 33.3]				5
	3	Coarse fragments (T/S) (%)	[33.3 - 0]	(Ciria <i>et al.</i> 2019)		0.03	10
			[15 - 20]				5
	2	Texture (T/S) (%)	[30 - 53.3]	(Elbersen <i>et al.</i> 2018)		0.045	10
			[53.3 - 76.7]				5
	6	Clay (T/S) (%)	[76.7 - 100]	(Eliasson <i>et al.</i> 2010)		0.015	10
[50 - 58.7]			5				
6	Sand (T/S) (%)	[58.7 - 67.3]	(Eliasson <i>et al.</i> 2010)		0.015	10	
		[67.3 - 76]				5	
4	Total Available Water (T/S) (mm)	[60 - 70]	(Zolekar & Bhagat 2015)		0.02	10	
		[70 - 80]				5	
2	Soil Acidity	[80 - 90]	(Ciria <i>et al.</i> 2019)		0.09	10	
		[100 - 50]				5	
Sustainability	2	Soil Acidity	[50 - 0]	(Ciria <i>et al.</i> 2019)		0.09	10
			[pH>8, pH<6]				5
			[pH>8.5, pH<5.25]				1
	3	Soil Erosion (t/ha/year)	[pH>9, pH<4.5]	(Eurostat 2020)		0.06	10
			[10 - 55.3]				5
	4	Flooding (%)	[55.3 - 67.3]	(Gopalakrishnan <i>et al.</i> 2011)	(Pekel <i>et al.</i> 2016)	0.04	10
			[67.3 - 325]				5
	5	Sodicity (%)	[50 - 66.7]	(Eliasson <i>et al.</i> 2010)	(Batjes 2016)	0.03	10
			[66.7 - 83.3]				5
	6	Toxicity Contamination (cg/kg)	[83.3 - 100]	(Gopalakrishnan <i>et al.</i> 2011; Ivanina <i>et al.</i> 2016)		0.03	10
[6 - 36.7]			5				
9	Natural Toxicity (g/kg)	[36.7 - 67.4]	(Eliasson <i>et al.</i> 2010)		0.02	10	
		[67.4 - 98]				5	
2	Dryness (Aridy Index)	[1 - 3]	(Ivanina <i>et al.</i> 2016; Elbersen <i>et al.</i> 2018)	(Abatzoglou <i>et al.</i> 2018)	0.02	10	
		[3 - 10]				5	
Productivity	6	Caption Exchange Capacity (cmol(+)/kg)	[10 - 23.5]	-	(ISRIC-World Soil Information 2020)	0.03	10
			[150 - 328]				5
	3	Soil Organic Matter (T/S) (%)	[328 - 506]	(Elbersen <i>et al.</i> 2018; Ciria <i>et al.</i> 2019)	European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre	0.03	10
			[506 - 684]				5
	7	Productivity Grasslands	[0.5 - 0.34]	-		0.02	10
			[0.34 - 0.18]				5
	7	Productivity Forests	[0.18 - 0]	-		0.02	10
			[22.2 - 18.9]				5
	7	Productivity Forests	[18.9 - 15.6]	-		0.02	10
			[15.6 - 12.3]				5
7	Productivity Forests	[OM < 1%, OM ≥ 20%]	-		0.02	10	
		[OM < 0.75%, OM ≥ 30%]				5	
7	Productivity Forests	[6-4]	-		0.02	10	
		[4-2]				5	
7	Productivity Forests	[2-0]	-		0.02	10	
		[3-2]				5	
7	Productivity Forests	[2-1]	-		0.02	10	
		[1-0]				5	

A single workflow was followed to obtain the "Soft" indicators' intermediate layers. First, the raster values were reclassified according to the thresholds described in Table 2, where layers with two or three values (scores) were obtained. Then, the pixel values were multiplied by the weight calculated from the PCM. Finally, we obtained

raster layers with 3 values representing the 3 ranges of marginality. The indicators "Coarse fragments", "Texture", "Clay", "Sand", "Total Available Water", and "Soil organic matter" information from Topsoil (T) and Subsoil (S) were available and processed as independent indicators. T and S layers, were processed independently since they

originally formed and developed differently, even their characteristics could have been influenced by land use (Hiederer 2013). There were two exceptions in the preprocessing of the "Soft" indicators, involving the preparation of a dataset before applying the described workflow: (1) the soil indicator "Texture" was obtained by applying the equation proposed by Elbersen *et al.* (2018) where the silty texture is added to twice the clayey texture, and silt (T/S) layers were downloaded from ESDAC; and (2) the Aridity Index (AI), which relates accumulated precipitation (mm) and reference evapotranspiration (Penman 1948), the high-resolution monthly dataset "Terraclima" for 2018 (Abatzoglou *et al.* 2018) available from Google Earth Engine (GEE) was used. To obtain a single value per pixel and year, the twelve images of 2018 were filtered, then the precipitation and evapotranspiration bands were selected, followed by the division between the precipitation and evapotranspiration bands. Finally, the yearly mean value was calculated for every pixel.

All intermediate layers were resampled using the nearest neighbor method to a pixel size of 10 x 10 meters, which is the spatial resolution of the highest resolution product (S2GLC), used as a base-map in the next steps. In addition, all layers were projected to the horizontal coordinate system European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) using Lambert Azimuthal Equal-Area projection (LAEA).

## 2.4. Potential ML identification

The potential ML were identified and mapped by combining all the "Hard" intermediate layers, which include LULC types that cannot be ML, with the S2GLC base-map. In particular, raster layers were mathematically combined and new values were assigned to the output layer. In this process, we co-registered every layer so that the output raster cells were aligned with raster cells of the S2GLC base-map. The final layer was a binary raster file, based on the S2GLC base-map, including all remaining classes that are potentially ML.

To properly assess the classification of ML and non-marginal lands (nonML), experts from the four countries with previous knowledge of land use, landscape, terrain, and general knowledge of the countries included in the study, provided polygons of reference ML and nonML areas. On the reference polygons, stratified random sampling of points with a sample size of 1 pt./ha was carried out. The classification accuracy was quantified by country through the confusion matrix by contrasting the reference values with the classification results. The performance of the classification was also measured with other indexes including the overall accuracy, Kappa index, recall (%) and F-measure (%). Recall corresponds with the fraction of ML validation samples classified as positive, among the total number of positive ML. While F-measure is the harmonic mean of the model's precision and recall (Carbonell-Rivera *et al.* 2020).

## 2.5. ML classification

To classify the potential ML, the intermediate raster layers of the "Soft" indicators were overlaid in GEE, with special attention to the pixel alignment of the different layers. The last step in the ML mapping was the reclassification of the product resulting from the weighted superposition of the

"Soft" indicators into three ML productivity categories: high, low and potentially unsuitable land. For this purpose, the minimum ( $ML_m$ ) and maximum ( $ML_M$ ) values obtained by the marginality layer were calculated. Then, the range of values was divided into three intervals using three different approaches to establish the upper and lower limits of each category:

- Equal magnitude.* The class interval was set by dividing the range of values into 3 equal parts.
- 25<sup>th</sup>-75<sup>th</sup> percentiles.* The 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles were calculated to establish them as class limits. The interval [ $ML_m$ ,  $P_{25}^{th}$ ] represented "potentially unsuitable land" category, [ $P_{25}^{th}$ ,  $P_{75}^{th}$ ] was the "low productivity ML" category, and [ $P_{75}^{th}$ ,  $ML_M$ ] was the "high productivity ML" category.
- 33<sup>rd</sup>-66<sup>th</sup> percentiles.* The 33<sup>rd</sup> and 66<sup>th</sup> percentiles were calculated to establish them as class limits. The interval [ $ML_m$ ,  $P_{33}^{rd}$ ] characterized "potentially unsuitable land" category, [ $P_{33}^{rd}$ ,  $P_{66}^{th}$ ] was the "low productivity ML" category, and [ $P_{66}^{th}$ ,  $ML_M$ ] was the "high productivity ML" category.

## 3. Results and Discussion

The percentage of ML per country was higher in Mediterranean countries. In particular, Spain was the country where most ML were identified (Fig. 2), with 20.0% (100,983 km<sup>2</sup>), followed by Greece with 18.8% (24,770 km<sup>2</sup>). In addition to a climate characterized by a prolonged summer drought, these countries also have an abrupt and varied topography that restricts the use of some lands for agriculture and forests production. In contrast, the countries where fewer ML were identified were Germany, with 11.6% (41,606 km<sup>2</sup>), and Poland, with 7.2% (22,442 km<sup>2</sup>), both countries have a relief dominated by flatlands and a continuous rainfall regime throughout the year, facilitate agriculture and forest (natural or plantations).

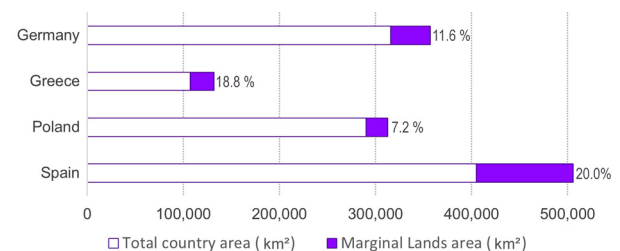


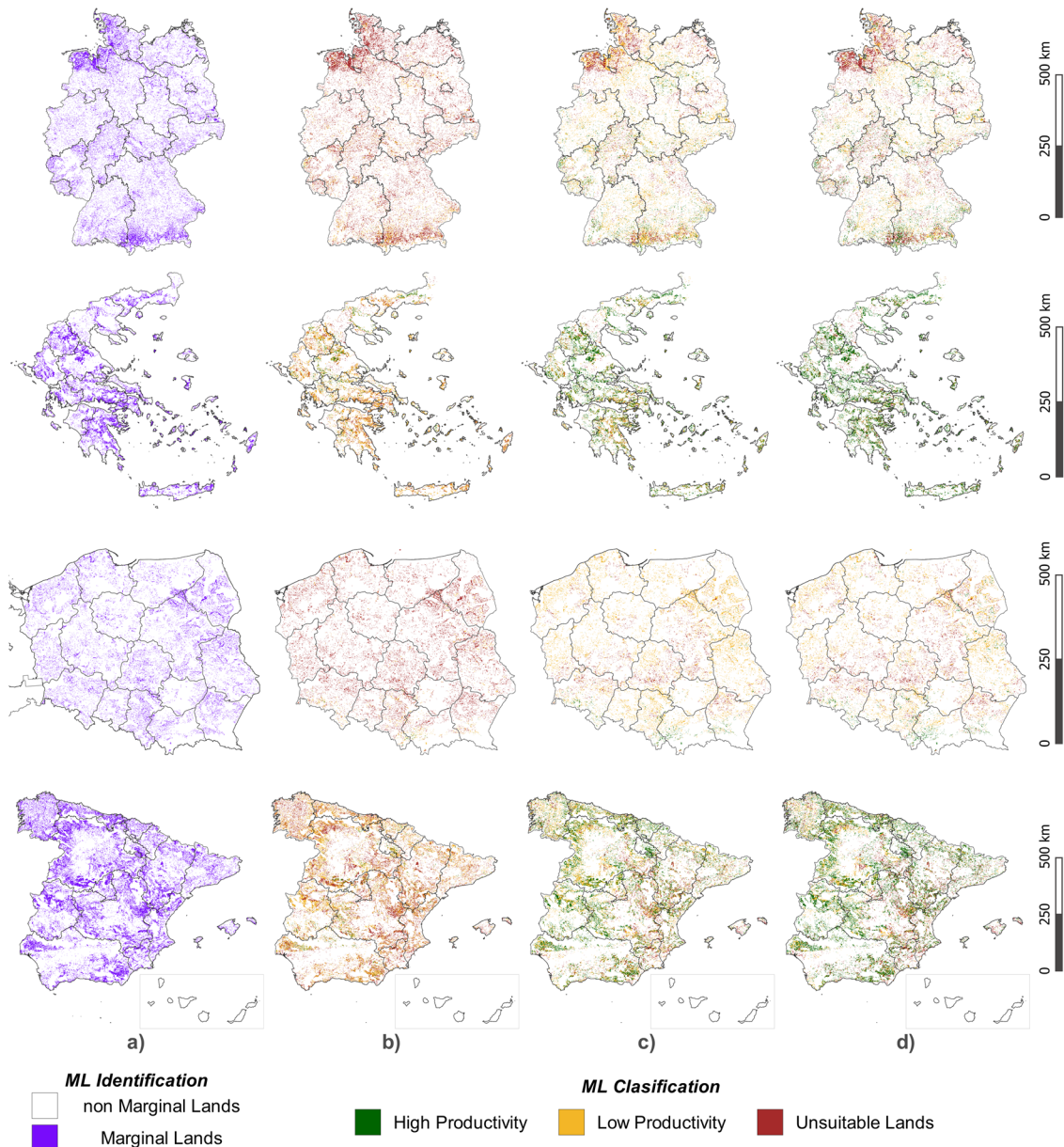
Figure 2: Percentage of area identified as ML per country.

From the Gerwin *et al.* (2018) study in the Seelman project, only the results from Greece and Germany were available, and they identified 14.6% ML and 9.4% ML per country, respectively. This differed from our results by 4.16% for Greece and 2.24% for Germany. This is mainly due to their indicators and thresholds choice as they adjusted them to the site requirements of certain forest species, in order to find ML for biomass production and bioenergy purposes. The results were also compared with those obtained by Elbersen *et al.* (2018) in the Magic project for all European countries. Elbersen *et al.* (2018) found percentages of ML areas per country similar to our results (Greece 23.108 km<sup>2</sup> (17.5%), Germany 33.896 km<sup>2</sup> (9.5%), and Poland 27.372 km<sup>2</sup> (8.8%)). However, for Spain they found 167.680 km<sup>2</sup> (33.1%). These

differences could be due to the use of land irrigation indicators in the project. This fact, in addition to the desertification of some transitional areas could explain this increase in the area of ML by 13.2%.

The distribution of the potential marginal lands can be observed in Figure 3a. In the case of Spain, the presence of ML was distributed throughout the territory, and there was a tendency for marginal lands to increase around the mountain ranges. These areas, if not covered by forest or under protection, had no clear land use and were covered by grassland, herbaceous vegetation, moorland, heathland, sclerophyllous vegetation, marshes and, to a lesser extent, natural material surface (i.e., bare rock, hard pan, mineral fragments, bare soils and natural deposits). The results for Greece were similar to Spain, with a dispersion of ML throughout the country but mostly

clustered in the mountainous ranges or in vegetation areas without protection, generally covered by herbaceous and sclerophyllous vegetation. In Greece, also noteworthy was the number of ML identified on the islands, mainly along rocky coastal shores. In the case of Germany, a generalized absence was observed in the central and flat part of the country, concentrating the ML around the mountainous region located in the south, dominated by rocky surfaces, and in the northwest of the country, where several river valleys are located, and moorland and heathland covers are predominant. Poland was the country with the least area identified as ML, being scattered throughout the country and with no remarkable clusters. This could be due to the fact that ML in Poland are related to unmanaged areas mainly covered by herbaceous vegetation without a defined land use.



**Figure 3:** Graphical representation of the potential ML identification (a) and the ML classification for the three categorization approaches (b = Equal magnitude, c = 25<sup>th</sup>-75<sup>th</sup> percentiles, and d = 33<sup>rd</sup>-66<sup>th</sup> percentiles). The countries represented from top to bottom are Germany, Greece, Poland, and Spain.

Table 3 shows the confusion matrix of the identification of ML organized by country. The best accuracy was

achieved in Poland, with an overall accuracy of 90.97%, then in Spain with 82.87%. In both cases, the



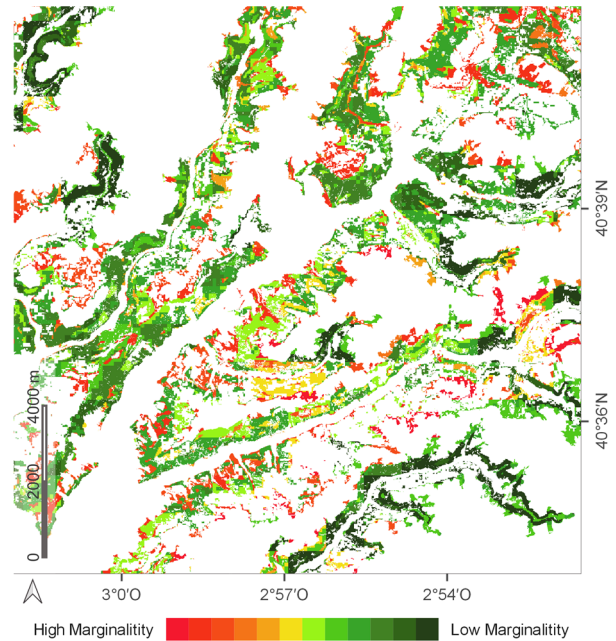
concordance measured with the kappa index was above 0.6, and the overall quality of the classification (ML/nonML) measured with the F-scores was above 80%. For Germany, the overall accuracy was the lowest with 60.61% and a very poor concordance of 0.04. The error in Germany was due to the validation sample selection, since most of the ML samples were taken in protected areas with marginal characteristics (identified by the state of the soil and the present vegetation).

**Table 3:** Confusion matrices, global precision, F-score, and Kappa index by country for ML identification.

Germany	ML	nonML	Total	Recall (%)	Overall Accuracy
ML	317	8,436	8,753	90.06	0.61
nonML	35	12,477	12,512	59.66	
Total	352	20,913	21,265		
F-Score (%)	61.64				
Kappa	0.04				
Greece	ML	nonML	Total	Recall (%)	Overall Accuracy
ML	5,902	1,691	7,593	73.89	0.72
nonML	2,086	3,583	5,669	67.94	
Total	7,988	5,274	13,262		
F-Score (%)	70.69				
Kappa	0.41				
Poland	ML	nonML	Total	Recall (%)	Overall Accuracy
ML	292	24	316	54.17	0.91
nonML	247	2,439	2,686	99.03	
Total	539	2,463	3,002		
F-Score (%)	83.43				
Kappa	0.63				
Spain	ML	nonML	Total	Recall (%)	Overall Accuracy
ML	1,396	406	1,802	84.66	0.83
nonML	253	1,793	2,046	81.54	
Total	1,649	2,199	3,848		
F-Score (%)	80.90				
Kappa	0.65				

Figure 4 shows a map representing the numerical gradient of the "Soft" constraints for a detail area in Spain. In the classified layer, a minimum value of 0.12 (high marginality) and a maximum value of 6.86 (low marginality) were obtained, whereas the maximum theoretical value with respect to the sum of all the "Soft" indicators was 9.98. This shows that all zones identified

as marginal with "Hard" layers were assigned a value obtained from some "soft" constraint, as no area obtained the theoretical minimum of zero. The values obtained as a result of the sum of all soft constraints and the three classification approaches with their respective value ranges are shown in Table 4.



**Figure 4:** Representation of the gradient obtained in the application of all the "Soft" constraints on an area of Guadalajara (Spain). White areas represent nonML.

**Table 4:** Methods to subdivide the ML types.

Method	Equal Magnitude		25 <sup>th</sup> -75 <sup>th</sup> percentiles		33 <sup>rd</sup> -66 <sup>th</sup> percentiles	
	Max.	Min.	P25	P75	P33	P66
Value	6.86	0.12	1.39	2.89	1.58	2.52
	<i>Thresholds</i>					
High productivity ML	6.86	4.62	6.86	2.89	6.86	2.52
Low productivity ML	4.62	2.37	2.89	1.39	2.52	1.58
Potentially unsuitable land	2.37	0.12	1.39	0.12	1.58	0.12

Figure 3b-d shows the result of mapping the three categories of ML in terms of productivity using the three different classification approaches for the four countries. There is no optimal methodology to classify these three types of ML. According to the final use or application of the map, different thresholds should be defined, since there is no definition that clearly limits the 3 classes. These classifications give us a vision of the limitations and opportunities of the territory.

## 4. Conclusions

The definition of marginal land is ambiguous and does not have a spatial representation or a spectral response

directly measurable using remote sensing data. ML are mainly marginal due to their exclusion from management for not being operationally effective or productive for agriculture, or for not having a minimum soil depth, or have extreme chemical-toxic soil values, all these are factors that block forest growth. The identification methodology presented in this paper quantified areas with undefined or non-specific LULC and with a clear potential to be considered ML. From the area covered in this study, Mediterranean countries, with more extreme temperatures and rainfall regimes, and prolonged drought, present more extension corresponding to potential marginal areas than central-northern European countries.

In the classification methodology, the qualitative physical functions of soil, soil restrictions, landscape and productivity have been evaluated. In addition, a value was assigned to each ML patch, representing the marginality level attending to the soft constraints or factors considered in the study. The interspecific differences between countries indicate that, in order to improve the classification and provide applicability to the method, it would be convenient to adjust the thresholds of the indicators for each biogeographic zone.

Processing the information in GEE improved greatly the time performance and computer processing capacity, in addition to the direct availability of several data sets in the cloud.

For future work, it is recommended to include social and economic factors that influence the consideration of ML

(i.e., demographic parameters, level of industrialization of the country, per capita income, agrarian policies, forest policies, distance to roads). Socio-economic factors can provide information about why an area of land has become marginal over time and location. Besides, understanding the socio-economic characteristics of an area can be a key factor in the successful management of the activities to be implemented on the ML. On the other hand, it would be desirable to include in future classification methodologies constraints that identify the ecosystem services of the land (i.e., flora and fauna protection, hydrological balance, prevention of exotic plants invasion, erosion control, prevention of eutrophication). In this context, all areas identified as marginal cannot be used for productive purposes in terms of their environmental impacts on biodiversity, water resources and landscape. Nevertheless, mapping the location of potentially marginal lands can help to identify areas with irreversible erosion risk, land degradation, promote biodiversity in isolated populations and contribute to climate change mitigation with sustainable reforestation actions.

## Acknowledgements

This research has been funded by the European Commission through the H2020-MSCA-RISE-2018 MAIL project (grant 823805) and by the Fondo de Garantía Juvenil en I+D+i from the Spanish Ministry of Labour and Social Economy.

## References

- ABATZOGLOU, J. T., DOBROWSKI, S. Z., PARKS, S. A. and HEGEWISCH, K. C., 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*.
- BATJES, N. H., 2016. Geoderma Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, **269**, pp. 61–68.
- BERTAGLIA, M., JOOST, S. and ROOSEN, J. 2007. Identifying European marginal areas in the context of local sheep and goat breeds conservation: A geographic information system approach. *Agricultural Systems*, **94**, pp. 657–670.
- CAI, X., ZHANG, X. and WANG, D., 2011. Land Availability for Biofuel Production. *Environmental Science & Technology*, **45**, pp. 334–339.
- CARBONELL-RIVERA, J. P., ESTORNELL, J., RUIZ, L. A., TORRALBA, J. and CRESPO-PEREMARCH, P., 2020. Classification of UAV-based photogrammetric point clouds of riverine species using machine learning algorithms: a case study in the Palancia river, Spain. *ISPRS Archives*, **43**, pp. 659–666.
- CIRIA, C., SANZ, M., CARRASCO, J. and CIRIA, P., 2019. Identification of Arable Marginal Lands under Rainfed Conditions for Bioenergy Purposes in Spain. *Sustainability*, **11**, 1833.
- ELBERSEN, B., VAN EUPEN, M., MANTEL, S., VERZANDVOORT, S., BOOGAARD, H., MUCHER, S., CICARRELI, T., ELBERSEN, W., BAI, Z., IQBAL, Y., COSSEL, M., MCCALLUM, I., CARRASCO, J., CIRIA RAMOS, C., MONTE, A., SCORDIA, D. and ELEFThERiADIS, I., 2018. Methodological approaches to identify and map marginal land suitable for industrial crops in Europe (Deliverable D2.6).
- ELIASSON, Å., JONES, R. J. A., NACHTERGAELE, F., ROSSITER, D. G., TERRES, J.-M., VAN ORSHOVEN, J., VAN VELTHUIZEN, H., BÖTTCHER, K., HAASTRUP, P. and LE BAS, C., 2010. Common criteria for the redefinition of Intermediate Less Favoured Areas in the European Union. *Environmental Science & Policy*, **13**, pp. 766–777.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2017. Copernicus Land Monitoring Service - Reference Data: EU-DEM.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2018. Copernicus Land Monitoring Services - High Resolution Layers (HRL) for 2012, 2015 and 2018. Datasets. Available: <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers> [8/01, 2019].
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019a. Copernicus Land Monitoring Services - Corine Land Cover 1990 to 2018. Datasets. Available: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> [10/01, 2020].

- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019b. Copernicus Land Monitoring Services - Corine Land Cover 1990 to 2018. Datasets.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019c. Nationally designated areas (CDDA). Datasets. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/nationally-designated-areas-national-cdda-15> [10/01, 2020].
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019d. Natura 2000 data - the European network of protected sites. Datasets. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-11> [10/01, 2020].
- EUROSTAT, 2020. Agri-environmental indicator - soil erosion. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_soil\\_erosion#Data\\_sources](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_soil_erosion#Data_sources) [11/10, 2020].
- GEORGIADIS, C., TASSOPOULOU, M., TORRALBA, J., VERDE, N., GÓMEZ-CONEJO, R., GROMMY, E., ALEKSANDROWICZ, S. and KRUPIŃSKI, M., 2021. Deliverable 2.3 Report on Methodology development. Identifying Marginal Lands in Europe and strengthening their contribution potentialities in a CO2 sequestration strategy (MAIL). H2020 MSCA RISE 2018.
- GERWIN, W., REPMANN, F., GALATSIDAS, S., VLACHAKI, D., GOUNARIS, N., BAUMGARTEN, W., VOLKMANN, C., KERAMITZIS, D., KIOURTSIS, F. and FREESE, D., 2018. Assessment and quantification of marginal lands for biomass production in Europe using soil-quality indicators. *SOIL*, **4**, pp. 267–290.
- GOPALAKRISHNAN, G., NEGRI, M. C. and SNYDER, S. W., 2011. A Novel Framework to Classify Marginal Land for Sustainable Biomass Feedstock Production. *Journal of Environment Quality*, **40**, 1593.
- HANSEN, M. C., POTAPOV, P. V., MOORE, R., HANCHER, M., TURUBANOVA, S. A., TYUKAVINA, A., THAU, D., STEHMAN, S. V., GOETZ, S. J., LOVELAND, T. R., KOMMAREDDY, A., EGOROV, A., CHINI, L., JUSTICE, C. O. and TOWNSHEND, J. R. G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, **342**, 850 LP – 853.
- HIEDERER, R., 2013. Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes. Luxembourg.
- HOLLANDER, J. H., 1895. The Concept of Marginal Rent. *The Quarterly Journal of Economics*, **9**, 175.
- ISRIC-WORLD SOIL INFORMATION., 2020. SoilGrids250m 2.0 - Cation exchange capacity at pH7. DOI: 10.17027/isric-soilgrids.713396fc-1687-11ea-a7c0-a0481ca9e724.
- IVANINA, V., ROIK, M. and HANZHENKO, O., 2016. Report on MagL concepts, debate and indicators (D2.3). Ukraine.
- KANG, S., POST, W., WANG, D., NICHOLS, J., BANDARU, V. and WEST, T., 2013a. Hierarchical marginal land assessment for land use planning. *Land Use Policy*, **30**, pp. 106–113.
- KANG, S., POST, W. M., NICHOLS, J. A., WANG, D., WEST, T. O., BANDARU, V. and IZAURRALDE, R. C., 2013b. Marginal Lands: Concept, Assessment and Management. *Journal of Agricultural Science*, **5**.
- LI, G., MESSINA, J. P., PETER, B. G. and SNAPP, S. S., 2017. Mapping Land Suitability for Agriculture in Malawi. *Land Degradation and Development*, **28**, 2001–2016.
- MALINOWSKI, R., LEWIŃSKI, S., RYBICKI, M., GROMNY, E., JENEROWICZ, M., KRUPIŃSKI, M., NOWAKOWSKI, A., WOJTKOWSKI, C., KRUPIŃSKI, M., KRÄTZSCHMAR, E. and SCHAUER, P., 2020. Automated Production of a Land Cover/Use Map of Europe Based on Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, **12**, 3523.
- MELLOR, P., LORD, R. A., JOÃO, E., THOMAS, R. and HURSTHOUSE, A., 2021. Identifying non-agricultural marginal lands as a route to sustainable bioenergy provision - A review and holistic definition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **135**, 110220.
- PEKEL, J. F., COTTAM, A., GORELICK, N. and BELWARD, A. S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, **540**(7633), pp. 418–422.
- PENMAN, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*.
- REGER, B., OTTE, A. and WALDHARDT, R., 2007. Identifying patterns of land-cover change and their physical attributes in a marginal European landscape. *Landscape and Urban Planning*, **81**, pp. 104–113.
- SAUER, T. J., JAMES, D. E., CAMBARDELLA, C. A. and HERNANDEZ-RAMIREZ, G., 2012. Soil properties following reforestation or afforestation of marginal cropland. *Plant and Soil*, **360**, pp. 375–390.
- STRIJKER, D., 2005. Marginal lands in Europe—causes of decline. *Basic and Applied Ecology*, **6**, pp. 99–106.
- ZHANG, J., HE, C., CHEN, L. and CAO, S. 2018. Improving food security in China by taking advantage of marginal and degraded lands. *Journal of Cleaner Production*, **171**, pp.1020–1030.
- ZOLEKAR, R. B. and BHAGAT, V. S., 2015. Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, **118**, pp. 300–321.



# MODELACIÓN DE °BRIX Y PH EN UVA VINÍFERA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES. VALLE DE COLCHAGUA, CHILE

## MODELING °BRIX AND PH IN WINE GRAPES FROM SATELLITE IMAGES IN COLCHAGUA VALLEY, CHILE

Sandra Fredes\*, Luis Ángel Ruiz, Jorge Abel Recio

Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [sanfre@doctor.upv.es](mailto:sanfre@doctor.upv.es); [laruiz@cgf.upv.es](mailto:laruiz@cgf.upv.es); [jrecio@cgf.upv.es](mailto:jrecio@cgf.upv.es)

### Abstract:

In order to monitor the ripeness and composition of wine grape berries and establish an optimal harvest date, the determination of °Brix and pH is vital. This research includes the study of two wine grapes harvests seasons of Cabernet Sauvignon variety: 2017 and 2018. Field data was periodically taken, allowing to follow the phenological state of the vine. Incorporating technological solutions to the fruit sampling process, such as Sentinel-2 images, permits optimizing a handcrafted procedure and gives the possibility of having a more detailed view of the plots. From the images, 12 variables were obtained, composed of 8 bands and 4 spectral indices, which were related to variables extracted from field samples. The °Brix modeling presents an R<sup>2</sup> of 69% and 73% in the 2017 and 2018 seasons, respectively. In pH modeling, the 2017 season had low R<sup>2</sup> results, reaching 43%, which then improves considerably in the 2018 season, reaching 63.8%. By choosing a model that allows defining the variability of the plot and the possible early or late ripening areas of the vineyard, is not only very useful but also very valuable to reach a constant improvement in production and hence in the wine quality.

**Key words:** °brix, pH, Sentinel-2, precision of viticulture, remote sensing

### Resumen:

Con el fin de monitorear la madurez y composición de las bayas de uva vinífera y determinar una fecha óptima de cosecha, es vital la determinación de °Brix y pH. Esta investigación comprende el estudio de dos temporadas de cosecha de uva vinífera de variedad Cabernet Sauvignon: 2017 y 2018. Periodo en el cual se tomaron periódicamente datos de campo que permitieron seguir el estado fenológico de la vid hasta el momento de la cosecha y posterior vinificación. Incorporar soluciones tecnológicas, como el uso de imágenes satelitales, en este caso Sentinel-2, al proceso de muestreo de fruta, permite optimizar un proceso artesanal, dando la posibilidad de tener una visión más detallada del cuartel, lo que hace más eficiente el trabajo de terreno. Desde las imágenes se obtuvieron 12 variables compuestas por 8 bandas y 4 indicadores (NDVI, NDMI, Clorofila y GNDVI) que se relacionaron con variables extraídas de muestreos de campo. Con dichos datos se seleccionó el mejor modelo de regresión lineal múltiple, utilizando 3 variables para predecir °Brix y pH. La modelación de °Brix presenta un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> de 69% y 73% en las temporadas 2017 y 2018, respectivamente. En el caso de la modelación de pH, la temporada 2017 tiene bajos resultados de R<sup>2</sup>, alcanzando un 43%, el cual mejora considerablemente en la temporada 2018, alcanzando un 63.8%. Determinar un modelo que permita definir la variabilidad de la parcela y, por tanto, las posibles zonas de maduración temprana o tardía del viñedo, es de gran utilidad para concretar una mejora en la producción y por ende en la calidad del vino.

**Palabras clave:** °brix, pH, Sentinel-2, viticultura de precisión, remote sensing

## 1. Introducción

Según los últimos datos presentados por la Organización Internacional de la Uva y el Vino (OIV) en abril de 2020, la superficie vitícola mundial estaría sobre los 7,5 millones de hectáreas considerando la superficie de uvas destinada a vinificación, uva de mesa y uvas pasas (Buzzetti 2018). En Chile, la superficie total de viñas para vinificación ocupa actualmente más de 192 mil hectáreas, las cuales tienen un potencial de producción de vino cercano a los 1.200 millones de litros. Actualmente Chile es el segundo productor de vinos de América y cuarto exportador mundial de vinos, siendo superado sólo por países europeos de vasta trayectoria en materias vitivinícolas, como Francia, España e Italia. Esta superficie se encuentra principalmente, en las regiones

de O'Higgins y del Maule, concentrando más del 72% de la superficie nacional. Dentro de la industria vitivinícola, Viña Montes, empresa propietaria de los viñedos en los que se ha desarrollado este estudio, tiene un total de 720 hectáreas de vid y exporta un 93% de su producción (Müller 2004; Lima 2015).

La recopilación de datasets espaciales georreferenciados, como las imágenes satelitales, permite a los viticultores optimizar el proceso de toma de decisiones minimizando la variabilidad del rendimiento, así como también aprovechar esta variabilidad para aplicar la cosecha selectiva para aumentar la calidad del vino (Ammoniacci *et al.* 2021). La producción de vino de calidad requiere una adecuada selección de fruta para ser incorporada al proceso (Martinez-Casasnovas *et al.* 2010; Perez Quezada 2006). En la literatura destaca el

\* Corresponding Author: Sandra Fredes, [sanfre@doctor.upv.es](mailto:sanfre@doctor.upv.es)

uso del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para gestionar una cosecha dirigida y relacionar con él factores de calidad como azúcar y acidez. Se ha comprobado que el valor de NDVI está relacionado linealmente con el área foliar (Johnson *et al.* 2003), maduración de la fruta, infestación y enfermedades, estatus hídrico (Van Leeuwen *et al.* 2004), contenido de antocianos (Hall *et al.* 2003), taninos en la piel de la uva (Cortell *et al.* 2005), evaluación de rendimiento (Cunha *et al.* 2010; Martínez-Casasnovas *et al.* 2010) y propiedades de la madurez de la fruta (Martínez-Casasnovas *et al.* 2012).

En los últimos años, la disponibilidad de datos gratuitos de satélites como Sentinel-2 ha generado un mayor interés en su uso potencial en la viticultura (Atzberger 2013; Khaliq *et al.* 2019; Sozzi *et al.* 2020), convirtiéndose en una solución atractiva para el monitoreo espacio temporal de muchos cultivos (Borgogno-Mondino *et al.* 2018), entregando información oportuna, sinóptica, rentable y repetitiva (Atzberger 2013) y en el potencial que tiene su uso en operaciones de manejo de la vid, como el deshierbe y la poda (Devaux *et al.* 2019), visibilizando principalmente la variabilidad intraparcularia, la cual ha sido uno de los focos de la viticultura de precisión, debido a que las prácticas agrícolas se aplicaban tradicionalmente de manera uniforme (Bramley 2010), con la misma intensidad o dosis en operaciones como poda, fertilización, riego o tratamientos fitosanitarios (Arnó *et al.* 2009). Según Urretavizcaya *et al.* (2014) la variabilidad tiene implicaciones en la calidad de la uva y en la rentabilidad. Por ello, la identificación y la caracterización espacial de dicha variabilidad, la interpretación de su significado enológico, así como la posibilidad del manejo diferencial de dicha variabilidad, constituyen los principales objetivos de la Viticultura de Precisión (Matese and Di Gennaro 2015; Pastonchi *et al.* 2020).

Identificar la variabilidad intraparcularia tiene implicaciones en la calidad del vino, así como en el control del proceso de maduración (Bramley 2010), información esencial durante la vendimia, que dependiendo del tipo y tamaño del viñedo, se realiza generalmente combinando tecnología de vendimia manual y mecanizada. Las parcelas predefinidas se evalúan semanalmente después del envero con el fin de medir el contenido de azúcar y ácido, estos son los parámetros más comunes en los que se basan los viticultores para determinar el momento correcto para la cosecha (Lima 2015). Definir cuándo y qué cuarteles serán cosechados se basa únicamente en la evaluación organoléptica que se realiza en terreno diariamente, tal como lo grafica Sun *et al.* (2017), las observaciones de campo de las etapas de crecimiento de la vid son demasiado escasas para capturar completamente la variabilidad espacial de las condiciones de la vid. Por lo tanto, mejorar el rendimiento del viñedo y la calidad de la uva a través de un conocimiento adecuado de la variabilidad espacial del viñedo para reducir los costos y el impacto ambiental es uno de los actuales desafíos (Khaliq *et al.* 2019; Pastonchi *et al.* 2020). Optimizar la producción de vino requiere comprender los factores que influyen en su variabilidad espacial y temporal, el suelo, el clima, la fisiología vegetal y el manejo agrícola que son responsables de las diferentes expresiones fisiológicas de la vid (Priori *et al.* 2019). La variabilidad en el viñedo es un problema estudiado ampliamente en Australia,

Francia y España (Taylor *et al.* 2005; Arnó *et al.* 2005), Chile (Mashalaba *et al.* 2020), Nueva Zelanda (Trought *et al.* 2008) y Canadá (Reynolds and Rezaei 2014), entre otros, confirmando que la variabilidad es un factor a considerar para mejorar la calidad del vino. El NDVI, uno de los índices de vegetación más utilizados (Pastonchi *et al.* 2020), utiliza las bandas espectrales visible (Rojo) e infrarrojo cercano (NIR), que están estrechamente relacionadas con las características vegetativas y productivas del cultivo (Khaliq *et al.* 2019).

La calidad del vino está estrechamente relacionada con la calidad de la fruta, y el follaje del cultivo está relacionado con la interacción del suelo, el clima, el estado del agua y el manejo agronómico, que son factores que afectan directamente la calidad de la fruta. Por lo tanto, podemos plantear la hipótesis de que el uso de índices espectrales derivados de imágenes Sentinel-2 puede proporcionar información indirecta pero valiosa sobre aquellas variables medidas directamente en la fruta y que son indicadores de la calidad del vino, como el azúcar y la acidez. Además, conocer su distribución espacial en momentos clave contribuiría a planificar mejor la cosecha diferencial para la producción de vino de calidad. Este estudio tiene como objetivo contribuir a la gestión selectiva de los cultivos de vid, mediante el uso de imágenes satelitales de resolución espacial media (Sentinel-2) desde una doble perspectiva: (i) el análisis de bandas espectrales e índices para generar modelos que permitan estimar °Brix (concentración de azúcar en la baya) y pH y (ii) explorar el uso de imágenes Sentinel-2 para diferenciar y mapear la variabilidad del cultivo de la vid, con el fin de identificar áreas potenciales de maduración temprana o tardía. Esto implicaría un beneficio directo para la cosecha selectiva y, en consecuencia, supondría una mejora sustancial de la producción y la calidad del vino.

## 2. Materiales y Métodos

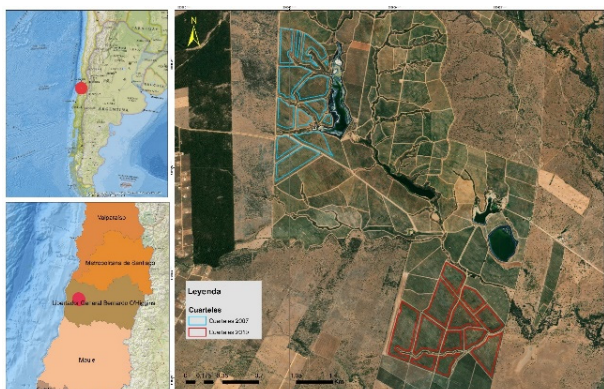
Esta investigación comprende el estudio de datos de campo de dos temporadas de cosecha de producción de uva vinífera: 2017 y 2018. Se estudiaron dos lotes (grupo de cuarteles) de variedad Cabernet Sauvignon, donde se tomaron periódicamente datos de campo que permitieron seguir el estado fenológico de la vid hasta el momento de la cosecha y posterior vinificación.

### 2.1. Área de estudio

Viña Montes tiene una superficie de 720 ha de vid. La plantación en estudio está ubicada en Marchigue, valle de Colchagua en Santa Cruz, VI región, en Chile (Fig. 1), se conoce como Arcángel, la cual tiene una superficie total plantada de 499 has, conformadas por lotes de diversas variedades: Cabernet Sauvignon, Syrah, Carmenere, entre otros; y diversas categorías de calidad.

El área de interés en la cual se desarrolla este estudio está formada por 23 cuarteles, un cuartel corresponde al polígono que encierra un grupo de hileras de una misma cepa. En este caso se agrupan en 2 grupos o lotes: 12 cuarteles formados por 13 polígonos que suman un total de 64.8 has y 11 cuarteles formados por 12 polígonos que suman 71 has, correspondientes a plantaciones de los años 2007 y 2010 respectivamente, según se observa en la Figura 1. Los lotes están conformados un 100% por la variedad Cabernet Sauvignon, categoría Alfa, categoría

intermedia de calidad que corresponde a la mayor producción de Viña Montes, plantados según un patrón de 2x1.



**Figura 1:** Mapas de ubicación general (izq.) y de emplazamiento de los cuarteles Cabernet Sauvignon (der.); polígonos cian corresponden a plantaciones del año 2007 y polígonos rojos a plantaciones del año 2010. Imagen de Fondo: BaseMap ArcGIS, World Imagery.

Las coordenadas en Proyección UTM, WGS 84 Huso 19S, que hacen referencia al centro de cada uno de los lotes son: Plantación 2007: ESTE: 254096,003 m; NORTE: 6197606,610 m; Plantación 2010: ESTE: 255503,426 m; NORTE: 6195483,135 m.

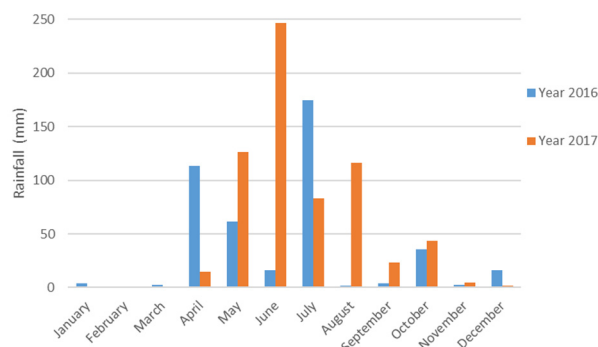
### 2.1.1. Ciclo de la vid y meteorología de la zona

Gran parte de la producción vitivinícola en el mundo, se desarrolla en climas de tipo mediterráneo, caracterizado por altas temperaturas en la época estival, una alta intensidad luminosa y niveles de humedad ambiente que disminuyen fuertemente a lo largo del día (Chaves *et al.* 1987). Precisamente, en la zona de estudio predomina un clima templado de tipo mediterráneo cálido (Uribe and Catalan 2016) con una estación seca de seis meses y un invierno lluvioso con una precipitación total anual entre 400 y 600 mm. Los suelos son de origen aluvial, con texturas franco-limosas (Giraldo 2017).

El ciclo puede tener algunas variaciones que se ven influenciadas por diferencias en las condiciones de temperatura y precipitaciones (Pardo 2016). Un aumento significativo en las temperaturas, sumado a una disminución en las precipitaciones, provocaría un mayor estrés hídrico en las plantas. Por otro lado, un incremento de las temperaturas promedio y la reducción de la oscilación térmica, influye en el aroma de los variedades y el color de los vinos. Así mismo, los otoños cada vez más secos y las lluvias ocasionales asociadas a eventos intensos, implicarían mayores requerimientos de riego para los viñedos (Giraldo 2017).

La influencia de las precipitaciones en el ciclo fenológico de la vid requiere la acumulación de agua caída el año previo. En el caso de las temperaturas, su influencia es directa durante el mismo año de la vendimia. El ciclo fenológico de 2017 está marcado por las precipitaciones del año 2016, escasas en comparación con las precipitaciones acumuladas del año 2017 (ciclo fenológico de la vid 2018), que se duplicaron con relación a 2016 (Fig. 2). Durante la temporada 2018, la temperatura del aire se presentó relativamente más baja que el año 2017 durante el ciclo de maduración de la vid.

La diferencia de temperaturas alcanzó 1.99 °C lo que se traduce en un 11% más bajo. La radiación solar durante el ciclo, también se presentó levemente más baja alcanzando un promedio de diferencias de -5.8% según se aprecia en la Figura 2, la cual muestra una comparación quincenal de la temperatura del aire y la radiación solar, en ambas temporadas. En la cual se aprecian las mayores diferencias justamente en pleno verano antes del envero.



**Figura 2:** Precipitación Mensual 2017 y 2018.

## 2.2. Datos

### 2.2.1. Imágenes satelitales

La Figura 3 muestra la fecha de adquisición de un conjunto de 16 imágenes. La constelación Sentinel -2 está formada por 2 satélites de órbita heliosíncrona cuya resolución temporal es de 10 días por satélite o 5 en conjunto. Ambos satélites llevan un sensor de imágenes multispectrales (MSI) capaz de adquirir imágenes en 13 bandas espectrales, desde 433 nm hasta 2280 nm. La banda del rojo (665 nm) y del infrarrojo cercano (842 nm) son de particular interés para la aplicación agrícola, ya que permiten recuperar varios índices de vegetación a 10 m de resolución espacial (Sozzi *et al.* 2020). Las imágenes Sentinel-2, fueron descargadas directamente desde la plataforma *Copernicus Open Access Hub*.

Las imágenes Sentinel 2A y Sentinel 2B y se descargaron en nivel de procesamiento 1C, las cuales fueron corregidas atmosféricamente para obtener reflectividades en superficie, mediante la aplicación Sen2cor en el entorno de SNAP. Las fechas y nivel de procesamiento se aprecia en la Figura 3.

### 2.2.2. Datos de campo

El envero es una etapa muy importante para el enólogo, ya que la maduración comienza con el envero. La duración de esta etapa es variable y puede ir de 20 a 50 días según el punto de cosecha deseado. A partir de este momento, el agua, los azúcares y los compuestos nitrogenados son transportados al grano. Las bayas comienzan a aumentar peso y tamaño, por acumulación de sustancias nutritivas (principalmente azúcares) y agua, alcanzando su tamaño máximo. Al fin de la etapa la semilla está apta para germinar, se le llama también madurez fisiológica (Catania and Avagnina 2007). Para cuantificar la concentración de azúcar, se utiliza un refractómetro con compensación automática de temperatura, rango 0-32% Brix, como se colectan bayas de distintos sectores dentro del área de muestreo, el resultado se traduce como el promedio de la muestra. El



pH es la medida de la concentración de iones hidrógenos libres y es un término utilizado para determinar la acidez (Castro 2005). El manejo adecuado de la acidez y el pH es fundamental, ya que en última instancia determina la

calidad de los vinos (Forino *et al.* 2020), ya que influye en las propiedades sensoriales y equilibrio de los vinos (Picariello *et al.* 2019). Las mediciones fueron realizadas con un pHmetro.

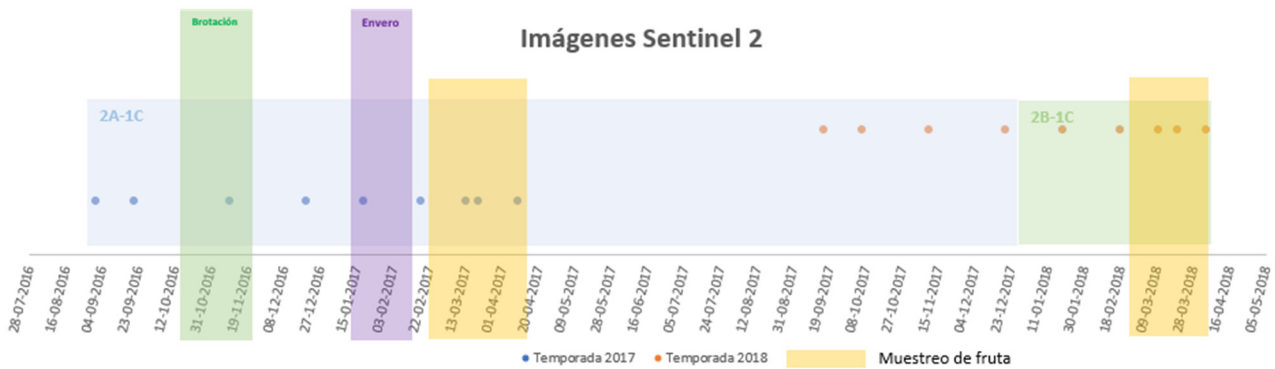


Figura 3: Características de las imágenes Sentinel-2 utilizadas. Caracterización del comportamiento vegetacional de la vid en ambas temporadas desde brotación (septiembre) a abril (cosecha). Se muestra simultáneamente la etapa de brotación y envero para la temporada 2017 y las fechas destinadas a muestreo de fruta en campo en ambas temporadas.

### 2.3. Métodos

#### 2.3.1. Muestreo de datos Brix y pH en campo

La ubicación geográfica de las muestras de baya se basó en el conocimiento e identificación de zonas críticas y homogéneas de calidad de producción histórica del vino. Para ello se precisó del conocimiento del técnico agrónomo de Viña Montes. Para la ubicación de las muestras se utilizó el NDVI histórico del mes de diciembre y el Modelo Digital de Elevaciones de la zona (DEM), se definieron zonas que compartieran características comunes de expresión vegetativa y topografía y luego se distribuyeron espacialmente las muestras de forma homogénea en el área de interés. De esta categorización se obtuvo la posición específica en la cual se ubicarían 15 muestras en 14 cuarteles (Fig. 4).



Figura 4: Distribución espacial de las muestras físicas de bayas (puntos verdes). Polígonos en amarillo corresponden a todos los cuarteles de variedad Cabernet Sauvignon. Imagen ArcMap.

El cuartel 7.08 muestra dos posiciones de muestreo, los cuales fueron promediados. Con equipamiento GPS, se marcó la posición central de cada muestra, desde la cual se tomó el radio para extraer las bayas a analizar. La toma de datos se realizó en un radio de 15 metros desde

la posición central, tomando un promedio de 300 bayas por punto de muestreo, las bayas son homogéneas, se escogen 5 bayas por racimo: 3 bayas de los hombros del racimo, 1 de la parte media y 1 de la parte inferior del racimo.

Las Figuras 5a y 5b, muestran la evolución de las muestras de campo °Brix (a) y pH (b) en las dos temporadas. En ellos es posible desprender que la temporada 2018 alcanzó mejores valores tanto de acumulación de azúcar como de acidez.

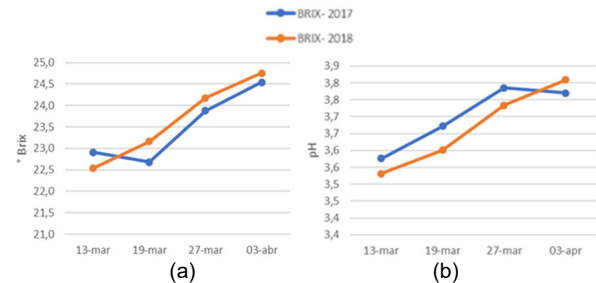


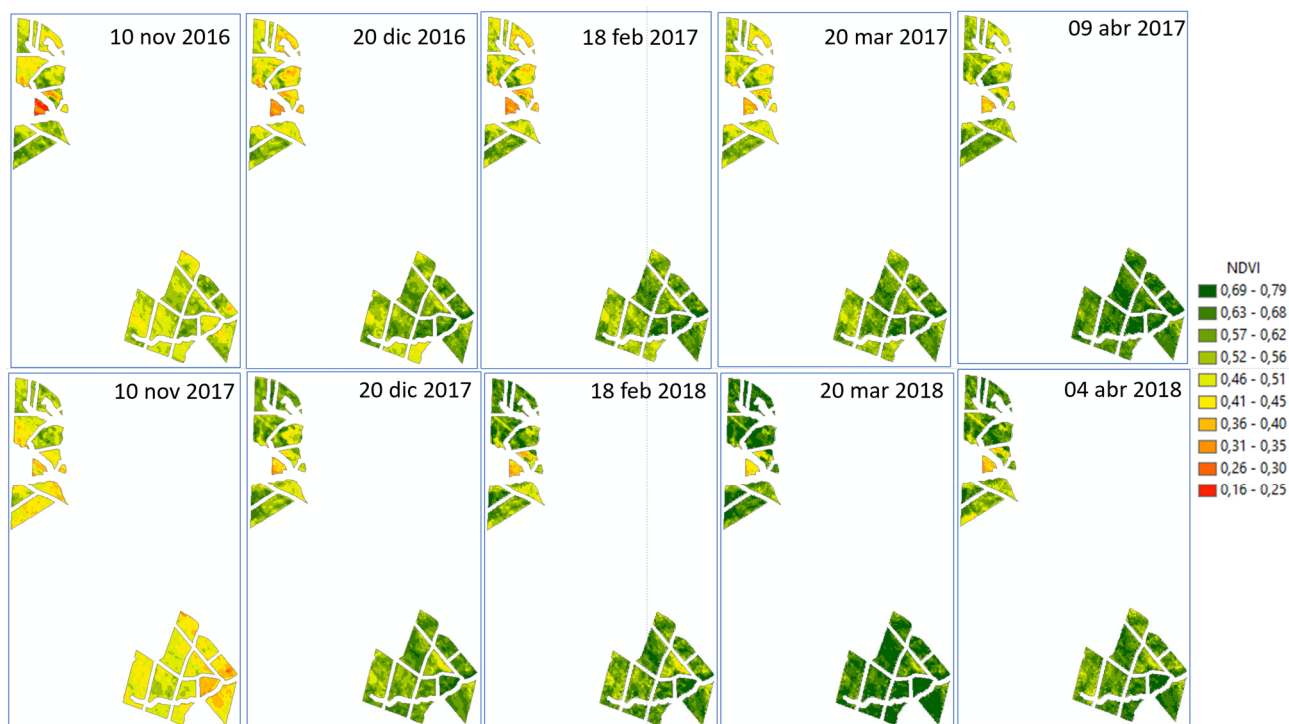
Figura 5: Comparación de muestras: a) de Brix; b) de pH.

#### 2.3.2. Índices espectrales

Se utilizaron imágenes Sentinel, corregidas geométrica y radiométricamente y corregistradas entre sí mediante puntos de control de terreno. En el proceso de corrección geométrica se utilizó el método del vecino más cercano y se conservó el tamaño original de pixel. La reflectancia en un pixel de 10 metros estará influenciada por el follaje, el suelo y, en un bajo porcentaje, por las bayas. Por tanto, las variaciones espectrales principales y que son objeto de interés tienen que ver con las variaciones en el follaje. Con este objetivo se escogieron 4 índices espectrales. Estos índices son de amplio uso en diversas aplicaciones agrícolas: Green Normalized Difference Vegetation Index ( $GNDVI = \frac{Nir-verde}{Nir+verde}$ ), Normalized Difference Vegetation Index ( $NDVI = \frac{Nir-Rojo}{Nir+Rojo}$ ), Normalized Difference Moisture Index ( $NDMI = \frac{Nir-Swir1}{Nir+Swir1}$ ), and Clorofila ( $Clorofila = \frac{Rojo-Azul}{Verde}$ ). En el caso del índice llamado Clorofila, se utilizan las bandas del visible, ya que este rango espectral está dominado

por las propiedades ópticas de los pigmentos fotosintéticos de las hojas (Hallik *et al.* 2017). En el caso del NDVI, utiliza las bandas NIR y SWIR1 (Sentinel 2), para determinar el contenido de humedad en el dosel (Herrera and Chuvieco 2014). Se utiliza la banda SWIR1,

correspondiente a la longitud de onda comparativamente más parecida a la banda de onda corta de Landsat, base del indicador (Brom *et al.* 2012; Gao 1996; Wang *et al.* 2011, 2013).



**Figura 6:** Representación gráfica del NDVI desde floración a cosecha para las temporadas 2017 (fila superior) y 2018 (fila inferior). Escala grafica de 10 rangos única para todas las fechas.

La visualización de comportamiento y evolución que tiene el viñedo permite dar una visión general, tanto del estado de los cuarteles como del desarrollo en ambas temporadas (Hernández *et al.* 2014). La mejor expresión vegetativa, o el máximo potencial de NDVI, se da en verano y generalmente posterior al envero empieza a modificarse el follaje y ya en el periodo de cosecha comienza a perder hojas. La Figura 6 muestra los mapas de NDVI visualizados en una escala de 10 rangos.

### 2.3.3. Modelización de °Brix y pH

Se creó una tabla de información por cada fecha de muestreo. La tabla de información incluía el nombre del cuartel, el valor de la muestra correspondiente al promedio de las bayas tomada en un radio de 15 metros alrededor de la posición central y los datos obtenidos desde las imágenes correspondientes a la fecha más próxima al muestreo. Para ello, se creó una capa vectorial de puntos correspondiente a las coordenadas de los puntos de muestreo y se realizó un buffer de 15 metros alrededor de ellos. El buffer se utilizó como un polígono desde el cual se extrajo el valor promedio de los píxeles de las 8 bandas utilizadas y de los cuatro índices.

En total 14 muestras con 12 variables independientes para determinar si existe una combinación que espectralmente explique el contenido de azúcar y el pH en las bayas. Se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre °Brix y pH y las bandas e indicadores de las imágenes satelitales.

## 3. Resultados

### 3.1. Comparación de Coeficiente de Determinación R<sup>2</sup>

La determinación de los modelos °Brix y pH comienza con la selección del mejor modelo de regresión a partir de la combinación de múltiples variables. El modelo de regresión se obtuvo considerando las mejores variables en cada fecha. A partir de la imagen, se consideraron todos los píxeles dentro de un círculo de radio de 15 metros alrededor de la muestra de terreno. Mediante el ajuste de mínimos cuadrados ordinarios, se obtuvo la información sobre los modelos de regresión múltiple, de los cuales se derivaron los valores estadísticos de validación de cada modelo y la ecuación del modelo ajustado para cada caso. Según los resultados en °Brix, la comparación del R<sup>2</sup> en ambas temporadas muestra que, en general (Fig. 7), la temporada 2017 alcanza mejores coeficientes desde mediados de marzo con 2 variables; a diferencia de la temporada 2018 que se produce a finales de marzo. En el caso de la temporada 2017, con 3 variables en adelante, independientemente de la fecha, el coeficiente de determinación no baja del 67%.

Al enfocarse en los resultados de pH, la comparación de R<sup>2</sup> en ambas temporadas muestra una mayor estabilidad en las fechas ya que los más altos R<sup>2</sup> se concentran en el muestreo del 19 de marzo. En el caso de la temporada 2018, los R<sup>2</sup> más altos se dividen entre el 13 de marzo y a fines de este.

A diferencia de la modelación de °Brix, el caso de pH en todas las combinaciones alcanzan valores más bajos, aunque mejora discretamente durante la temporada 2018, la cual consideran el promedio de todas las fechas de muestreo con relación al número de variables tanto para °Brix como para pH.

Las estadísticas obtenidas en la modelación de °Brix y pH, se observan en las Figuras 8 y 9, la que incluye el gráfico de dispersión para los valores de los puntos de muestreo en relación con los valores observados respecto de los predichos.

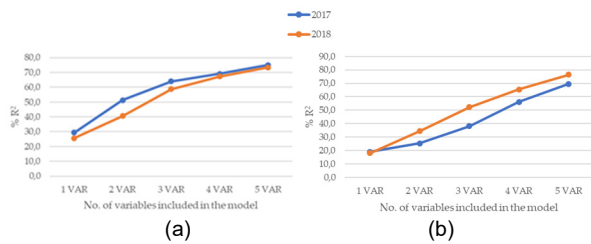


Figura 7: Promedio de coeficientes de determinación  $R^2$  en las temporadas 2017 y 2018 para: a) °Brix; b) pH.

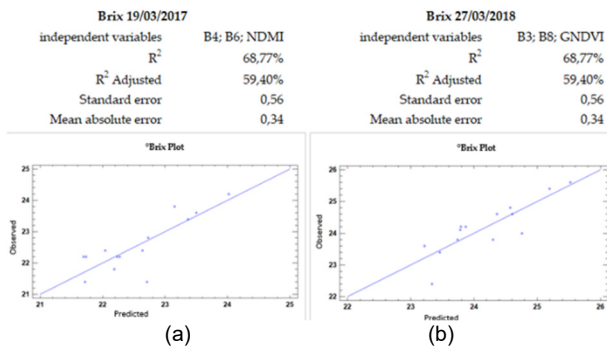


Figura 8: °Brix. Estadísticas de Regresión múltiple para las temporadas: a) 2017; b) 2018.

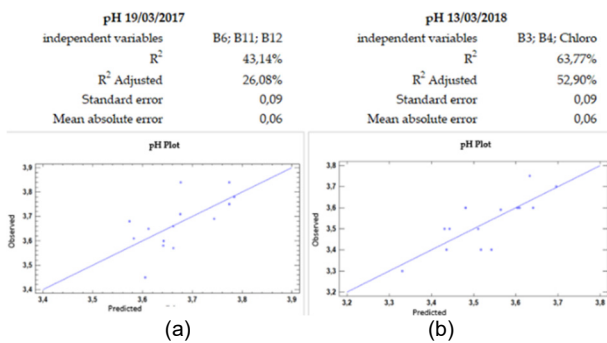


Figura 9: pH. Estadísticas de Regresión múltiple para las temporadas: a) 2017; b) 2018.

### 3.2. Modelo aplicado

Como se puede apreciar en la Tabla 1, no existe igualdad de variables utilizadas en los modelos para el caso de la modelación de °Brix, la cual incluye en ambas temporadas 2 bandas y un índice, a diferencia de lo que se obtiene en la modelación de pH, en la cual, en la primera temporada se incluyen 3 bandas y en la segunda temporada 2 bandas y un índice espectral, correspondientes a: bandas 3 (verde) y 4 (rojo) más el índice clorofila.

### 3.3. Mapas Estimados °Brix y pH

Mediante la aplicación de los modelos, se pueden obtener mapas representativos del estado de °Brix y pH en una fecha determinada, mostrando la variabilidad de cada parcela en cuanto al potencial de maduración. Esto permite, mediante el uso de un número limitado de muestras de campo e imágenes Sentinel-2, estimar la variabilidad de toda la parcela. Aunque la generación de estos mapas no elimina la adquisición de datos de campo, hace que el proceso de muestreo sea más eficiente, ya que facilita la identificación áreas claves en la madurez y por ende la determinación de dónde realizar el muestreo de campo.

En la imagen correspondiente a Brix, tanto en las temporadas 2017 como 2018 (Fig. 10), se logra apreciar la variación intraparcalaria, muy similar a lo mostrado en la imagen de NDVI. Se aprecia una relación inversa entre Brix y vigor, condición ratificada por Bonilla *et al.* (2015) quien indica que la mayoría de los estudios relacionados a vigor y calidad de uva reflejan que las cepas de alto vigor presentan menos contenido de antocianinas que las cepas de vigor bajo, condición que toma fuerza si se considera lo indicado por Peña (2005), los antocianos son compuestos glucosidados, por tanto la presencia de los azuceres para la formación de antocianos es imprescindible (Liu *et al.* 2018).

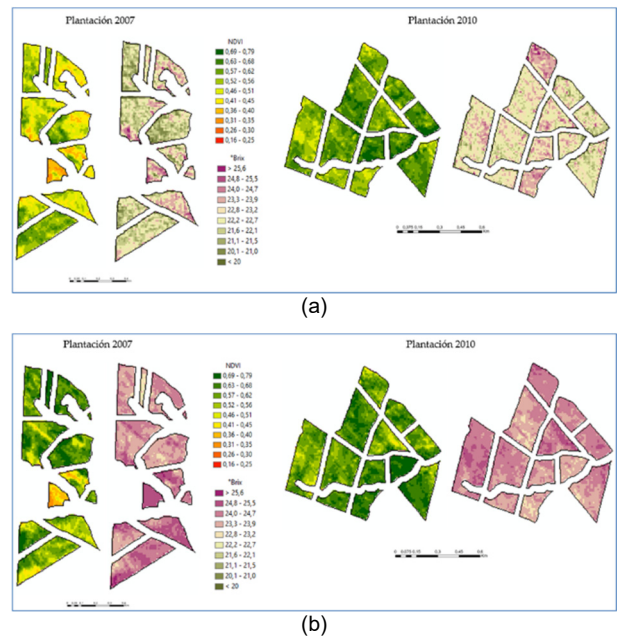


Figura 10: Mapa de modelación de °Brix para las temporadas: a) 2017; b) 2018.

En el caso de los mapas de pH (Fig. 11), no se aprecia una relación obvia con NDVI. Los modelos de pH con bajo  $R^2$  puede que se asocian a una menor representatividad respecto de la eventual variación intraparcalaria.



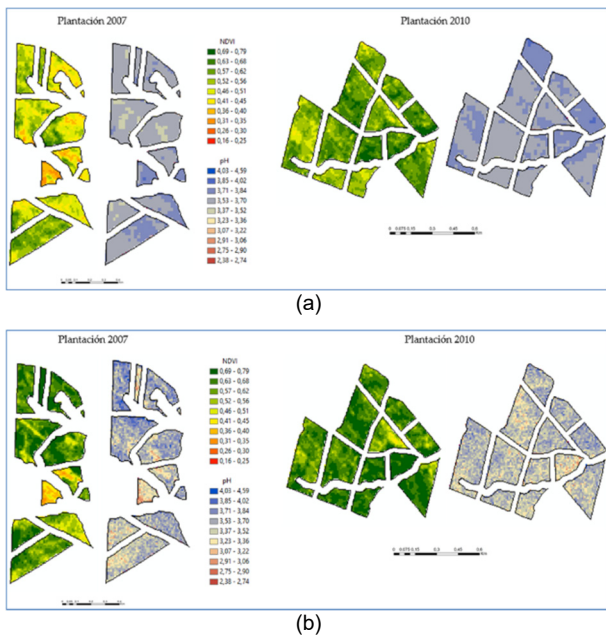


Figura 11: Mapa de modelación de pH para las temporadas: a) 2017; b) 2018.

Tabla 1: Ecuaciones para modelación de °Brix y pH. Temporadas 2017 y 2018.

Temporada	Modelo
Brix 2017	$Brix = 25,784 + 0,0122621*B4 - 0,00706689*B6 + 21,5251*NDMI$
Brix 2018	$Brix = 65,3742 - 0,0290864*B3 + 0,00840046*B8 - 73,7171*GNDVI$
pH 2017	$pH = 2,86924 + 0,000569594*B6 - 0,0000339141*B11 + 0,000296875*B12$
pH 2018	$pH = 1,31306 + 0,000736344*B3 - 0,00594737*B4 - 3,84222*CHLORO$

#### 4. Discusión

Aunque las variables meteorológicas se abordaron en este estudio como un precedente para el área y no como una variable, hubo diferencias de temperatura de hasta 4° en la primera quincena de enero, y la precipitación acumulada se duplicó en comparación con la anterior en la temporada 2018. Trought *et al.* (2008) indican que pequeñas diferencias de temperatura pueden tener influencia en la fenología de la vid. En nuestro caso, el °Brix aumentó ligeramente durante 2018, un año más fresco y con menos radiación. Aunque se espera que una temperatura y una radiación más altas faciliten la acumulación de azúcar, autores como Abeysinghe *et al.* (2019) encontraron que el crecimiento de la baya fue retrasado por sombras muy densas, pero el índice de acumulación de azúcar no fue afectado. Si tenemos en cuenta estos estudios, sería deseable considerar las condiciones climáticas como una variable adicional que podría mejorar el modelo estimado.

Otros estudios han determinado la importancia de estas condicionantes en antocianinas, recordemos que con el inicio del enero se empiezan a acumular conjuntamente azúcares y antocianinas las cuales están en directa relación (Coombe and Mccarthy 2000). Sin embargo,

como producto de los cambios de temperatura se podría provocar un desfase entre azúcares y antocianinas, así como la alteración de sus vías de acumulación y degradación (Schultz and Jones 2010). Del Valle *et al.* (2005) plantean que la luminosidad la estimula y las altas temperaturas la inhiben. Así mismo, Peña (2009) plantea que el clima de la zona y su efecto térmico y lumínico tiene gran influencia en todo el proceso de desarrollo, afectando el proceso fotosintético y a la formación de azúcares y ácidos. De igual forma lo plantean (Gutiérrez-Gamboa and Moreno-Simunovic 2018), cuando indican que las condiciones climáticas afectan a la maduración de la uva más que las características del suelo.

Las imágenes satelitales cobran real importancia cuando tienen la capacidad de registrar la variabilidad espacial del viñedo, fundamental para tomar decisiones del manejo agronómico (Mashalaba *et al.* 2020). Actualmente, se utilizan sensores electrónicos para detectar variabilidad entre parcelas a fin de permitir la aplicación de un manejo diferenciado en fertilización, poda o cosecha (Llorens *et al.* 2010). En efecto, tal como remarcan Arnó *et al.* (2017), la cosecha diferenciada tiene ventajas económicas para una viticultura más sostenible y competitiva. En este sentido, los resultados de este trabajo muestran la posibilidad de cartografiar la variabilidad espacial de indicadores de calidad de la uva de vinificación, como son los ° Brix y el pH, no sólo entre parcelas sino también intra-parcelas, mediante la obtención de modelos derivados de índices espectrales obtenidos a partir de imágenes Sentinel-2 de gran utilidad para el manejo diferenciado de las cosechas, aportando información espacial para la recolección selectiva con vistas a categorizar diferentes tipos de vino.

#### 5. Conclusiones

El presente trabajo de investigación tiene como fin determinar variaciones intraparceldarias mediante la modelación de dos de los factores fundamentales de calidad de vino: la acumulación de azúcar, medida en grados brix y el pH, a partir de variables extraídas de imágenes Sentinel 2. El trabajo se llevó a cabo en dos temporadas de cosecha y se consideraron cuatro fechas previas a la cosecha. Los mapas generados a partir de los modelos construidos pueden permitir, de forma semiautomática y con alta fiabilidad, dividir las parcelas de cultivo en varias regiones con características homogéneas (°Brix y pH) que podrían recibir un tratamiento diferencial en la cosecha. La incorporación de soluciones tecnológicas, como el uso de imágenes satelitales para el proceso de muestreo de frutas, permite mejorar un proceso artesanal, al generar un mapa de valores predichos de °Brix y pH. Esto permite definir las áreas clave a revisar en el campo, aumentando las posibilidades de llevar a cabo una cosecha dirigida, a través de muestreos específicos del sitio, lo que da la capacidad de tomar decisiones en el manejo del viñedo. En este punto, las imágenes satelitales gratuitas con alta periodicidad son accesibles incluso para viñedos más pequeños, dando la posibilidad de determinar áreas dentro de las parcelas que deben ser estudiadas y eventualmente cosechadas de manera diferenciada, ya que una adecuada selección de uvas con características similares es un factor clave para mejorar la calidad y productividad de la vinificación.

## References

- ABEYSINGHE, S. K., GREER, D. H., and ROGIERS, S. Y., 2019. The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* "Shiraz" under vineyard conditions. *Vitis*, **58**(1), pp. 7–16. DOI: 10.5073/vitis.2019.58.7-16
- AMMONIACI, M., KARTSIOTIS, S., PERRIA, R., and STORCHI, P., 2021. State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. *MDPI*, **11**(Agriculture). DOI: 10.3390/agriculture11030201
- ARNÓ, J., BORDES, X., RIBES-DASI, M., BLANCO, R., ROSELL, J. R., and ESTEVE, J. 2005. Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain). *Precision Agriculture 2005, ECPA 2005*, June 2015, pp. 899–906.
- ARNÓ, J., MARTÍNEZ CASASNOVAS, J. A., RIBES DASI, M., and ROSELL, J. R., 2009. Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research*, **7**(4). DOI: 10.5424/sjar/2009074-1092
- ARNÓ, JAUME, MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A., and TEJADA MORAL, M., 2017. Assessing opportunities for selective winery vintage with a market-driven composite index. *Cogent Food & Agriculture*, **3**(1), 1386438. DOI: 10.1080/23311932.2017.1386438
- ATZBERGER, C., 2013. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, **5**(2), 949–981. DOI: 10.3390/rs5020949
- BONILLA, I., DE TODA, F. M., and MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A., 2015. Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: Analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo. *Spanish Journal of Agricultural Research*, **13**(2), pp. 1–8. DOI: 10.5424/sjar/2015132-7809
- BORGOGNO-MONDINO, E., LESSIO, A., TARRICONE, L., NOVELLO, V., and DE PALMA, L., 2018. A comparison between multispectral aerial and satellite imagery in precision viticulture. *Precision Agriculture*, **19**(2), pp. 195–217. DOI: 10.1007/s11119-017-9510-0
- BRAMLEY, R. G. V., 2010. Precision Viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. In *Managing Wine Quality: Viticulture and Wine Quality*. Woodhead Publishing Limited. DOI: 10.1533/9781845699284.3.445
- BROM, J., NEDBAL, V., PROCHÁZKA, J., and PECHAROVÁ, E., 2012. Changes in vegetation cover, moisture properties and surface temperature of a brown coal dump from 1984 to 2009 using satellite data analysis. *Ecological Engineering*, **43**, pp. 45–52. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.03.001
- BUZZETTI, C., 2018. Una Mirada al Mercado Vitivinícola Nacional e Internacional. Santiago de Chile, Chile: Odepa.
- CASTRO, A. L., 2005. *Efecto del Momento de Cosecha de Uva cv. Merlot sobre la composición química y sensorial de los vinos en el valle del Maipo*. Universidad de Chile.
- CATANIA, C., and AVAGNINA, S., 2007. La maduración de la uva. *Curso Superior de Degustación de Vinos*, pp. 1–14.
- CHAVES, M. M., HARLEY, P. C., TENHUNEN, J. D., and LANGE, O. L., 1987. Gas exchange studies in two Portuguese grapevine cultivars. *Physiologia Plantarum*, **70**(4), pp. 639–647. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1987.tb04318.x
- COOMBE, B. G., and MCCARTHY, M. G., 2000. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, pp. 131–135.
- CORTELL, J. M., HALBLEIB, M., GALLAGHER, A. V., RIGHETTI, T. L., and KENNEDY, J. A., 2005. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. Cv. Pinot noir) and wine proanthocyanidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **53**(14), 5798–5808. DOI: 10.1021/jf0504770
- CUNHA, M., MARÇAL, A. R. S., and SILVA, L., 2010. Very early prediction of wine yield based on satellite data from vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, **31**(12), pp. 3125–3142. DOI: 10.1080/01431160903154382
- DEL VALLE, G.; GONZALEZ, A.; and BAEZ, R., 2005. Antocianinas en uva (*Vitis vinifera* L.) y su relación con el color. *Revista Fitotecnia Mexicana*, **28**(4), pp. 359–368.
- DEVAUX, N., CRESTEY, T., LEROUX, C., and TISSEYRE, B., 2019. Potential of Sentinel-2 satellite images to monitor vine fields grown at a territorial scale. *Oeno One*, **53**(1), pp. 51–58. DOI: 10.20870/oeno-one.2019.53.1.2293
- FORINO, M., PICARIELLO, L., RINALDI, A., MOIO, L., and GAMBUTI, A., 2020. How must pH affects the level of red wine phenols. *Lwt*, **129**(January), 109546. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109546
- GAO, B.-C., 1996. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Elsevier*, **23**(3), pp. 257–266. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109546
- GIRALDO, C., 2017. Escenarios de la Vitivinicultura Chilena generados por los cambios en la aptitud Productiva, como consecuencia del cambio climático para mediados del siglo XX1. In *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza (Issue Proyecto de tesis)*. Universidad de Chile.

- GUTIÉRREZ-GAMBOA, G., and MORENO-SIMUNOVIC, Y., 2018. Location effects on ripening and grape phenolic composition of eight 'carignan' vineyards from maule valley (Chile). *Chilean Journal of Agricultural Research*, **78**(1), pp. 139–149. DOI: 10.4067/S0718-58392018000100139
- HALL, A., LOUIS, J., and LAMB, D., 2003. Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial- resolution aerial multispectral images. *Computers and Geosciences*, **29**(7), pp. 813–822. DOI: 10.1016/S0098-3004(03)00082-7
- HALLIK, L., KAZANTSEV, T., KUUSK, A., GALMÉS, J., TOMÁS, M., and NIINEMETS, Ü., 2017. Generality of relationships between leaf pigment contents and spectral vegetation indices in Mallorca (Spain). *Regional Environmental Change*, **17**(7), pp. 2097–2109. DOI: 10.1007/s10113-017-1202-9
- HERNÁNDEZ, C., ESCRIBANO, J., and TARQUIS, A., 2014. Comparación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenido a diferentes escalas en pastos de Dehesa. *Pastos y PAC 2014-2020*, pp. 121–128.
- HERRERA, M. E., and CHUVIECO, E., 2014. Estimación del contenido de agua a partir de mediciones hiperespectrales para cartografía del riesgo de incendio. *Cuadernos de Investigación Geografica*, **40**(2), pp. 295–309. DOI: 10.18172/cig.2518
- JOHNSON, L. F., ROCZEN, D. E., YOUKHANA, S. K., NEMANI, R. R., and BOSCH, D. F., 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, **38**(1), pp. 33–44. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00106-0
- KHALIQ, A., COMBA, L., BIGLIA, A., RICAUDA AIMONINO, D., CHIABERGE, M., and GAY, P., 2019. Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. *Remote Sensing*, **11**(4). DOI: 10.3390/rs11040436
- LIMA, L.J., 2015. Estudio De Caracterización De La Cadena De Producción Y Comercialización De La Agroindustria Vitivinícola: Estructura, Agentes Y Prácticas. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. *Ministerio de Agricultura*, **208**.
- LIU, Y., YANG, P., YUAN, C., WANG, H., HAN, F., LIU, Y., and WANG, L., 2018. Stability of anthocyanins and their degradation products from cabernet sauvignon red wine under gastrointestinal pH and temperature conditions. *Molecules*, **23**(2). DOI: 10.3390/molecules23020354
- LLORENS, J., GIL, E., LLOP, J., and ESCOLÀ, A., 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection*, **29**(3), pp. 239–248. DOI: /10.1016/j.cropro.2009.12.022
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A., AGELET, J., ARNÓ, J., BORDES, X., and RAMOS, M. C., 2010. Protocolo para la Zonificación Intraparcelaria de la Viña para Vendimia Selectiva a partir de Imágenes Multiespectrales. *Revista de Teledetección*, pp. 47–52.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A., AGELET-FERNANDEZ, J., ARNO, J., and RAMOS, M. C., 2012. Análisis de zonas de manejo diferencial en viñedo y relación con el desarrollo de la viña, madurez y calidad de la uva. *Spanish Journal of Agricultural Research*, **10**(2), pp. 326–337. DOI: 10.5424/sjar/2012102-370-11
- MASHALABA, L., GALLEGUILLOS, M., SEGUEL, O., and POBLETE-OLIVARES, J., 2020. Predicting spatial variability of selected soil properties using digital soil mapping in a rainfed vineyard of central Chile. *Geoderma Regional*, **22**, e00289. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00289
- MATESE, A., and DI GENNARO, S. F., 2015. Technology in precision viticulture: A state of the art review. *International Journal of Wine Research*, **7**(1), pp. 69–81. DOI: 10.2147/IJWR.S69405
- MÜLLER, K., 2004. Chile vitivinícola en pocas palabras. *Revista de Enología*, **52**.
- PARDO, J. A., 2016. Seguimiento Fenológico del Cultivo de Uva Isabela (*Vitis* sp) en Fusagasuga Cundinamarca. Universidad de Cundinamarca.
- PASTONCHI, L., DI GENNARO, S. F., TOSCANO, P., and MATESE, A., 2020. Comparison between satellite and ground data with UAV-based information to analyse vineyard spatio-temporal variability. *Oeno One*, **54**(4), pp. 919–934. DOI: 10.20870/OENO-ONE.2020.54.4.4028
- PEÑA, A., 2005. Factores que regulan el color en uvas tintas. Pp. 12–14.
- PEÑA, A., 2009. Cambios composicionales de la baya durante el proceso de maduración y su importancia en la calidad de la uva y el vino. Grupo de Investigación Enológica (GIE). Universidad de Chile.
- PEREZ QUEZADA, J., 2006. Viticultura de Precisión Aplicada Al Viñedo. *Revista Enología N°2*. Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile, pp. 1–3.
- PICARIELLO, L., RINALDI, A., FORINO, M., PETRACCA, F., MOIO, L., and GAMBUTI, A., 2019. Modification of the organic acid profile of grapes due to climate changes alters the stability of red wine phenolics during controlled oxidation. *Vitis - Journal of Grapevine Research*, **58**(127), pp. 127–133. DOI: 10.5073/vitis.2019.58.special-issue.127-133
- PRIORI, S., PELLEGRINI, S., PERRIA, R., PUCCIONI, S., STORCHI, P., VALBOA, G., and COSTANTINI, E. A. C., 2019. Scale effect of terroir under three contrasting vintages in the Chianti Classico area (Tuscany, Italy). *Geoderma*, **334**(July 2018), pp. 99–112. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.048



- REYNOLDS, A. G., and REZAEI, J. H., 2014. Spatial variability in Ontario Cabernet franc vineyards III. Relationships among berry composition variables and soil and vine water status. *Journal of Applied Horticulture*, **16**(3), pp. 167–192. DOI: 10.37855/jah.2014.v16i03.30
- SCHULTZ, H. R., and JONES, G. V., 2010. Climate induced historic and future changes in viticulture. *Journal of Wine Research*, **21**(2), pp. 137–145. DOI: 10.1080/09571264.2010.530098
- SOZZI, M., KAYAD, A., MARINELLO, F., TAYLOR, J. A., and TISSEYRE, B., 2020. Comparing vineyard imagery acquired from sentinel-2 and unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Oeno One*, **54**(2), pp. 189–197. DOI: 10.20870/oeno-one.2020.54.2.2557
- SUN, L., GAO, F., ANDERSON, M. C., KUSTAS, W. P., ALSINA, M. M., SANCHEZ, L., SAMS, B., MCKEE, L., DULANEY, W., WHITE, W. A., ALFIERI, J. G., PRUEGER, J. H., MELTON, F., and POST, K., 2017. Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards. *Remote Sensing*, **9**(4), pp. 1–18. DOI: 10.3390/rs9040317
- TAYLOR, J., TISSEYRE, B., BRAMLEY, R., and REID, A., 2005. A comparison of the spatial variability of vineyard yield in European and Australian production systems. *Precision Agriculture 2005, ECPA 2005, October 2015*, pp. 907–914.
- TROUGHT, M. C. T., DIXON, R., MILLS, T., GREVEN, M., AGNEW, R., MAUK, J. L., and PRAAT, J. P., 2008. The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition. *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin*, **42**(2), pp. 62–72. DOI: 10.20870/oeno-one.2008.42.2.828
- URIBE, H., and CATALAN, A., 2016. Caracterización hidroclimatológica y del uso de suelo del secano de la región de O'higgins. *Boletín Inia N°320*, ISSN0717-4, pp. 49–81.
- URRETAVIZCAYA, I., SANTESTEBAN, L. G., TISSEYRE, B., GUILLAUME, S., MIRANDA, C., and ROYO, J. B., 2013. Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling (Precision Agric, 10.1007/s11119-013-9328-3). *Precision Agriculture*, **15**(1), pp. 130–131. DOI: 10.1007/s11119-013-9328-3
- VAN LEEUWEN, C., FRIANT, P., CHONÉ, X., TREGOAT, O., KOUNDOURAS, S., and DUBOURDIEU, D., 2004. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, **55**(3), pp. 207–217.
- WANG, L., HUNT, E. R., QU, J. J., HAO, X., and DAUGHTRY, C. S. T., 2013. Remote sensing of fuel moisture content from ratios of narrow-band vegetation water and dry-matter indices. *Remote Sensing of Environment*, **129**, pp. 103–110. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.027
- WANG, L., QU, J. J., HAO, X., and HUNT, E. R., 2011. Estimating dry matter content from spectral reflectance for green leaves of different species. *International Journal of Remote Sensing*, **32**(22), pp. 7097–7109. DOI: 10.1080/01431161.2010.494641

## SUSTAINABLE AGRICULTURE MANAGERMENTS TO CONTROL SOIL EROSION

### MANEJO AGRICOLA SOSTENIBLE PARA CONTROLAR LA EROSION DEL SUELO

Artemi Cerdà<sup>a,\*</sup>, Enric Terol<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Soil Erosion and Degradation Research Group, Department of Geography, University of Valencia, 46010 Valencia, Spain. [artemio.cerda@uv.es](mailto:artemio.cerda@uv.es)

<sup>b</sup> Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. [eterol@cgf.upv.es](mailto:eterol@cgf.upv.es)

#### Abstract:

High rates of soil erosion compromise sustainable agriculture. In rainfed agricultural fields, erosion rates several orders of magnitude higher than the erosion rates considered tolerable have been quantified. In Mediterranean rainfed crops such as vineyards, almonds and olive groves, and in the new sloping citrus and persimmon plantations, the rates of soil loss make it necessary to apply measures to reduce them to avoid collapse in agricultural production. Managements such as weeds, catch crops and mulches (straw and pruning remains) are viable options to achieve sustainability. This work applies measurements through plots, simulated rainfall experiments and ISUM (Improved Stock-Unearthing method) to quantify the loss of soil at different temporal and spatial scales in fields of traditional management (herbicide or tillage) and under alternative management (mulches and plant covers). The work carried out at the experimental station for the study of soil erosion in the Sierra de Enguera and those of Montesa and Les Alcusses provide information on erosion plots under natural rain. Experiments carried out with simulated rain in fields of olive, almond, citrus, persimmon, vineyard and fruit trees report the hydrological and erosive response under low frequency and high intensity rains. And finally, the ISUM topographic method report the impact of long-term management, from the plantation. The results indicate that the loss of soil is greater (x10-1000) in soils under traditional management (tillage and herbicide) due to the fact that they remain bare for most of the year. The use of straw mulch immediately reduces soil erosion by two orders of magnitude. Also mulches from chipped pruned branches remains are very efficient but require more years to reduce soil loss. Weeds and catch crops are very efficient in controlling erosion.

**Key words:** soil erosion, ISUM, sustainable agriculture, mapping, runoff, Mediterranean

#### Resumen:

Las altas tasas de erosión del suelo comprometen una agricultura sostenible. En los campos agrícolas de secano se han cuantificado tasas de erosión varios ordenes de magnitud mayores a las tasas de erosión consideradas tolerables. En los cultivos de secano mediterráneo como el viñedo, almendro y olivar, y en las nuevas plantaciones de cítricos y caquis en pendiente, las tasas de pérdida de suelo hacen necesario la aplicación de medidas que las reduzcan para evitar el colapso en la producción agrícola. Manejos como las adventicias, abonos verdes y acolchados (paja y restos de poda) son opciones viables para alcanzar la sostenibilidad. Este trabajo aplica mediciones mediante parcelas, lluvia simulada e ISUM (Improved Stock-Unearthing method) para cuantificar a distintas escalas temporales y espaciales la pérdida de suelo en campos de manejo tradicional (herbicida o laboreo) y bajo manejos alternativos (acolchados y cubiertas vegetales). Los trabajos realizados en la estación experimental para el estudio de la erosión del suelo de la Sierra de Enguera y las de Montesa y Les Alcusses aportan información de parcelas de erosión bajo lluvia natural. Los experimentos realizados con lluvia simulada en campos de olivos, almendros, cítricos, caquis, viñedos y frutales informan de la respuesta hidrológica y erosiva bajo lluvias de baja frecuencia y alta intensidad. Y finalmente, el método topográfico ISUM nos indica el impacto del manejo a largo plazo, desde la plantación. Los resultados indican que la pérdida de suelo es mayor (x10-1000) en los suelos bajo manejos tradicionales (laboreo y herbicida) debido a que quedan desnudos gran parte del año. El uso de acolchados de paja reduce la erosión del suelo inmediatamente en dos ordenes de magnitud. También los acolchados de restos de poda son muy eficientes, pero requieren más años para conseguir reducir la pérdida de suelo. Las adventicias y los abonos verdes son muy eficientes en el control de la erosión.

**Palabras clave:** erosión del suelo, ISUM, agricultura sostenible, cartografía, escorrentía, Mediterráneo

### 1. Introduction

Soil erosion is not sustainable in agriculture landscapes and induces severe land degradation processes (Panagos and Katsoyiannis 2019). Along the 20th

century, soil erosion was a key worldwide environmental problem that reduces the agriculture production, farmer's income and damage the soil sphere (Brown 1981; Oliver and Gregory 2015; Keesstra *et al.* 2016). Forest lands use to show low erosion rates. However, agriculture lands

\* Corresponding Author: Artemi Cerdà, [artemio.cerda@uv.es](mailto:artemio.cerda@uv.es)

contribute with the highest soil losses measured in the Planet. This is due to the intense ploughing (Turtola *et al.* 2007), abuse of herbicides (Cerdà *et al.* 2021), expansion of agriculture in rugged terrains (Shi *et al.* 2012), and the design of soil managements that threaten the soil (Rodrigo-Comino *et al.* 2018), such as soil compaction (Parker 1995) and soil degradation (Hill *et al.* 1995), which resulted in high erosion rates (see Figure 1 as an example).



**Figure 1:** Soil erosion rates in Carcaixent (Spain) due to the plantation of new citrus crops. During the plantation works the soil is bare and soil erosion rates reach high rates. November 2019.

In the past, the strategies to control soil erosion were based on terracing and afforestation (Smith 1914). However, the restoration strategies based on plant cover and mulching were not widespread. The use of experimental research was initiated in the 1930s in the USA and resulted in a better understanding of the soil erosion and land degradation processes (Lutz 1935) and the initiation of the soil erosion control investigations (Ayres 1937) based on the understanding of soil erosion process and related mechanisms such as splash and raindrop impact (Ellison 1945). In the first half of the 20th century, soil erosion research was spread to different parts of the world with the origin in United States of America (Stamp 1938) and, then, plants were found to be a suitable option to control the soil losses in degraded lands (Fig. 2).



**Figure 2:** Runoff generation and soil erosion rates in Montesa (Spain) after one year of the plantation of citrus. Bare soils due to the abuse of herbicides results in high runoff and soil losses. October 2018.

High soil erosion rates were found under different crops. In cereals, soil erosion rates are very high due to the bare surfaces (De Santisteban *et al.* 2006; López-Vicente *et al.* 2020). Other crops also shown soil erosion rates due to the bare soils. For instance, olive groves are characterised by the higher soil losses such as was found by Nekhay *et al.* (2009) and Sastre *et al.* (2017). Vineyards shown high erosion rates too, mainly due to the intense ploughing and the lack of vegetation cover and the loss of the canopy during the winter (Rodrigo-Comino 2018). Orange production also contribute to high erosion rates characterised such as was found in China (Liu *et al.* 2012) and the Mediterranean belt (Cerdà *et al.* 2017). In the last three decades, a growth of the soil erosion measurements found that some other crops contribute to high erosion rates (Keesstra *et al.* 2018; Borrelli *et al.* 2020).

The mechanization of the agriculture production results in higher erosion rates in citrus, vineyards and olive plantations due to the soil degradation, increase in soil bulk density, the removal of the terraces and the loss of. Orchards and groves use to contribute with high erosion rates such as the research on apricots (Keesstra *et al.* 2016), almonds and persimmons (Rodrigo-Comino *et al.* 2018), or avocado (Fig. 3).



**Figure 3:** Soil erosion in almond plantations in Font de la Figuera results in gully and rill formation. June 2018.

The scientific research devoted to soil erosion found that the highest soil erosion rates were found during the plantation due to the soil compaction as a consequence of trampling and mechanization (Rodrigo-Comino *et al.* 2017) and the reduction in soil hydraulic conductivity and the reduction of the soil infiltration rates. This resulted in an increase in runoff generation and soil losses for some years due to the lack of vegetation cover (Rodrigo-Comino *et al.* 2018). The impact of the plantation works and the development of new plantation was found also as the key factor by Rodrigo-Comino *et al.* (2017) due to the impact of the transport of equipment that results in compacted soils, the bare surfaces and the lack of crop cover due to the low biomass of the recently planted



vineyards and the increase in runoff connectivity. The overview given here about the conditions of the agriculture land from the soil erosion point of view shows an environmental problem: an acceleration of the soil losses and then, the risk of the sustainability of the agriculture production.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Topographical measurements

The topographical measurements were done applying the Improved Stock Unearthing method (ISUM) (Rodrigo-Comino *et al.* 2018). This method is an update and improvement of the one developed by previous researchers in in vineyards (Brenot *et al.* 2008) and applied here to different crops with crafted trees: almond, citrus, persimmon, peaches and apricots such as Figure 4 shows.

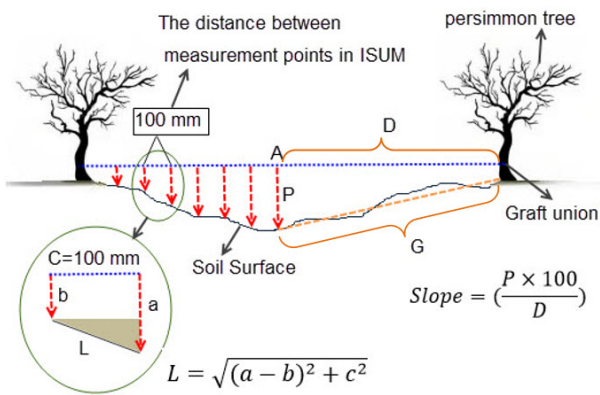


Figure 4: ISUM measurements and calculations.

The use of topographical measurements with ISUM is based in a survey of the topography of the plot done in the year of the measurement (2017-2021 upon the study sites) and the original topography during the plantation of the field. The original topography is calculated by means of the craft of the trees. For the ISUM (Improved Stock Unearthing Method) measurements at each study site were done at inter-row lines (Fig. 5).



Figure 5: ISUM measurements in persimmon fields in Canals.

At each farm a plot of 5 x 40 meters was sampled. This is a total of 500 measurements of ISUM in each plot. A 1 mm thick nylon rope (600 mm length) was roped from tree to tree (see Figs. 2 and 3) at the graft' height. The height

of the rope to the soil surface was measured each 10 cm intervals along the rope. This way, 50 measurement points were collected in each sampling from tree (1 measurement) to tree (1 measurement) and between trees (48 measurements). A total of 2000 measurements (40 pair of trees x 50 measurement points between trees) were measured. Following the methodology of Rodrigo-Comino and Cerdà (2018) and their use in other publications in Persimmon, Saturn Peaches (Cerdà *et al.* 2020) and orange plantations (Rodrigo-Comino *et al.* 2017) the selected inter-line space was surveyed to determine the soil bulk density that will allow to transform the topographical changes in soil erosion and soil redistribution maps.

After personal communication with the farmers of the region, and confirmed by the farmer that planted the trees, the original height of the graft union was assumed uniform for all trees and specified at 7 cm. Upon the measurements, a topographical map was created in ArcGIS 10.3 through interpolation of measured points in each plot. To calculate the soil erosion rates at the studied plot, the Surface Volume tool of ArcGIS 10.3 was used to determine the changes in the topography. This geoprocessing tool represents the volume of a surface above (original topography when the trees were planted 12 years ago) or below (topography during the sampling period) a given reference such previously applied (Cerdà *et al.* 2021). In this study, we applied the Eq. (1) calculate soil erosion and sediment accumulation rates  $EV$  in  $Mg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ .

$$EV = \frac{V * BD_s}{A * T} \quad (1)$$

where  $V$  is the soil mobilized (volume) calculated from the topography in 2008 and 2020,  $BD_s$  is the soil bulk density measured with the core method,  $A$  is the total area of the site and  $T$  is the time since plantation (12 years) (Fig. 6). The core method consist in sampling the soil with a ring of 60 mm in diameter and 60 mm in depth.



Figure 6: ISUM measurements in persimmon fields in L'Alcúdia de Crespins.

Descriptive statistics (median, standard deviation, mean, maximum, minimum) were applied to correlate between the derived bulk density and ISUM maps. We calculated them and the coefficient of variation. Spatial correlation analysis was conducted in ArcGIS 10.3 using the Band Collection Statistics. This tool estimates the correlation coefficient  $Corr_{ij}$  that explains the relationship between the two raster maps  $i$  and  $j$  using, Eq. (2).

$$\text{Corr}_{ij} = \frac{\text{Cov}_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (2)$$

where standard deviations of raster maps are defined by  $\delta_i$  and  $\delta_j$  and  $\text{Cov}_{ij}$  is the covariance matrix between raster maps ( $i$  and  $j$ ) defined in Eq. (3).

$$\text{Cov}_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{(Z_{ik} - \mu_i) - (Z_{jk} - \mu_j)}{N-1} \quad (3)$$

where  $N$  is the total number of cells in each raster map,  $Z_k$  is defined as a particular cell value of raster map  $i$  or  $j$ , and  $\mu$  is the mean value of each raster map. Correlation values changes between +1 to -1, so that positive values denote a direct relationship between the two raster maps, negative values denote inverse correlation, and independence between them is denoted by zero.

To compare the means of measured soil variables including ISUM, Bulk density, Plant cover, and Organic matter in the four plots, the analysis of variance (ANOVA) was used in SPSS 17 software. Since the equal means assumption of the groups were not significant ( $P < 0.05$  was considered significant), so we used Games–Howell multiple comparison test to evaluate the significances of individual differences. Actually, Games-Howell test as a Post-Hoc test can help to detect which groups are different and what is direction of these different (Cerdà *et al.* 2021).

## 2.2. Rainfall simulation experiments

Plant, litter, rock fragment, and bare soil covers were measured before the rainfall simulation experiments and were determined by measuring 100 points regularly distributed at each 0.25 m<sup>2</sup> plot, and then, considered as a percentage value. Soil sampling took place at each of the 80 research plots (10 in Control and 10 in *Vicia sativa* plot in February 2016, and August 2016, 2017 and 2018). The samples were taken a 0–6 cm depth with a ring of 6 cm of diameter and 6 cm depth. Grain size, soil moisture and organic matter and bulk density were determined from the samples collected in February 2016. Soil moisture and organic matter and bulk density were measured again at each rainfall simulation plot August in 2016, 2017 and 2018. The pipette method was used to determine the grain size. Bulk density was measured using the ring method. Soil organic matter was measured using the Walkley-Black method... Soil moisture was determined by the desiccation and measured in all the 80 samples. Twenty samples were collected at each sampling period (January 2016 and August 2016, 2017 and 2018), 10 for *Vicia sativa* management and 10 for Tillage (Fig. 7).

The experimental setup for the rainfall simulation experiments was identical than for the soil sampling. Ten plots per management (10 Tillage and 10 *Vicia sativa*) by four seasons (February 2016 and August 2016, 2017 and 2018) were used to carry out a total of 80 rainfall simulation experiments at 55 mm h<sup>-1</sup> rainfall intensity for one hour on circular paired plots (0.25 m<sup>2</sup>). For the calibration, more information can be found in the comparisons articles performed under laboratory (Iserloh *et al.* 2013) and field conditions (Rodrigo-Comino *et al.* 2017). At each plot, runoff flow was collected at 1-min intervals and water volume was measured. The runoff

coefficient was calculated as the percentage of rainfall water leaving the circular plot as overland flow. Runoff samples were desiccated (105 °C, 24 h) and sediment yield calculated on a weight basis to calculate soil loss per area and time (Mg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). During the rainfall simulation experiments, time to ponding (time required for 40% of the surface to be ponded;  $T_p$ , s), time to runoff initiation ( $T_r$ , s) and time required by runoff to reach the outlet ( $T_{ro}$ , s) were recorded.  $T_r - T_p$  and  $T_{ro} - T_r$  were calculated, and they indicate how the ponding is transformed into runoff and how much time the runoff on the soil surface needs to reach the plot outlet. These parameters are good indicators of the hydrological connectivity within the plot.



Figure 7: ISUM measurements in persimmon fields in Montesa.

The measured factors with a clear influence on soil erosion were depicted in box plots (Fig. 3) including the median (continuous line), averages (dotted lines) and outliers (black circles): vegetation and rock fragment covers, litter, bulk density, soil water content and organic matter. Then, these above-mentioned variables considered as key factors and the rainfall simulation results ( $T_p$ ,  $T_r$ ,  $T_{ro}$ , soil loss, etc.) were presented in form of tables with averages, standard deviation ( $\pm$ ), maximum and minimum values. Furthermore, we compared the results per year and treatment using the t-test method. Since all the results showed a non-normal distribution (normality test Shapiro-Wilk), a Tukey test was performed. We considered that significant differences can be relevant at  $P < 0.001$  levels. Finally, one linear graph (hydrological response per plot and year) and another scatter plot (soil loss vs runoff coefficient) were also depicted (Figs. 8 and 9).

## 2.3. Soil erosion plot measurements

A total of 4 pairs of sediment collectors installed on 2 m<sup>2</sup> (1 m width  $\times$  2 m length) soil erosion plots were used to monitor runoff and soil loss in the tilled vineyard. Each plot boundary was demarcated by galvanized iron sheets (1 mm thick  $\times$  50 mm in height) and a 50 L container was installed at the outlet to collect the runoff and soil losses. The plots were laid in the inter-row areas close to the vine rows to avoid problems with the tractor passes. The collected sediment-laden runoff samples in the containers were transported to the laboratory after each rainfall event, weighed and air-dried to separate and quantify runoff and soil loss. The average values of runoff (l m<sup>-2</sup>) and soil loss (g m<sup>-2</sup>) of the 8 collectors represented the event (Fig. 10).





Figure 8: ISUM measurements in persimmon fields in Montesa.



Figure 9: Example of rainfall simulation plot (0.25 m<sup>2</sup>).



Figure 10: Soil erosion plot (2 m<sup>2</sup>) at the Sierra de Enguera experimental station.

A set of eight plots (4 plus 4 as paired plots) were established in 2002 and the first measurements took place in January 2004. Plots were constructed with aluminium sheets that acted as borders. The sheets were 1 mm thick x 50 mm in height x 1000 (or 2000) mm long to achieve plots of different sizes. Each plot consisted of four subplots that were 1x1; 1x2; 1x4 and 2x8 m (width x

length) (Fig. 1). The tillage plot was tilled 4 times per year (April, May, June and August) to remove vegetation following traditional soil management for almond, fruit, olive and vineyard crops in the region. The tillage (control) plot was bare the entire year with the purpose of simulating fallow land, which was promoted by the European Union Common Agriculture Policies in similar areas where cereal production has low yields.

The abandonment of four plots took place in 2006 while the other four plots were maintained under tillage during the 11 experimental years. In 2004 and 2005 both plots were managed with tillage to determine their hydrological and erosional response before abandonment. Monitoring of the plots lasted until 2014, nine years after abandonment and eleven years after initiation of the experiment. Runoff (L) and sediment yield (kg) were measured after each rainfall event. Measurements of the vegetation and rock fragment cover were performed seasonally (January and July) and soil samples were collected with a 100 cm<sup>3</sup> steel ring. The soil surface roughness was determined in the centre of the plots with the chain method. More than 6 hours without rainfall was use as the threshold to distinguish rainfall events. Runoff was collected from the plots using a collector (gutter) that was 0.15 x 1 m (2 m in the 16 m<sup>2</sup> plots, 2 x 8 m<sup>2</sup>) and 0.15 m depth. The collected runoff was drained into containers of 125 and 250 L that were connected to the collector by a 0.4 m-diameter pipe to store the runoff (deposits). Total storage capacities were 125, 250, 375 and 600 L for the 1, 2, 4, and 16 m<sup>2</sup> plots, respectively. After each rainfall event, the runoff was measured and three samples per deposit were collected to determine the sediment concentration. Soil erosion rates (Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and runoff coefficients (%) were also calculated for each rainfall event. The rainfall was measured with a raingauge and compared with the nearby Las Arenas meteorological station (AEMET) located 5 km from the study site. Soil and vegetation descriptions and sampling were made in December 2003 before the measurements were initiated and maintained during the experimental period.

### 3. Results

#### 3.1. ISUM

We present here two examples of the use of ISUM to determine the soil erosion rates. The first one demonstrate the impact of chemical and organic farming on soil erosion. The comparison of a 25-years old persimmon orchards in La Costera district shown high erosion rates on the chemical farming and very low or negligible in the one under organic farming (Fig. 9). An increase in soil organic matter and a decrease in soil bulk density was also measured. The distribution of the soil lowering inform that the inter-row area is the most affected as a consequence of the passes of machinery and human trampling. The changes in soil bulk density confirms this issue (Fig. 11).

ISUM contributed with information coming from other regions of the Mediterranean. In the alluvial soil of the Ribera del Xúquer, we selected two farms under chemical farming and flood irrigation. The use of ISUM was very helpful to determine the final soil erosion rate and the soil redistribution along the 25 years of study. We confirmed that the soil erosion rates are non-sustainable (Fig. 12) and that the redistribution of the soil was due to the flow



of irrigation, which resulted in higher erosion rates in the upper field area and accumulation in the lower part. Moreover, the area under the tree cover reached lower soil lowering, meanwhile the centre of the row reached the highest soil lowering. This is due to the impact of the tractor passes and the higher compaction of the soil (Fig. 12).

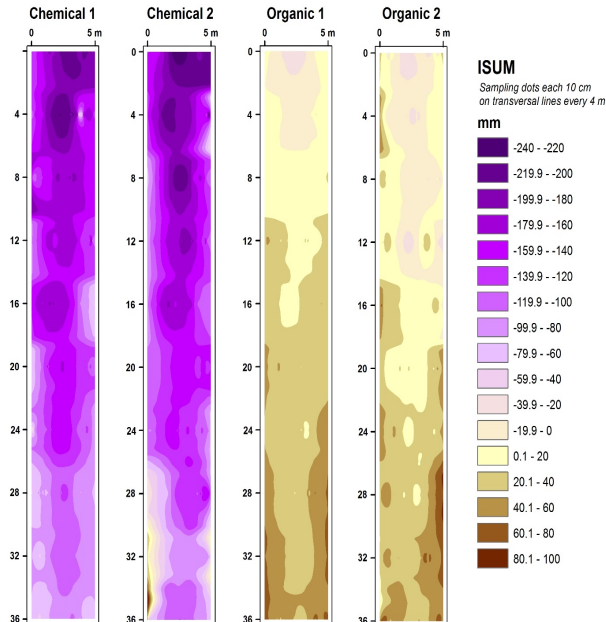


Figure 11: Soil lowering (mm) in persimmon under organic and chemical farming.

The findings with ISUM on organic and chemically managed persimmon plantations demonstrate that the farmer’s management is relevant to achieve the sustainable development in agriculture land. The lack of vegetation is the factor that induces the increase in soil erosion. It is also relevant the soil organic matter reduction due to the tillage or herbicide use. The compaction of the soil as a consequence of the trampling and the pass of machinery is also a key issue that need to be researched to achieve a sustainable agriculture management. In the last century, a continuous increase in the mechanisation of the agriculture sector resulted in heavy machinery that does not contribute to a healthier soil management. However, the reduction of mechanisation will reduce farmer’s income, and this will threaten the sustainability of the production. The reduction of the soil losses and then the use of a regenerative agriculture will be based on the increase of plant cover. The use of ISUM assess the long-term soil erosion rates in agriculture land, and we found that they are not sustainable. The next step in this research will be to measure the soil erosion rates under different management with measurements under simulated rainfall. The challenge is to find the right plant cover (or mulches) that will control the high erosion rates. This challenge should also accomplish the challenge of the sustainability from the point of view of the economy. A proper income for the farmers is definitive to maintain an active agriculture.

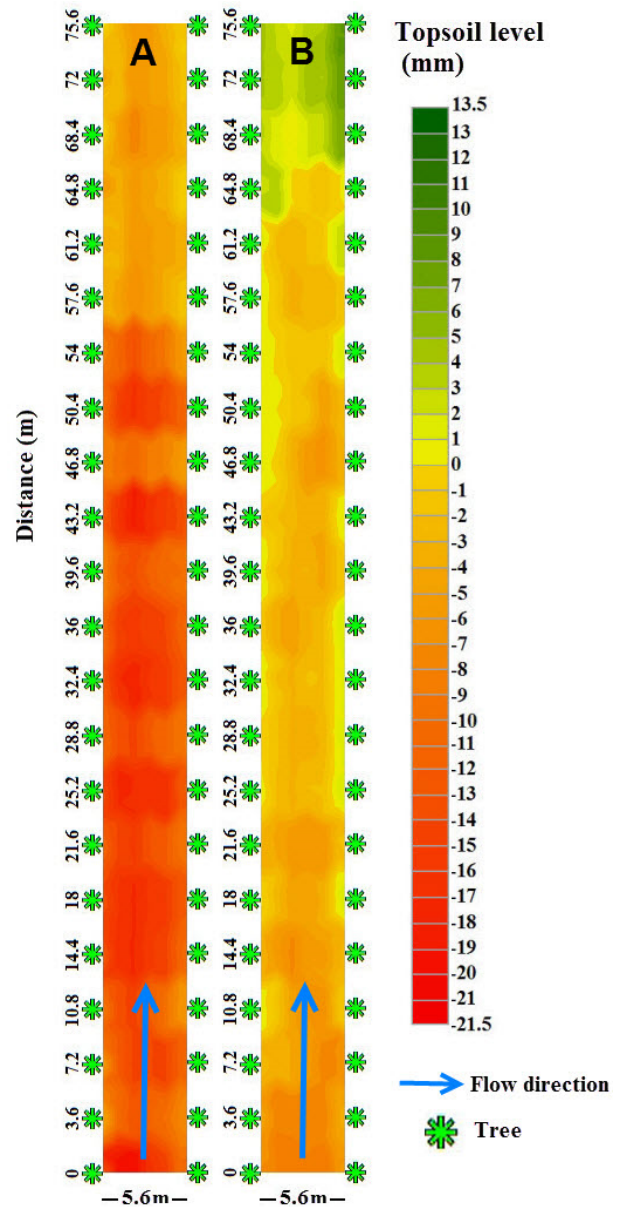
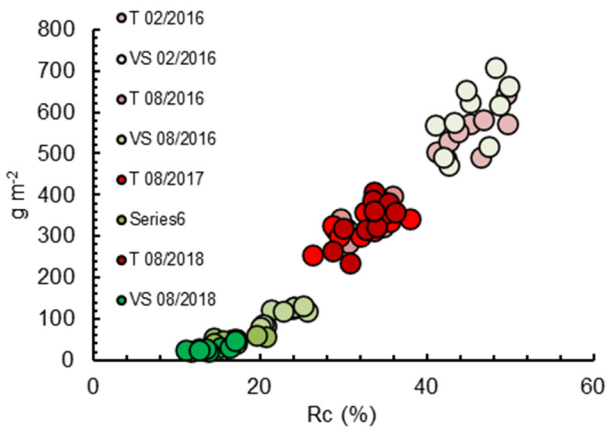


Figure 12: Soil lowering (mm) in Saturn Peaches plantations in L'Alcúdia site (A) and Benimodo site (B).

### 3.2. Rainfall simulation experiments to achieve a sustainable soil erosion rate

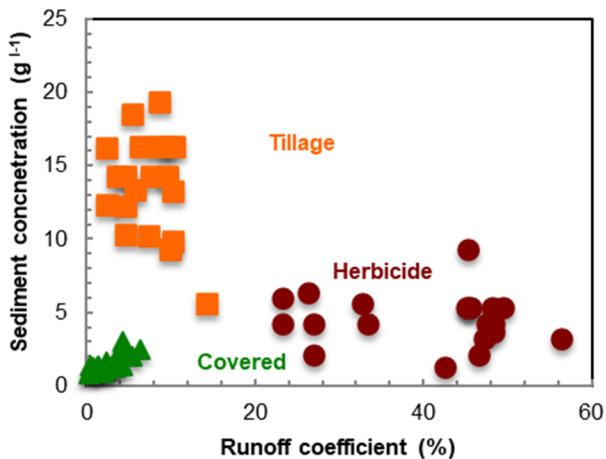
Rainfall simulation experiments were carried out in the vineyards of Els Alforins, valley of Les Alcusses, under rainfall simulation experiments at 55 mm h<sup>-1</sup> during one hour and on a 0,25 m<sup>2</sup> to determine the impact of agriculture management and the time since changes in management. One of the plots was under tillage, which is the Millenia old system to manage the agriculture soil in vineyards. The paired plot was sown with a catch crop (*Vicia sp.*) and the reduction of the soil erosion was recorded already in the first set of experiments in 2016. The measurements carried along 3 years confirm the high erosion rates found under the tillage conditions and the control that exert the use of catch crops. In agriculture land under vineyards we propose the use of catch crops to reduce the soil losses but also to increase the amount of nitrogen and organic matter in the soil. *Vicia sp.* was

found to be a very positive catch crop for vineyards (Fig. 13).



**Figure 13:** Soil erosion rates measured by means of simulated rainfall ( $55 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $0,25 \text{ m}^2$  plot) in vineyards under Tillage and Catch crops cover.

The use of rainfall simulation experiments assesses the impact of different agriculture management under low frequency high magnitude rainfall events, which are the ones that results in high erosion rates. This is very relevant in Mediterranean Ecosystems where high magnitude rainfall events are rare but drive the geomorphological processes and threat the sustainability of agriculture land (Fig. 14).

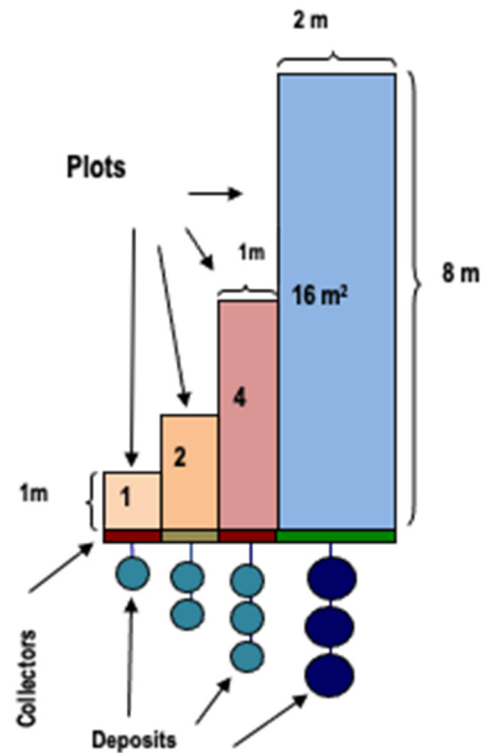


**Figure 14:** Sediment concentration measured by means of simulated rainfall ( $55 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $0,25 \text{ m}^2$  plot) in vineyards under Tillage, herbicide and cover crops cover in Apricot plantations in Aiello de Malferit, Eastern Iberian Peninsula.

Apricot production in Eastern Iberian Peninsula is based in intense tillage or herbicide treatments and this resulted in high erosion rates, Herbicides induce an increase in runoff yield, meanwhile tillage, enhance the increase in sediment concentration (Fig. 12). The use of cover crops under rainfall simulation experiments confirmed that the large sediment and water delivery in apricots farms can be controlled. A cover of weeds reduces the sediment delivery in two orders of magnitude and in 40 % the runoff yields. There is a clear solution to the soil erosion in fruit production and is based on a healthy vegetation cover in the inter-row.

### 3.3. Soil erosion measurement on plots and under natural rainfall

To properly assess soil erosion, it is necessary to use natural rainfall to determine the variability of the sediment and water delivery along the time and space. With this purpose a soil erosion experimental station was built at the Sierra de Enguera (Fig. 13) to measure along 14 years the soil losses. The measurements carried out demonstrate that the high soil erosion rates measured on herbicide treated fields can be reduced with the use of straw mulches. The use a cover of straw reduces the raindrop impact and increase the infiltration, which result in less sediment and water delivered to the fluvial system and other agriculture fields. The use of plots of different sizes contributes to better understand the connectivity of the flows and the delivery of material within the field and from the field to the rivers. A reduction in the soil and water delivery was found with the increase in the size and length of the plots, which shed light into the importance of the length of the fields to reduce the soil erosion rates (Fig. 15). The measurements carried out at the Soil Erosion Experimental Station of Sierra de Enguera demonstrates that a proper management of the agriculture fields are definitive to achieve a sustainable use of the land. A reduction in the soil erosion rates is necessary to achieve the wishes sustainability (Figs. 16 and 17).



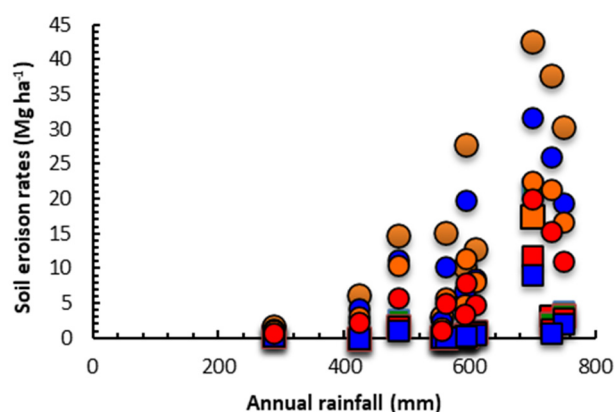
**Figure 15:** Sketch of the soil erosion plots at the Sierra de Enguera Soil Erosion Experimental Station.

Soil losses along 11 years at the Sierra de Enguera Soil Erosion Experimental Station was  $2.19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  for the straw covered plot and  $12.03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  for the herbicide treated plots. The yearly variability was high as the straw covered plots moved from  $15.01 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  the year previously to the straw application and  $0.03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  ten years later. The Bare plot ranged from  $1.26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  till  $29.22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ . There is trend of reduction in soil

erosion rates in the straw covered plot from 2004 and 2014 (Table 1). The herbicide covered plot shown a bare surface along the 11 years of study meanwhile the straw covered plot reduced the soil losses immediately. Our conclusions are that the straw covered plot reduce the soil losses in one order of magnitude and contribute to achieve a sustainable agriculture land management. The straw was added yearly, and a recovery of plants was measured with an increase of herbs by local plants and also the germination of the barley seeds that arrived with the straw bales (Table 1).



**Figure 16:** View of the soil erosion plots at the Sierra de Enguera Soil Erosion Experimental Station.



**Figure 17:** Soil erosion rates per annual rainfall in Bare (circles) and Straw (squares).

#### 4. Conclusions and further research

The experimental research carried out with ISUM, soil erosion plots and rainfall simulators demonstrate that there are high erosion rates in agriculture land but there are solutions. The high erosion rates result in a non-sustainable agriculture and they must be reduced to achieve a stable production of food. The control of the soil erosion rates can be achieved with a cover of mulch (straw) or the use of cover and catch crops. Our experiments demonstrate that straw mulch achieve an immediate control of the soil losses, meanwhile the use of weeds and catch crops will delay the reduction in soil and water losses at least a year. After a decade, our measurements under natural rainfall and plots demonstrate that the soil losses reduction can reach more than one order of magnitude.

**Table 1:** Soil erosion rates from 2004 till 2014 at the Sierra de Enguera Soil Erosion Experimental Station.

Year	Rainfall (mm)	Straw (Mg ha <sup>-1</sup> )	Bare (Mg ha <sup>-1</sup> )
2004	700	15.01	29.22
2005	288	0.37	1.26
2006	485	1.77	10.58
2007	749	3.03	19.39
2008	609	0.83	8.57
2009	729	1.84	25.17
2010	554	0.15	2.07
2011	590	0.37	6.33
2012	594	0.50	16.76
2013	560	0.13	9.06
2014	422	0.03	3.90
Average	571	2.19	12.03

The long-term measurements applied with ISUM indicate that values one or two orders of magnitude higher than the tolerable soil erosion rates are found in the Mediterranean crops, and that they must be reduced. The research carried out with soil erosion plots highlight that there are few but intense rainfall events that are the key to understand the soil erosion rates, both, spatial distribution and temporal changes. Those rainfall events use to trigger the highest soil erosion rates, and in a period of 10 years can results in 70 % of the total soil losses. This is why, the research with simulated rainfall was based on rainfall events with rainfall intensities of 55 mmh<sup>-1</sup>. This low frequency – high magnitude rainfall events are the ones that determine the fate of the agriculture land sustainability. Our investigations demonstrate that under those extreme thunderstorms, the use of mulches, weeds and cover crops is also efficient to reduce the soil losses.

Future research on the issue of soil erosion should also investigate the economic impact of soil erosion, and the benefit to control the soil losses. Moreover, the perception of the farmers, and other stakeholders should be researched as the opinion of the citizens will contribute (or not) to change the way we manage the agriculture land.

#### Acknowledgements

This research was funded by the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° 603498 (RECARÉ project). Artemi Cerdà thanks the Co-operative Research programme from the OECD (Biological Resource Management for Sustainable Agricultural Systems) for its support with the 2016 CRP fellowship (OCDE TAD/CRP JA00088807). We thank Nathalie Elisseou Léglise for her kind management of our financial support. The collaboration of students from the Degree of Geography and Environmental Sciences was fruitful and enjoyable. The music of Hilari Alonso (A prop) was an inspiration during the writing of this paper at the COVID19 time.



## References

- AYRES, Q.C., 1937. Soil erosion and its control. *Soil Science*, **43**(5), pp. 391.
- BORRELLI, P., ROBINSON, D. A., PANAGOS, P., LUGATO, E., YANG, J. E., ALEWELL, C., and BALLABIO, C., 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **117**(36), pp. 21994-22001.
- BRENOT, J., QUIQUEREZ, A., PETIT, C., and GARCIA, J. P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology*, **100**(3-4), pp. 345-355.
- BROWN, L.R., 1981. World population growth, soil erosion, and food security. *Science*, **214**, pp. 995-1002. DOI: 10.1126/science.7302578
- CERDÀ, A., RODRIGO-COMINO, J., GIMÉNEZ-MORERA, A., and KEESSTRA, S. D., 2017. An economic, perception and biophysical approach to the use of oat straw as mulch in Mediterranean rainfed agriculture land. *Ecological Engineering*, **108**, pp. 162-171.
- CERDÀ, A., RODRIGO-COMINO, J., YAKUPOĞLU, T., DINDAROĞLU, T., TEROL, E., MORA-NAVARRO, G., and VAVERKOVÁ, M. D., 2020. Tillage Versus No-Tillage. Soil Properties and Hydrology in an Organic Persimmon Farm in Eastern Iberian Peninsula. *Water*, **12**(6), pp. 1539.
- CERDÀ, A., TEROL, E., and DALIAKOPOULOS, I. N., 2021. Weed cover controls soil and water losses in rainfed olive groves in Sierra de Enguera, eastern Iberian Peninsula. *Journal of Environmental Management*, **290**, pp. 112516.
- DE SANTISTEBAN, L. M., CASALÍ, J., and LÓPEZ, J. J., 2006. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). Earth Surface processes and landforms: *The Journal of the British Geomorphological Research Group*, **31**(4), pp. 487-506.
- ELLISON, W.D., 1945. Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **26**, pp. 415-429. DOI: 10.1029/TR026i003p00415
- HILL, J., MEGIER, J., and MEHL, W., 1995. Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Reviews*, **12**(1-2), pp. 107-130.
- ISERLOH, T., RIES, J. B., ARNÁEZ, J., BOIX-FAYOS, C., BUTZEN, V., CERDÀ, A., and WIRTZ, S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*, **110**, pp. 100-112.
- KEESSTRA, S., PEREIRA, P., NOVARA, A., BREVIK, E. C., AZORIN-MOLINA, C., PARRAS-ALCÁNTARA, L., and CERDÀ, A., 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment*, **551**, pp. 357-366.
- KEESSTRA, S., MOL, G., DE LEEUW, J., OKX, J., DE CLEEN, M., and VISSER, S., 2018. Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, **7**(4), pp. 133.
- LIU, Y., TAO, Y., WAN, K. Y., ZHANG, G. S., LIU, D. B., and XIONG, G. Y., 2012. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Agricultural Water Management*, **110**, pp. 34-40.
- LÓPEZ-VICENTE, M., CALVO-SEAS, E., ÁLVAREZ, S., and CERDÀ, A., 2020. Effectiveness of Cover Crops to Reduce Loss of Soil Organic Matter in a Rainfed Vineyard. *Land*, **9**, pp. 230.
- LUTZ, J.F., 1935. The Relation of Soil Erosion to Certain Inherent Soil Properties. *Soil Science*, **40**, pp. 439-458.
- NEKHAY, O., ARRIAZA, M., and BOERBOOM, L., 2009. Evaluation of soil erosion risk using Analytic Network Process and GIS: A case study from Spanish mountain olive plantations. *Journal of Environmental Management*, **90**, pp. 3091-3104. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.04.022
- OLIVER, M.A., and GREGORY, P.J., 2015. Soil, food security and human health: a review. *European Journal of Soil Science*, **66**, pp. 257-276. DOI: 10.1111/ejss.12216
- PANAGOS, P., and KATSOYIANNIS, A., 2019. Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environmental Research*, **172**, pp. 470-474. DOI: 10.1016/j.envres.2019.02.043
- PARKER, K.C., 1995. Effects of complex geomorphic history on soil and vegetation patterns on arid alluvial fans. *Journal of Arid Environments*, **30**, pp. 19-39. DOI: 10.1016/S0140-1963(95)80036-0
- RODRIGO-COMINO, J., 2018. Five decades of soil erosion research in "terroir". The State-of-the-Art'. *Earth-Science Reviews*, **179**, pp. 436-447. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.02.014.
- RODRIGO-COMINO, J., and CERDÀ, A., 2018. Improving stock unearthing method to measure soil erosion rates in vineyards. *Ecological Indicators*, **85**(Supplement C), pp. 509-517. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.10.042.
- RODRIGO-COMINO, J., BREVIK, E., and CERDÀ, A., 2017. The age of vines as a controlling factor of soil erosion processes in Mediterranean vineyards. *Science of The Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.204.

- RODRIGO-COMINO, J., KEESSTRA, S. D., and CERDÀ, A., 2018. 'Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, **43**(10), pp. 2193–2206. DOI: 10.1002/esp.4385.
- SASTRE, B., BARBERO-SIERRA, C., BIENES, R., MARQUES, M. J., and GARCÍA-DÍAZ, A., 2017. Soil loss in an olive grove in Central Spain under cover crops and tillage treatments, and farmer perceptions. *Journal of Soils and Sediments*, **17**(3), pp. 873-888.
- SHI, Z.H., FANG, N.F., and WU, F.Z., 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, **454–455**, pp. 123–130. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.004
- SMITH, J. R., 1914. Soil erosion and its remedy by terracing and tree planting. *Science*, **39**(1015), pp. 858-862.
- STAMP, L.D., 1938. Land Utilization and Soil Erosion in Nigeria. *Geographical Review*, **28**, pp. 32–45. DOI: 10.2307/210564
- TURTOLA, E., ALAKUKKU, L., and UUSITALO, R., 2007. Surface runoff, subsurface drainflow and soil erosion as affected by tillage in a clayey Finnish soil. *Agricultural and Food Science*, **16**, pp. 332–351. DOI: 10.2137/145960607784125429

## DEFINICIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE DAÑO CAUSADO POR GRANIZO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO DATOS DE SENSORES REMOTOS

### DEFINITION OF HOMOGENOUS DAMAGE ZONES CAUSED BY HAIL IN AGRICULTURAL CROPS USING REMOTE SENSING DATA

Leandro Sosa-Avaro<sup>a,\*</sup>, Ana Justel<sup>b</sup>, Iñigo Molina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. [leandroleonelsosa@gmail.com](mailto:leandroleonelsosa@gmail.com); [inigo.molina@upm.es](mailto:inigo.molina@upm.es)

<sup>b</sup> Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Campus de Cantoblanco, Madrid 28049, España. [ana.justel@uam.es](mailto:ana.justel@uam.es)

#### Abstract:

The frequency and intensity of extreme worldwide weather events have increased in recent decades, causing enormous economic losses. In Argentina, in the 2017-2018 agricultural season, more than 200 million dollars were allocated to protect soy, corn and wheat crops against hail. After a storm, a field survey by an expert is required to estimate the yield losses caused by hail, without prior information on the affected regions or their intensity. The precision in the estimation of the damage depends to a great extent on the identification of Homogeneous Damage Zones (HDZ) within the plot, which is further used to quantify the total damage. Currently, HDZ are delimited using in-situ visual techniques. This research suggests developing an algorithm to define the HDZ applying Machine Learning techniques to vegetation indices derived from Sentinel 1 and 2 data. For this purpose, 5 microwave indices (DPDD, IDPDD, VDDPI, MPDI and DPSVI) and 5 spectral indices (NDVI, EVI, SAVI, AVI and NPCRI) were tested. The most sensitive indices to changes were selected, for both microwave and optical signals, and were in turn integrated into the damage detection model. A K-Means ( $k = 3$ ) machine learning algorithm was used to define the classes. To validate the algorithm, 38 storms that occurred between 2017 and 2020 were analyzed in 91 soybean, wheat and corn plots located in the Argentine Pampean plain. The One-Way ANOVA model ( $p < 0.05$ ) was applied to each plot. The selected indices were DPSVI and NPCRI. HDZ were correctly detected in 66.67%, 78.13% and 72.70% of the analyzed cases, for corn, wheat and soybean crops, respectively. It is concluded that the designed algorithm allows defining efficiently HDZ caused by hail, giving transparency and precision to the work of the expert and reducing time consuming field surveys.

**Key words:** remote sensing, machine learning, algorithm, hail, agriculture

#### Resumen:

La frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos, a nivel mundial, se han incrementado en las últimas décadas, provocando enormes pérdidas económicas. En Argentina, en la campaña agrícola 2017-2018, se destinaron más de 200 millones de dólares para proteger los cultivos soja, maíz y trigo contra granizo. Luego de una tormenta, un perito visita el campo para estimar las mermas de rendimiento causadas por granizo, sin información previa de las regiones afectadas ni su intensidad. La precisión en la estimación del daño depende en gran medida de la identificación de Zonas Homogéneas de Daños (ZHD) dentro de la parcela para ponderar el daño total. Actualmente, las ZHD se delimitan a campo con técnicas visuales. Se propone desarrollar un algoritmo para definir las ZHD aplicando técnicas *Machine Learning* a índices de vegetación calculados con datos *Sentinel 1* y *2*. Se procesaron y compararon 5 índices de microondas (DPDD, IDPDD, VDDPI, MPDI y DPSVI) y 5 espectrales (NDVI, EVI, SAVI, AVI y NPCRI) y se seleccionó el más sensible a los cambios para cada tipo de señal; además, se incorporaron como variable de entrada al modelo las derivadas de ambos índices. Para definir las clases se empleó *K-Means* ( $k = 3$ ). Para validar el algoritmo se analizaron 38 tormentas ocurridas entre los años 2017 y 2020 en 91 parcelas de soja, trigo y maíz ubicadas en la llanura pampeana argentina. Se aplicó a cada parcela el modelo *One-Way ANOVA* ( $p < 0.05$ ). Los índices seleccionados fueron DPSVI y NPCRI. Se detectaron correctamente ZHD en un 66,67%, 78,13% y 72,70% de los casos analizados, para los cultivos de maíz, trigo y soja, respectivamente. Se concluye que el algoritmo permite definir en forma eficiente ZHD causados por granizo dando transparencia y precisión a la labor del perito y disminuyendo el tiempo de sus tareas a campo.

**Palabras clave:** sensores remotos, aprendizaje automático, algoritmo, granizo, agricultura

\* Corresponding Author: Leandro Sosa-Avaro, [leandroleonelsosa@gmail.com](mailto:leandroleonelsosa@gmail.com)



## 1. Introducción

La frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos, a nivel mundial, se han incrementado en las últimas décadas, provocando enormes pérdidas económicas (Halsnæs *et al.* 2018). Los productores agropecuarios atenúan las consecuencias de las catástrofes implementando estrategias de gestión dentro de su establecimiento pero ciertos riesgos, como el granizo, exceden su capacidad financiera de actuación. En estos casos, transfieren el riesgo a empresas especializadas en administrarlos; a través de seguros agropecuarios. Cuando ocurre una tormenta de granizo, en parcelas aseguradas, un perito realiza una estimación del daño a campo. La precisión de la evaluación depende en gran medida de la detección de Zonas Homogéneas de Daños (ZHD) que permiten extrapolar los datos evaluados en las estaciones de muestreo, a la superficie total de la parcela dañada. Actualmente, las superficies de estas zonas se estiman con técnicas visuales y el responsable de la evaluación no posee ningún conocimiento de la región afectada dentro de la parcela, ni de la intensidad del daño, al momento de llegar al sitio. Una alternativa es utilizar sensores remotos para detectar las ZHD.

En la presente investigación se utilizaron sensores activos de microondas, específicamente Radars de Apertura Sintética (SAR) y pasivos, del tipo multiespectral para definir en forma automática las ZHD. La señal de microondas es sensible a los cambios producidos en la arquitectura del dosel y en su configuración geométrica, tanto por el normal crecimiento de las plantas, como por la ocurrencia de una tormenta de granizo. Diversos autores (Huang *et al.* 2016; Kim *et al.* 2012; Kim and van Zyl 2009; Periasamy 2018; Sahadevan *et al.* 2013) proponen que es posible utilizar índices calculados con datos SAR, para estimar parámetros biofísicos del cultivo, suavizando las características no deseadas contenidas en la señal retrodispersada. Por su lado, los sensores ópticos captan la luz solar reflejada por los objetos y pueden identificar características de los cultivos con alta precisión. Mientras que la atmósfera no interfiere la señal microonda, en las imágenes ópticas si es importante corregir la presencia de brillos solares intermedios y detectar nubes y sus sombras. Las ventajas propias de cada sensor permiten inferir que la utilización combinada de ambos tipos de señales es lo más adecuado para detectar cambios en parámetros biofísicos de los cultivos.

A través de una formulación aritmética que integren dos o más rangos de longitudes de ondas en la señal multiespectral o tipos de polarizaciones en la señal de microondas, se generan índices de vegetación para describir variables biofísicas de los cultivos. La principal ventaja de emplear índices de vegetación es su simplicidad y su principal crítica es que se utiliza un número reducido de variables que no suelen reflejar la complejidad de las condiciones reales (Verrelst *et al.* 2015). Para minimizar esta desventaja es preciso seleccionar los índices más sensibles a los cambios que manifieste la variable de interés permitiendo discriminar grupos de plantas que presentan diferente grado de alteración.

A pesar de existir más de 30 años de datos satelitales de observación de la Tierra, hasta donde llega nuestro conocimiento, no existen investigaciones que usen datos SAR para la caracterización del daño que produce el

granizo en cultivos. Con datos multiespectrales se han analizado algunos casos locales y esporádicos (Bentley *et al.* 2002; Capellades *et al.* 2009; Chandler *et al.* 2003) que presentan limitaciones prácticas para su aplicación regional y operativa (De Leeuw *et al.* 2014).

En este marco, desarrollar un algoritmo que permita definir ZHD en cultivos agrícolas afectados por el fenómeno meteorológico granizo siguiendo una metodología estándar y precisa, aplicada a datos satelitales, supone una clara contribución aportando objetividad y transparencia al proceso de evaluación del daño.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Area de estudio

El estudio se realizó en la llanura Pampeana. El clima de esta región es templado al sur y subtropical húmedo al norte. La temperatura media anual es de 17 grados y el régimen de precipitaciones, monzónico. La llanura contiene las provincias argentinas: Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba, La Pampa y San Luis. En la actualidad, es la región más industrializada del país, traccionada principalmente por la producción de soja, maíz y trigo, y sus derivados. Dentro de ella, las regiones de mayor ocurrencia de granizo se ubican en las cercanías de las Sierras de Córdoba, Tandil y la Ventana; y en la región costera (Sierra *et al.* 1993). Históricamente la intensidad del daño es mayor en cultivos de invierno como el trigo debido a que las tormentas intensas ocurren principalmente a final de primavera y comienzos de verano, momento en que el trigo se encuentra con sus granos formados y expuestos (Saluzzi and Nuñez 1975). La superficie sembrada en la campaña agrícola 2019-2020 fue de 16,9, 9,5 y 6,9 millones de hectáreas para los cultivos soja, maíz y trigo (MAGYP 2021). Para la misma campaña, la prima emitida por todo el mercado asegurador en Argentina, para asegurar los cultivos de soja, maíz y trigo contra el riesgo granizo, fue de 230 millones de US\$ (ME 2021).

### 2.2. Datos y preprocesamientos

En el presente estudio se emplearon datos *Sentinel 1* y 2 del programa *Copernicus* (Agencia Espacial Europea y Agencia Europea de Medio Ambiente, UE) y evaluaciones de daño realizadas in situ en 44 parcelas de soja, 32 de trigo y 15 de maíz, en tormentas de granizo ocurridas entre los años 2017 y 2020.

De la misión satelital *Sentinel 1* se utilizaron imágenes *Ground Range Detected* procesadas a partir de productos *Single Look Complex* utilizando *Sentinel-1 Toolbox*. En la mayor parte del territorio argentino existe solapamiento de las escenas observadas por los satélites *Sentinel 1A* y *1B* y sus ángulos de incidencia difieren considerablemente en un mismo punto de observación. Para evitar esto, cuando se solaparon los datos de las plataformas A y B, se seleccionó aquella que primero capturó datos después de la tormenta de granizo. La resolución espacial del producto utilizado es de 10 metros. De la misión *Sentinel 2*, se utilizaron productos con nivel de procesamiento 1C; sus datos representan la reflectancia en la parte superior de la atmósfera. La resolución temporal de *Sentinel 2* es de 5 días o de 2 y 3 días en sectores con solapamiento de las órbitas. La

resolución espacial de las bandas utilizadas es de 10 metros.

Para cada parcela evaluada se emplean los datos satelitales registrados por ambas misiones dentro de los límites de su geometría y de una ventana temporal de 60 días antes y después de la fecha de ocurrencia de la tormenta. Cuando la ventana incluye alguna fecha anterior a la siembra del cultivo o finaliza después de la cosecha, la serie se trunca para evitar incorporar información de otros cultivos. Los datos satelitales fueron consultados y procesados en la plataforma *Google Earth Engine*.

Para evaluar el daño in situ sobre cada cultivo se siguieron las normas establecidas por el United States Department of Agriculture y la Federal Crop Insurance Corporation (USDA and FCIC, 2019a, 2019b, 2016). En cada una de las 91 parcelas estudiadas se realizaron como mínimo diez estaciones de muestreo, alcanzando en total 1174 observaciones (646 en soja, 153 en maíz y 375 en trigo). Para cada estación de muestreo se documentó la latitud, longitud y el porcentaje de daño estimado.

Para eliminar el moteado de la señal de microondas se utilizaron filtros morfológicos, calculando para cada píxel la mediana sobre un kernel circular de 15 píxeles de radio (Mlynarczuk and Porzycka-Strzelczyk 2018). Para filtrar las nubes y sus sombras y corregir otras interferencias de la atmósfera, optamos por un método temporal de ejecución rápida como es el de regresiones lineales móviles, que se aplica de manera independiente a cada serie temporal de los píxeles (El Hajj *et al.* 2008). En las regresiones, se utilizó una ventana temporal móvil de 15 días para garantizar la eliminación de las interferencias, pero sin perjudicar los valores por degradación de los datos a causa de un excesivo suavizado.

### 2.3. Selección de índices de vegetación

Como base para definir las variables que se emplean en la clasificación de píxeles en ZHD se consideran los índices de vegetación más informativos sobre el estado de los cultivos que se pueden calcular con datos procedentes de las misiones satelitales *Sentinel 1* y *2*. Se seleccionó uno por cada tipo de señal y se los denominó  $IS_1$  e  $IS_2$ .

Se consideraron los siguientes índices de microondas:

- Distancia Diagonal de Polarización Dual (DPDD) (Periasamy 2018): representa suelo sin vegetación con valores pequeños y, a medida que aumenta la biomasa, aumenta el valor del índice hasta alcanzar valores máximos en presencia de vegetación muy abundante.
- Distancia Diagonal Inversa de Polarización Dual (IDPDD) (Periasamy 2018): separa mejor que DPDD los píxeles con vegetación de los que tienen suelo descubierto, pero presenta un cierto grado de incertidumbre para diferenciar vegetación y cuerpos de agua.
- Índice de Despolarización Dual Vertical (VDDPI) (Periasamy 2018): Este índice cuantifica la biomasa midiendo la relación entre la potencia polarizada total y la copolarizada.

- Índice Diferenciado de Polarización Microonda (MPDI) (Becker and Choudhury 1988): Este índice es especialmente sensible a la rugosidad de la superficie y la humedad del suelo, características que se alteran luego de una tormenta de granizo.
- *Dual Polarization SAR Vegetation Index* (DPSVI) (Periasamy 2018): este índice es una combinación de VDDPI y IDPDD, que conserva las ventajas de ambos índices, al tiempo que separa la vegetación de los cuerpos de agua.

Entre los índices espectrales se consideraron:

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Gitelson and Merzlyak 1997): caracteriza la cantidad de clorofila que contiene la vegetación. Valores altos de NDVI corresponden a áreas que reflejan más en el espectro del infrarrojo cercano y esto se corresponde con una vegetación más densa y saludable. NDVI se satura en condiciones de alta biomasa y es muy sensible a las variaciones de fondo del dosel (Huete 1988).
- Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Liu and Huete 1995): EVI tiene mejor comportamiento que NDVI en situaciones con alto rendimiento de biomasa y responde mejor a las variaciones estructurales del dosel tales como: el índice de área foliar, el tipo de dosel, la fisonomía de la planta o la arquitectura del dosel (Gao *et al.* 2000). EVI requiere una correcta y minuciosa eliminación previa del ruido externo y del sensor para estimar reflectancias de superficie (Liu and Huete 1995).
- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (Huete 1988): deriva de la ecuación de NDVI y agrega un coeficiente para corregir la influencia del brillo del suelo en áreas donde la cobertura vegetativa es baja. Esta corrección es importante en doseles abiertos donde la señal de fondo ejerce efecto sobre las reflectancia registradas.
- Índice de vegetación avanzado (AVI) (Roy *et al.* 1996): utiliza, al igual que NDVI las reflectancia del rojo e infrarrojo cercano. Sin embargo, al utilizar un grado de potencia de la respuesta infrarroja es más sensible a las pequeñas diferencias de densidad del dosel (Roy *et al.* 1996).
- Índice de Proporción de Pigmentos de Clorofila Normalizado (NPCRI) (Merzlyak *et al.* 1999): Este índice es sensible a la relación de los contenidos de carotenoides y clorofilas presentes en la planta. Es especialmente útil para caracterizar la senescencia de las hojas y la maduración de los frutos. Además, es capaz de diferenciar cultivo senescente y suelo sin vegetación.

Para seleccionar los índices  $IS_1$  e  $IS_2$  se consideraron los datos de la tormenta de granizo del 10 de febrero de 2019, ocurrida en las cercanías de la localidad de Lozada, provincia de Córdoba, Argentina. El análisis se realizó en una parcela de 90 hectáreas de soja (en adelante denominada parcela modelo) en estado fenológico R3 según escala de Fehr (Fehr and Caviness 1977). Al momento de la tormenta, el cultivo cubría totalmente el suelo y presentaba una estructura homogénea en toda su superficie. Luego de la misma se

registraron regiones sin daño, otras con destrucción total del cultivo y otras con valores intermedios de daño.

Se seleccionaron todas las imágenes *Sentinel 1* y *2* que contenían la parcela modelo y fueron capturadas dentro de la ventana de tiempo que abarca desde el 12 de diciembre de 2018 (60 días antes de la tormenta) hasta el 11 de abril de 2019 (60 días después de la tormenta). Se recortó cada imagen utilizando la geometría de la parcela. Con las imágenes recortadas de la misión *Sentinel 1* se constituyó el conjunto de datos S1 y con las imágenes *Sentinel 2* el conjunto S2. Se pre-procesaron los conjuntos de datos según se describe en la sección 2.2. Para cada conjunto de datos se calcularon, por píxel de cada imagen, los 5 índices de vegetación correspondientes a cada señal. Se calcularon los desvíos estándares de los valores del índice por imagen. Luego se seleccionó por índice el valor máximo de desvío estándar antes de la tormenta ( $Max_{ant}$ ) y el máximo después de la tormenta ( $Max_{post}$ ). Se calcularon los cocientes de estos dos valores y se seleccionó el  $Is_1$  y el  $Is_2$  que obtuvo el menor valor. De esta manera, se seleccionó el índice de microondas y el índice espectral que presentó la menor dispersión antes de la tormenta respecto a la dispersión registrada luego de la misma.

#### 2.4. Algoritmo de aprendizaje automático

Se propone un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado para determinar las ZHD dentro de una misma parcela a partir de imágenes satelitales *Sentinel 1* y *2*. Los pasos que sigue el algoritmo son: (1) selección y pre-procesado de datos satelitales para eliminar el moteado y la presencia de nubes y otros fenómenos atmosféricos; (2) cálculo de los índices de vegetación más sensibles a los daños causados por el granizo como base para la construcción de la matriz de datos para la clasificación; (3) preparación de las variables de clasificación y construcción de la matriz de datos; y (4) clasificación no supervisada de píxeles en ZHD.

Se espera que el algoritmo clasifique los píxeles en ZHD. Los píxeles de la matriz de datos siempre pertenecen a una misma parcela y por tanto, representan una misma especie de cultivo y variedad, sembrada en la misma fecha. La clasificación de ZHD tendrá en cuenta la evolución del cultivo en el período previo y posterior a la tormenta. Las clases deberían agrupar plantas que se comportan de manera similar, para las variables biofísicas estimadas por los índices, antes y después de la tormenta.

Se realizó una interpolación lineal de los valores del índice espectral estimando su valor para cada fecha de la captura de las imágenes SAR. Esto permitió contener en la matriz la misma cantidad de datos provenientes de la señal microondas que espectrales, igualando así la representatividad de ambas señales. Además, de esta forma las imágenes multiespectrales tienen equidistancias temporales, permitiendo así calcular las tasas de cambios de los valores de los índices.

Se calcularon las tasas de cambio como las derivadas de los índices diferenciando la serie, restando a la observación de un momento la del instante anterior, en la misma ubicación. La derivada de la primera imagen no es posible calcularla debido a la ausencia de datos previos, por lo tanto se elimina de la matriz de datos luego del cálculo de las derivadas. Así, la matriz de datos para una

parcela tendrá tantas filas como píxeles y un número de variables que dependen del momento de la tormenta. El máximo número de variables serán 36 dadas por 4 variables ( $Is_1$ ,  $Is_2$  y sus respectivas derivadas) con 9 observaciones (4 anteriores a la tormenta y 5 posteriores) cada una de ellas.

Para definir las ZHD se consideró adecuado utilizar K-means (Wong and Hartigan 1979) por ser un método simple, fácil de implementar, rápido y eficiente en términos de costo computacional para grandes conjuntos de datos (Arthur and Vassilvitskii 2006). Para la detección de ZHD se consideró apropiado agrupar en 3 clases los píxeles de las parcelas. Se utilizó la función de distancia Euclídea para medir las cercanías a centroides. En cualquier otra aplicación del algoritmo, este parámetro se puede modificar para integrar otros objetivos en la clasificación. El algoritmo se programó en Python 3, utilizando las librerías pandas, geopandas, ee, eeconvert y datetime.

#### 2.5. Validación del algoritmo con datos in situ

Para validar la calidad de las agrupaciones que proporciona el algoritmo que hemos presentado se utiliza información externa, no empleada para establecer las ZHD en cada parcela. Aunque para ninguna de las parcelas que se han podido analizar se tiene la información real sobre la verdadera ZHD a la que pertenece cada uno de los píxeles, si disponemos de las mediciones del daño realizadas in situ en algunos puntos.

Para cada parcela se identificaron los píxeles con información *in situ*. Estos píxeles son una submuestra de las tres ZHD identificadas con el algoritmo, para la que se conoce el porcentaje de daño real medido. Para validar la calidad de las agrupaciones de los píxeles en ZHD, comparamos las medias de los porcentajes de daño calculadas con los datos de cada una de las tres zonas. Si el algoritmo es capaz de identificar correctamente las ZHD, el porcentaje de daño real medio debe ser diferente entre cada una de las zonas definidas. Se probó la homogeneidad entre ZHD utilizando test *one-way* ANOVA. Las diferencias se consideran estadísticamente significativas si el valor de  $p < 0,05$ .

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Selección de los índices de vegetación

Los cinco índices de microondas fueron sensibles a los cambios provocados por el granizo en los píxeles de la parcela. El índice de microondas seleccionado como atributo de clasificación ( $Is_1$ ) fue DPSVI, que obtuvo el menor cociente ( $Max_{ant}/Max_{post}$ ), igual a 0.1535. El modelo DPSVI se basa en el patrón de diagrama de dispersión construido entre el coeficiente de retrodispersión de las polarizaciones VV y VH y destaca el aporte de la polarización cruzada. Los 3 parámetros contemplados en la ecuación ( $\sigma_{vv(i)}$ ,  $\sigma_{vh(i)}$  y  $\sigma_{vv(max)}$ ) son altamente influyentes en la caracterización de la biomasa (Periasamy 2018). Para un mismo cultivo, cuando la producción de biomasa aumenta, se obtienen mayores valores de retrodispersión en polarización cruzada (Chauhan and Srivastava 2016). Las señales de microondas de la banda C penetran a través de las hojas y experimentan una dispersión múltiple dentro de las



pequeñas ramas del cultivo, siendo eficiente la señal para estimar biomasa en cultivos (Ghasemi *et al.* 2011). La capacidad de penetración en la superficie de la frecuencia de la banda C es de alrededor de 1 m, y se satura a alrededor de 60–70 toneladas/ha (Nizalapur *et al.* 2010). Esto explicaría su buen comportamiento frente a los cambios generados por la precipitación de granizo en la parcela modelo.

Todos los índices espectrales, al igual que los de microondas, fueron sensibles al daño producido por la tormenta de granizo. Al comparar el cociente entre el desvío estándar máximo antes y después para cada índice espectral observamos que NPCRI tuvo un comportamiento notablemente superior al resto ( $Max_{ant}/Max_{post} = 0.1483$ ). Esto se debería a su capacidad para diferenciar suelo sin cobertura, vegetación saludable y senescente. NPCRI es un cociente normalizado de los valores de reflectancia del rojo y el azul. El granizo cuando impacta con el dosel destruye hojas y tallos, provocando su senescencia. Los tejidos vegetales experimentan cambios de color como resultado de cambios en el contenido de pigmentos y sus proporciones relativas. Los cambios en el color de los tejidos de las plantas senescentes están relacionados principalmente con una creciente degradación de la clorofila y el aumento relativo de carotenoides. Exteriormente se visualiza un cambio de color de verde a amarillo primero y luego con la necrosis un viraje a marrón. Los carotenoides y las clorofilas exhiben una absorción fuerte en el rango espectral del azul, valores de reflectancia utilizados para el cálculo del NPCRI (Merzlyak *et al.* 1999). La capacidad del NPCRI para diferenciar estos componentes explicaría su mejor comportamiento.

### 3.2. Validación del algoritmo

Para las parcelas con cultivo de maíz se encontró que en el 66,67% de los casos (10 de 15 analizadas) existe evidencia significativa de que el porcentaje medio de daño no es igual en las tres ZHD encontradas con el algoritmo. Para el cultivo de trigo se halló que en un 78,13% de las parcelas (25 de 32 analizadas) el daño medio por ZHD no fue igual y, finalmente, para soja el porcentaje de parcelas fue de 72,70% (32 de 44 analizadas).

Distinguimos algunas situaciones particulares entre las parcelas que no se ha encontrado evidencia significativa de que los daños sufridos por los cultivos sean diferentes

en las tres ZHD definidas por el algoritmo. Se han identificado 6 parcelas con daños muy similares en toda su extensión. En estas situaciones asumir que hay 3 agrupaciones diferentes fuerza al algoritmo de *k-means* a hacer una separación artificial de los píxeles. En estos casos no hay diferencias entre las medias de los daños, no por una mala clasificación, sino porque debería haber existido una sola clase. Por otro lado, tampoco se ha encontrado evidencia significativa de que los daños sean diferentes entre las ZHD en 8 parcelas con alta heterogeneidad en el estado de la vegetación antes de la tormenta. Son ejemplos las parcelas con excesos hídricos en partes de su superficie. Las diferencias entre los daños provocados por el granizo resultaron menos evidentes que las diferencias existentes en el cultivo antes de la tormenta.

Sin considerar estas 14 parcelas, el resultado global de la validación asciende a 87,01%. Este nivel de ajuste permite utilizar el algoritmo con absoluta confianza. De esta manera, se brinda una herramienta objetiva para detectar zonas de daño con características similares, permitiendo realizar un ajuste del daño más preciso y justo para las partes que intervienen en el contrato de seguro: asegurado, asegurador y re-asegurador.

## 4. Conclusiones

En este estudio se ha propuesto un algoritmo para determinar de manera automática áreas homogéneas de daños causados por tormentas de granizo dentro de la extensión de una parcela usando datos satelitales de las misiones *Sentinel 1* y *2*. La validación global mostró que en el 87,01% de los casos analizados existe evidencia significativa de que el porcentaje medio de daño no es igual en las tres ZHD determinadas con el algoritmo. La metodología de trabajo que hemos propuesto proporciona transparencia a la definición de las ZHD y mejora el alcance de la valoración de los daños ya que los sensores remotos tienen la capacidad de muestrear toda la superficie de la parcela. Así se evita tener que extrapolar las escasas observaciones puntuales que realizan los peritos en el campo. En futuras extensiones del algoritmo sería interesante adaptar la selección de los índices a cada tipo de cultivo y sus estados fenológicos, teniendo en cuenta también los diferentes tipos de suelo de la región donde se cultiva.

## References

- ARTHUR, D., and VASSILVITSKII, S., 2006. k-means++: The Advantages of Careful Seeding. *Chem. Eng.*, **8**, pp. 26–28.
- BECKER, F., and CHOUDHURY, B.J., 1988. Relative sensitivity of normalized difference vegetation Index (NDVI) and microwave polarization difference Index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring. *Remote Sens. Environ.* **24**, pp. 297–311. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90031-4
- BENTLEY, M.L., MOTE, T.L., and THEBPANYA, P., 2002. Using Landsat to Identify Thunderstorm Damage in Agricultural Regions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**(3), pp. 363-376
- CAPELLADES, M.A., REIGBER, S., and KUNZE, M., 2009. Storm damage assessment support service in the U.S. corn belt using RapidEye satellite imagery. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI(7472)*, p. 747208. International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.830393
- CHANDLER, O., APAN, A., PULLINGER, R., and BULLEN, K., 2003. Quantifying Hail Damage for Crop Loss Assessment: Techniques Using Remote Sensing and Geographic Information Systems. In *Proceedings of the 11th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference (ARSPC 2002)*, pp. 412-421. Causal Productions.

- CHAUHAN, S., and SRIVASTAVA, H.S., 2016. Comparative evaluation of the sensitivity of multi-polarized SAR and optical data for various land cover classes. *Int. J. Adv. Remote Sens. GIS Geogr.*, **4**(1), pp. 1-14.
- DE LEEUW, J., VRIELING, A., SHEE, A., ATZBERGER, C., HADGU, K.M., BIRADAR, C.M., KEAH, H., and TURVEY, C., 2014. The potential and uptake of remote sensing in insurance: A review. *Remote Sens.*, **6**, pp. 10888–10912. DOI: 10.3390/rs61110888
- EL HAJJ, M., BÉGUÉ, A., LAFRANCE, B., HAGOLLE, O., DEDIEU, G., and RUMEAU, M., 2008. Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series. *Sensors (Basel)*, **8**. DOI: 10.3390/s8042774
- FEHR, W.R., and CAVINESS, C.E., 1977. *Stages of soybean development*. Pp. 1–12.
- GAO, X., HUETE, A.R., NI, W., and MIURA, T., 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.*, **74**, pp. 609–620. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00150-4
- GHASEMI, N., SAHEBI, M.R., and MOHAMMADZADEH, A., 2011. A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data. *Int. J. Ofgeomatics Geosci.*, **1**, pp. 776–788.
- GITELSON, A.A., and MERZLYAK, M.N., 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, **18**(12), pp. 2691-2697.
- HALSNÆS, K., LARSEN, M.A.D., and KASPERSEN, P.S., 2018. Climate change risks for severe storms in developing countries in the context of poverty and inequality in Cambodia. *Nat. Hazards*, **94**, pp. 261–278. DOI: 10.1007/s11069-018-3387-8
- HUANG, Y., WALKER, J.P., GAO, Y., WU, X., and MONERRIS, A., 2016. Estimation of Vegetation Water Content From the Radar Vegetation Index at L-Band. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **54**, pp. 981–989. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2471803
- HUETE, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, **25**, pp. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
- KIM, Y., JACKSON, T., BINDLISH, R., LEE, H., and HONG, S., 2012. Radar Vegetation Index for Estimating the Vegetation Water Content of Rice and Soybean. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **9**, pp. 564–568. DOI: 10.1109/LGRS.2011.2174772
- KIM, Y., and VAN ZYL, J., 2009. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**(8), pp. 2519-2527.
- LIU, H.Q., and HUETE, A., 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **33**, pp. 457–465.
- MAGYP. 2021. Estimaciones Agrícolas (magyp.gob.ar). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca | Presidencia de la Nación, Argentina. Available: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> [7/18, 2021].
- ME. 2021. Ministerio de Economía, Superintendencia de Seguros de la Nación | Argentina.gob.ar. Available: <https://www.argentina.gob.ar/superintendencia-de-seguros> [7/18, 2021].
- MERZLYAK, M.N., GITELSON, A.A., CHIVKUNOVA, O.B., and RAKITIN, V.Y., 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiol. Plant.*, **106**, pp. 135–141. DOI: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x
- MLYNARCZUK, M., and PORZYCKA-STRZELCZYK, S., 2018. Speckle filtering in SAR images using morphological filters. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, **18**(2.3), pp. 175-182. DOI: 10.5593/sgem2018/2.3/S10.023
- NIZALAPUR, V., JHA, C., and MADUGUNDU, R., 2010. Estimation of above ground biomass in Indian tropical forested area using multi-frequency DLR-ESAR data. *Int. J. Geomatics Geosci.*, **1**, pp. 67–178.
- PERIASAMY, S., 2018. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1. *Remote Sens. Environ.*, **217**, pp. 537–549. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.003
- ROY, P.S., SHARMA, K.P., and JAIN, A., 1996. Stratification of density in dry deciduous forest using satellite remote sensing digital data - An approach based on spectral indices. *Journal of biosciences*, **21**(5), pp. 723-734. DOI: 10.1007/BF02703148
- SAHADEVAN, D.K., SITIRAJU, S., and SHARMA, J., 2013. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton. In *Proceedings of the XXXIII INCA International Congress (Indian Cartographer)*, Jodhpur, India, pp. 19-21)
- SALUZZI, M., and NUÑEZ, J.M., 1975. Comportamiento de granizadas sobre diversas áreas cultivadas del país. *Geoacta* **7**, pp. 77–90.
- SIERRA, E.M., BELTRAN, A.B., and MAIO, S., 1993. Peligrosidad del granizo para los cereales en la region pampeana. *Rev. la Fac. Agron.*

USDA, FCIC, 2019a. Corn loss adjustment standards handbook, 25150.

USDA, FCIC, 2019b. Soybean Loss Adjustment Standards, 25440.

USDA, FCIC, 2016. Small grains adjustment standards, 25430.

VERRELST, J., CAMPS-VALLS, G., MUÑOZ-MARÍ, J., RIVERA, J.P., VEROUSTRAETE, F., CLEVERS, J.G.P.W., and MORENO, J., 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties - A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **108**, pp. 273–290. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.05.005

WONG, M.A., and HARTIGAN, J.A., 1979. Algorithm as 136: A k-means clustering algorithm. *J. R. Stat. Soc. Ser. C Applied Stat.*, **28**, pp. 100–108.



## COMPARACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD ENTRE ZONAS URBANAS DE ECUADOR Y ESPAÑA EMPLEANDO IMÁGENES SENTINEL 2 MSI

### COMPARISON OF SUSTAINABILITY INDICATORS BETWEEN URBAN AREAS OF ECUADOR AND SPAIN USING SENTINEL 2 MSI IMAGERY

Lorena Caiza, Gabriella Zegarra, Estefanía Navarro, Flor Álvarez\*

Grupo de investigación 202 (GEOINCA). Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de León. Avenida de Astorga, s/n., 24400 Ponferrada, España. lcaizm00@estudiantes.unileon.es; azegas00@estudiantes.unileon.es; enavam02@estudiantes.unileon.es; flor.alvarez@unileon.es

#### Abstract:

The spatio-temporal variability of vegetation in urban areas is one of the current concerns about climate variability events such as extreme temperature changes and flooding, coupled with the forecast that 70% of the world's population will live in urban areas by 2050, threatening local ecosystems as well as associated flora and fauna. Given the close relationship of environmental and demographic changes to the emergence of infectious diseases such as COVID-19 and within the Sustainable Development Goals (SDG) framework of sustainable cities and communities, this study analysed through Sentinel-2 MSI satellite imagery and neural network (RN) and Support Vector Machine (SVM) classifiers the relationship between green areas and the built-up or vegetation-free areas of two urban centers, one located in Quito (Ecuador), with a high population density, and another in León (Spain), with a lower population density, this is intended to determine the values of various sustainability indicators by 2020. The results of the analyses showed that the two cities meet who thresholds for green areas per capita (10 m<sup>2</sup>/inhabitant), exceeding 20% of green areas recommended by the Sustainable Local Development Network, increasing these values as population density decreases. The use of satellite images made it possible to make these estimates of green areas with omission errors of less than 15% (at 1:20,000 scale), facilitating the obtaining of base indicators to be taken into account for the design of future urban projects and that allow to objectively compare urban centers of different locations.

**Key words:** vegetation, Sentinel-2 MSI, neural network, support vector machine, sustainability indicators

#### Resumen:

La variabilidad espacio-temporal de la vegetación en las áreas urbanas es una de las preocupaciones actuales ante eventos de variabilidad climática tales como cambios extremos de la temperatura e inundaciones, sumado a que se prevé que el 70% de la población mundial vivirá en áreas urbanas para el año 2050, lo que amenaza los ecosistemas locales así como la flora y fauna asociada. Dada la estrecha relación de los cambios ambientales y demográficos con la aparición de enfermedades infecciosas como el COVID-19 y en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de ciudades y comunidades sostenibles, en este estudio se analizó mediante imágenes satelitales Sentinel-2 MSI y los clasificadores de Redes Neuronales (RN) y Support Vector Machine (SVM) la relación entre las áreas verdes y las superficies construidas o sin vegetación de dos centros urbanos, uno localizado en Quito (Ecuador), con una elevada densidad de población, y otro en León (España), con una menor densidad poblacional, esto con el propósito de determinar los valores de varios indicadores de sostenibilidad para el año 2020. Los resultados de los análisis mostraron que las dos ciudades cumplen con los umbrales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) respecto a áreas verdes por habitante (10 m<sup>2</sup>/habitante), superando el 20% de zonas verdes recomendado por la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, aumentando estos valores según disminuye la densidad de población. El empleo de imágenes de satélite permitió hacer estas estimaciones de áreas verdes con errores de omisión inferiores al 15% a escala 1:20.000, facilitando la obtención de indicadores base que han de tenerse en cuenta para el diseño de futuros proyectos urbanísticos y que permiten comparar de forma objetiva centros urbanos de diferentes localizaciones.

**Palabras clave:** vegetación, Sentinel-2 MSI, redes neuronales, support vector machine, indicadores de sostenibilidad

### 1. Introducción

Los espacios verdes son esenciales en el desarrollo urbano dado los múltiples servicios ecosistémicos que brinda tales como regulación del microclima (Lehman *et al.* 2014, citado en Kopecká *et al.* 2017), calidad del aire, permeabilidad del suelo, belleza paisajística, salud

mental y física de los habitantes, y actúa como barrera para el sonido (Dole 1989, citado en Gupta 2012). Además, una buena distribución de la vegetación en un centro urbano funciona como corredor ecológico de especies de fauna como aves y reptiles, lo que garantiza una relación sostenible de los humanos con la naturaleza

\* Corresponding Author: Flor Álvarez, flor.alvarez@unileon.es

y la continuidad espacial de procesos biológicos, ecológicos o evolutivos (Restrepo and Muñoz 2019).

La variabilidad espacio-temporal de la vegetación en las áreas urbanas es una de las preocupaciones actuales ante eventos de variabilidad climática tales como olas de calor e inundaciones, sumado a que se prevé que el 70% de la población mundial vivirá en áreas urbanas para el año 2050, lo que amenaza los ecosistemas locales así como la flora y fauna asociada (Luck *et al.* 2009). Las ciudades latinoamericanas se enfrentan a altas tasas de urbanización y creación de periferias urbanas mal controladas (Barrera and Enríquez 2017), por lo que los análisis de cubierta de suelo urbano constituyen un elemento decisivo para garantizar ciudades y comunidades sostenibles de acuerdo al ODS número 11 (ONU 2015).

Para determinar tipos de cubierta de suelo mediante imágenes satelitales se debe tener en cuenta la resolución espacial, radiométrica y espectral, principalmente, con la que cuenta cada sensor. Asimismo, el método de clasificación y los parámetros asociados. Kopecká *et al.* (2017) usaron imágenes Sentinel-2A para analizar espacios verdes urbanos e indicaron que la fragmentación y heterogeneidad del paisaje, ocasiona que un área en particular tienda a sobreestimarse, es decir, si la vegetación en un centro urbano está altamente fragmentada los píxeles de esta clase se contaminarán espectralmente por los píxeles adyacentes de la clase dominante, por lo que recomiendan usar resolución espacial de 5-10 m. En cuanto al rendimiento de los clasificadores, Thanh Noy and Kappas (2017) usaron imágenes satelitales Sentinel-2 para comparar la eficiencia de tres métodos no paramétricos para clasificar cobertura de suelo, mediante lo cual encontraron que la exactitud global de los tres clasificadores fue superior a 90% cuando el tamaño de muestra fue suficientemente grande.

Dada la estrecha relación de los cambios ambientales y demográficos con la aparición de enfermedades infecciosas como el COVID19 y en el marco del ODS de ciudades y comunidades sostenibles, el objetivo principal de este trabajo fue determinar la idoneidad de las imágenes de satélite Sentinel 2 MSI para estimar varios indicadores de sostenibilidad, relacionados con la existencia de zonas verdes, en dos centros urbanos, uno de Europa (León) y otro de Latinoamérica (Quito). Además, como objetivo secundario se planteó comparar la exactitud de dos clasificadores no paramétricos en la estimación de las variables que se emplean para el cálculo de estos indicadores, para poder recomendar el uso del algoritmo más adecuado.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

#### 2.1.1. Quito – Ecuador

Quito es una ciudad capital latinoamericana ubicada en la cordillera de los Andes con coordenadas 0°13'07"S 78°30'35"O (WGS84) a una altitud promedio de 2800 msnm. Tiene un área metropolitana de 370 Km<sup>2</sup> y cuenta con dos millones de habitantes, aproximadamente. De acuerdo a Metzger (2001), los perfiles de cobertura de suelo que lo caracterizan son: 1) urbano denso con un

área construida de 78,5% en promedio, dejando poco espacio para la vegetación; 2) fuerte dinámica urbana en zona de vegetación natural con una superficie construida de 31%; 3) muy fuerte crecimiento urbano con un porcentaje de construcción del 50% y vegetación natural inferior al 20%; 4) urbano en vía de densificación con un 38,5% de área construida y vegetación muy limitada; 5) zona natural en vías de urbanización donde las construcciones son de apenas 15% y predomina la vegetación natural con un 53%; y 6) zonas de sembríos en vías de urbanización que es una zona caracterizada por espacios cultivados y un 24% de construcciones. Si bien los perfiles descritos por Metzger (2001) son de hace 20 años, estos dan una idea de la evolución del desarrollo urbano de la ciudad de Quito y la relación con las zonas verdes. El área de estudio correspondiente a la ciudad de Quito se muestra en la Figura 1.

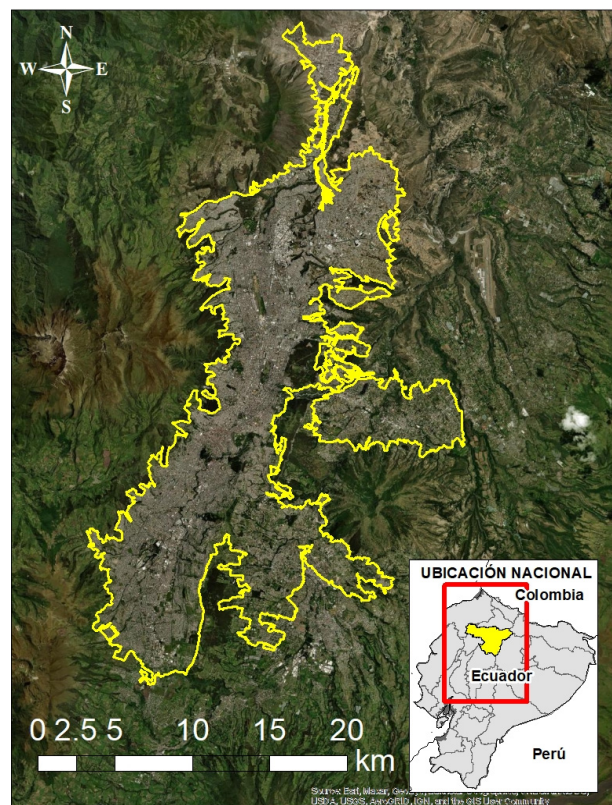


Figura 1: Ubicación del centro urbano de la ciudad de Quito – Ecuador.

#### 2.1.2. León – España

León es una ciudad del norte de España con coordenadas 42°36'20"N 5°34'12"W (ETRS89) localizada a una altitud promedio de 837 msnm. Tiene un área urbana de aproximadamente 39 Km<sup>2</sup> y cuenta con una población de 124000 habitantes según el sitio web del Ayuntamiento de León (2021). De acuerdo con ortofotos y vistas satelitales de la ciudad, León está conformado por una zona urbana densa y baja vegetación en el centro-este, en tanto que en el centro-oeste la urbanización ocupa menor área y se mezcla con suelo descubierto y pastizales, lo que se puede categorizar como área de expansión. En el norte hay menor densidad urbana y mayor vegetación mezclada con pastizales. Finalmente, en el sur predominan las praderas y cultivos con muy poca urbanización.



La Figura 2 muestra el área de estudio del centro urbano de la ciudad de León, a partir del cual se determinaron las clases de cubierta agua, superficie impermeable y vegetación mediante el uso de imágenes de teledetección e índices de vegetación.

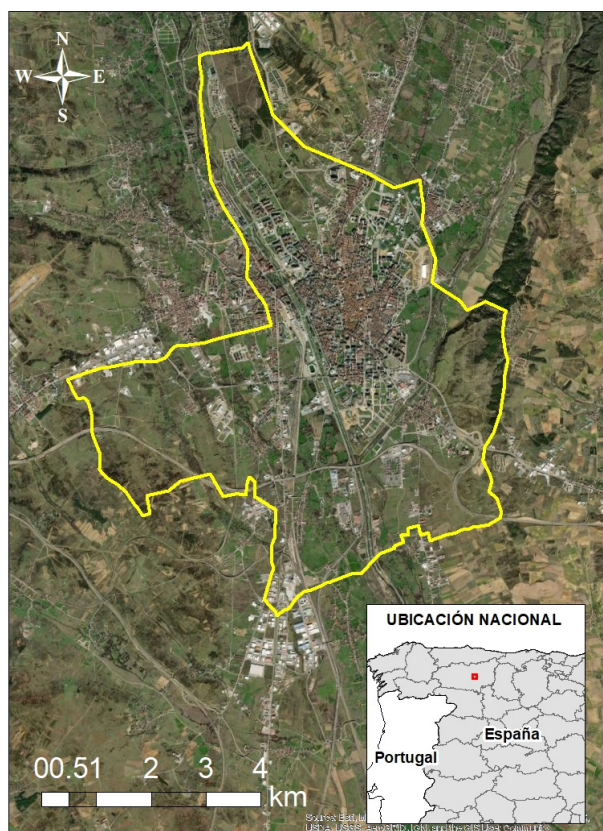


Figura 2: Ubicación del centros urbano de León – España.

## 2.2. Imágenes Sentinel-2

Posterior a un análisis visual sobre ortofotografías de ambas ciudades se determinó que el área mínima nominal cartografiada (AMC) en las zonas de estudio corresponde a 0,5 hectáreas, es decir, se identificaron zonas verdes pequeñas y fragmentadas con aproximadamente esa superficie, principalmente en parques. En este sentido, la escala nominal utilizada para este trabajo es de 1:25.000 donde la resolución espacial mínima del sensor a utilizar debe ser de 10 metros (Tobler 1987). Las bandas a usar del sensor MultiSpectral Instrument (MSI) del satélite Sentinel 2 cumplen con este requisito, por lo que fueron elegidas para estimar los indicadores de sostenibilidad y para comparar la exactitud de los dos clasificadores paramétricos.

Se trabajó con imágenes Sentinel Nivel 2A corregidas atmosféricamente a nivel del suelo (*Bottom of the Atmosphere* BOA, por su sigla en inglés), con cobertura nubosa máxima de 25%, resolución temporal de 5 días y resolución espacial de 10 m para las bandas empleadas (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). Para el área de Quito se seleccionó una imagen con fecha del 24 de agosto de 2020, época de mayor vigorosidad vegetal para Ecuador. Y para el caso del Municipio León se utilizó una imagen del 5 de junio del 2020, que corresponde a la estación de primavera donde la vegetación es más vigorosa, para así tener resultados comparables con los

obtenidos para Quito. Se descargaron los datos de la página web de Sentinel HUB (<https://www.sentinel-hub.com/>) en formato .jp2, de 32 bits. Las características de las imágenes se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de las imágenes de Quito y León.

	Quito	León
Fecha	24/07/2020	05/06/2020
Bandas	B2, B3, B4, B8	B2, B3, B4, B8
Res. Temporal	5 días	5 días
SRC	WGS 84 UTM H 17S	WGS 84 UTM H 29N
TILE	T17MQV, T17NQV	T29TQH

## 2.3. Recursos adicionales

Para este estudio se consideró la zona urbana de Quito y se utilizó la capa vectorial disponible en el geoportal DMQUITO, con sistema de coordenadas WGS 84 UTM Huso 17. En tanto que para el Municipio de León se consideró el límite administrativo disponible en la base de datos del CNIG Sistema de Coordenadas ETRS89 UTM Huso 30, ambos en formato vectorial. Adicionalmente se utilizaron ortofotografías provenientes de los servicios WMS de ambos países. Las fuentes de información están contenidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Fuente de datos.

	Capa vectorial	Ortofoto
Quito	<a href="http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/?pague_id=1114">http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/?pague_id=1114</a>	<a href="http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descarga-de-servicios-wms-del-igm/">http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descarga-de-servicios-wms-del-igm/</a>
León	<a href="https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp">https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp</a>	<a href="http://orto.wms.itacyl.es/Server/SgdWms.dll/WMS">http://orto.wms.itacyl.es/Server/SgdWms.dll/WMS</a>

## 2.4. Metodología

En la Figura 3 se representa el procedimiento para determinar la relación entre áreas de vegetación y superficie impermeable de los centros urbanos de Quito y León. La figura detalla las fuentes de procedencia de los datos junto con la escala, las bandas utilizadas, los clasificadores empleados, y la procedencia de los datos para los procesos de entrenamiento y validación, así como el orden en que se ejecutan.

En este apartado de metodología se explica el preprocesamiento, definición de espacios de entidades y los métodos de clasificación y validación.

### 2.4.1. Definición del espacio de entidades

En primer lugar, se definieron las tres clases principales a identificar de forma semi automática en la imagen:

- Vegetación (V): Parques, plazas con vegetación, zonas arboladas dentro de las zonas de estudio
- Superficies Impermeables (SI): edificaciones, suelo descubierto, rocas.
- Agua(A): Fuentes hídricas, ríos, embalses y lagunas



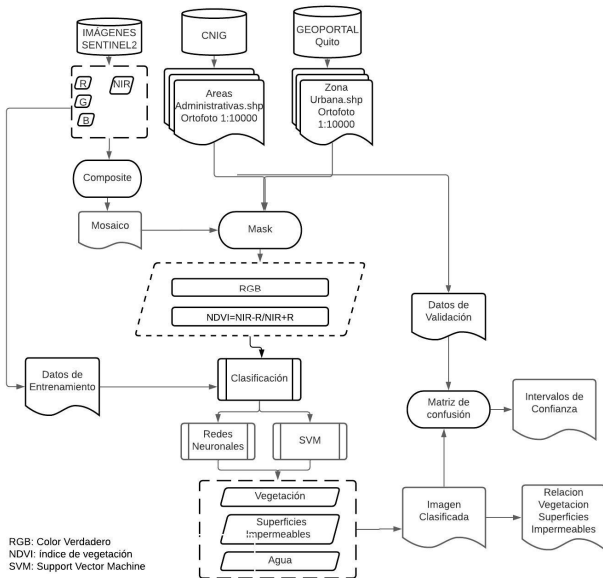


Figura 3: Flujo de trabajo de la clasificación y validación de la cobertura de suelo de Quito y León.

En segundo lugar, y para determinar la combinación de información espectral más adecuada para diferenciar esas clases (i.e. definición del espacio de entidades), A se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual resalta el verdor de la vegetación y es útil para determinar la densidad de la vegetación y evaluar los cambios en la salud de las plantas. El NDVI se calcula como una relación entre los valores de reflectancia de rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) de manera tradicional (USGS 2021) de acuerdo con la Ec. (1).

$$NDVI = \frac{NIR-rojo}{NIR+rojo} \quad (1)$$

A partir de la interpretación visual de las imágenes Sentinel-2 con distintas combinaciones de bandas y las ortofotos se elaboraron las muestras de entrenamiento. Se empleó la combinación en Falso color (B8, B4, B3) y el índice NDVI para identificar la vegetación. En el caso de las zonas de superficies impermeables y agua se utilizó la combinación en color verdadero (B4, B3, B2), utilizando como referencia las ortofotos de Quito y León. La Tabla 3 muestra el número de píxeles de las áreas de entrenamiento usadas para la clasificación de cobertura de suelo de Quito y León.

Tabla 3: Número de píxeles usados para la clasificación de cada cobertura.

Clase	Quito (Polígonos/Pix.)	León (Polígonos/Pix.)
V	37/150	78/174
SI	31/147	15/25
A	7/21	75/322

Para saber qué tan adecuado es el espacio de entidades, se calculó la separabilidad Jeffries-Matusita de las clases A, SI y V utilizando el espacio de entidades B2 (azul), B3 (verde), B4 (rojo), B8 (NIR) y NDVI.

## 2.4.2. Clasificación

### 2.4.2.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Redes Neuronales Artificiales es un método de clasificación supervisado no paramétrico que está diseñado para emular la función de reconocimiento de patrones humanos a través del procesamiento paralelo de múltiples entradas, es decir, las RN tienen la capacidad de identificar datos en busca de patrones y se pueden usar para construir modelos no lineales (Debojit *et al.* 2011).

Los parámetros utilizados fueron los siguientes: Training Threshold Contribution 0.9, Training Rate 0.2, TM-Training Momentum 0.9, RMS Root Means Square 0, Number of Iteration 1000. El número de capas se limitó a 1 (Ndehedehe *et al.* 2013).

### 2.4.2.2. Support Vector Machine (SVM)

Support Vector Machine es un método de clasificación supervisado no paramétrico que a partir del producto escalar de los vectores multidimensionales de las muestras construye un hiperplano o conjunto de hiperplanos y un espacio de dimensionalidad muy alta que separa los grupos. Para la modelización de las SVM se requiere una fase inicial de entrenamiento y aprendizaje. Una vez conformada la modelización el sistema está listo para recibir nuevas entradas y buscar la correspondencia entre el modelo y las entradas para clasificarlas (Gil *et al.* 2019).

La clasificación de la imagen se realizó utilizando los parámetros predeterminados de base radial Kernel utilizado por Chukwukalo and Izuchukwu (2019) en su estudio sobre mapeo de características urbanas usando imágenes de satélite de alta resolución.

## 2.4.3. Validación

### 2.4.3.1. Diseño de muestreo

Se calculó el tamaño de la muestra para los puntos de validación estadística a partir de la Ec. (2) (Martínez *et al.* 2004).

$$N = \frac{Z^2 * P * Q}{E^2} = \frac{2^2 * 0,85 * 0,15}{0,08^2} = 80 \quad (2)$$

Donde:

Z = nivel de confianza

P = exactitud esperada para cada clase

Q = 1-P

E = error admisible en la clasificación

Para una exactitud esperada de 0,85 y error de 0,08, se determinó que el número de puntos/píxeles deber ser de 80 para cada clase. La exactitud esperada de 0,85 para cada clase se basa en valores probables indicados por Congalton and Green (1999). Como error admisible en la clasificación se fijó el 8% en la clasificación, para no aumentar más el tamaño de muestra y por considerarlo asumible.

### 2.4.3.2. Generación de puntos aleatorios

Para obtener una estimación insesgada se realizó un muestreo aleatorio con la herramienta *Create Random points* del software ArcGIS y se caracterizaron como cobertura de vegetación y superficie impermeable, utilizando como base las ortofotos de Quito y de León. La Figura 4 muestra la distribución de los puntos de validación de Quito, y la Figura 5 la distribución de los puntos de León.

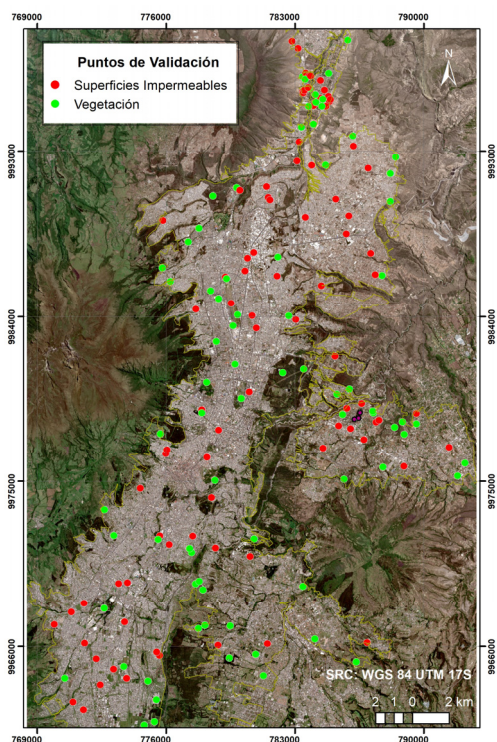


Figura 4: Mapa de distribución de los puntos de validación para la ciudad de Quito.

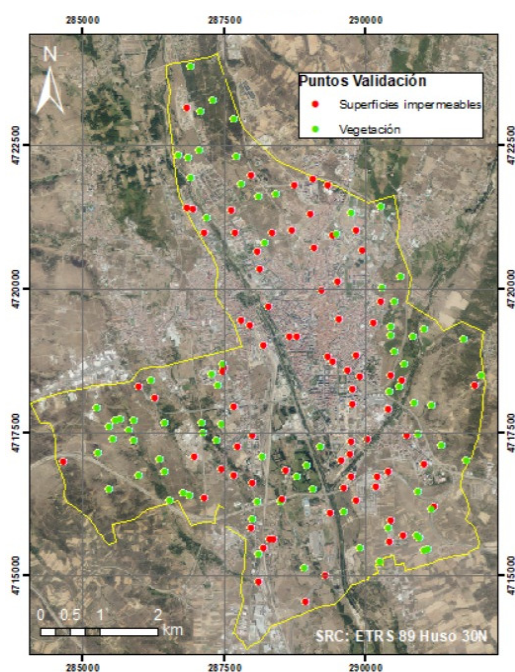


Figura 5: Mapa de distribución de los puntos de validación para la ciudad de León.

### 2.4.3.3. Cálculo de estadísticos de validación

Para el cálculo de estadísticos de validación se generó la matriz de confusión, utilizada para proporcionar una descripción básica de la precisión del mapa temático y para la comparación de precisiones, de la cual se obtiene la fiabilidad global que es el número de casos asignados correctamente versus el número de casos de referencia, y esto se puede dar de dos puntos de vista del usuario y del productor de acuerdo a Foody (2001):

- Exactitud del usuario: son casos acertados a la clase a la que pertenece y se complementa con el error de comisión que es asignar un caso a una clase a la que no pertenece.
- Exactitud del productor son los casos correctamente identificados en la referencia y es lo contrario del error de omisión que se comete cuando se excluye a un pixel de la clase correcta.

A partir de esta matriz se calcularon los intervalos de confianza al 95% utilizando el método de Wald Ajustado (Sauro and Lewis 2005) respaldándose en la calculadora en línea MeasuringU (<https://measuringu.com/ci-calc/>). Para elegir el método que mejor represente la realidad, se consideró la fiabilidad global y el error de omisión de la clase vegetación, ya que esto afectará directamente al cálculo del porcentaje de vegetación de las ciudades.

## 2.5. Cálculo de los indicadores de sostenibilidad

Se calcularon como indicadores de sostenibilidad: (i) la relación de la superficie de cubierta vegetal respecto a a las zonas impermeables, (ii) los m<sup>2</sup> de zonas verdes por habitante y (iii) porcentaje de vegetación respecto a la superficie total.

Para el cálculo de la relación de la superficie de cubierta vegetal respecto a a las zonas impermeables se empleará la Ec. (3):

$$RVS = \frac{SV}{SI} \quad (3)$$

Donde:

*RVS* = relación de vegetación respecto a las superficies impermeables

*SV* = superficie de vegetación en la zona de estudio

*SI* = superficie de zonas impermeables en la zona de estudio

Para el cálculo de zonas verdes en m<sup>2</sup> por habitante se empleó la Ec. (4):

$$SVhab = \frac{SV}{N^{\circ} hab} * \frac{m^2}{hab} \quad (4)$$

Donde:

*SVhab* = superficie de vegetación m<sup>2</sup> por habitante

*SV* = superficie de vegetación en la zona de estudio

*N° hab* = número de habitantes

Finalmente, el porcentaje de vegetación se obtiene aplicando la Ec. (5):

$$\%ZV = \frac{SV}{ST} \quad (5)$$

Donde:

$\%ZV$  = porcentaje de zonas de vegetación en la zona de estudio

$SV$  = superficie de vegetación en la zona de estudio

$ST$  = superficie total de la zona de estudio

### 3. Resultados

#### 3.1. Separabilidad teórica de las cubiertas

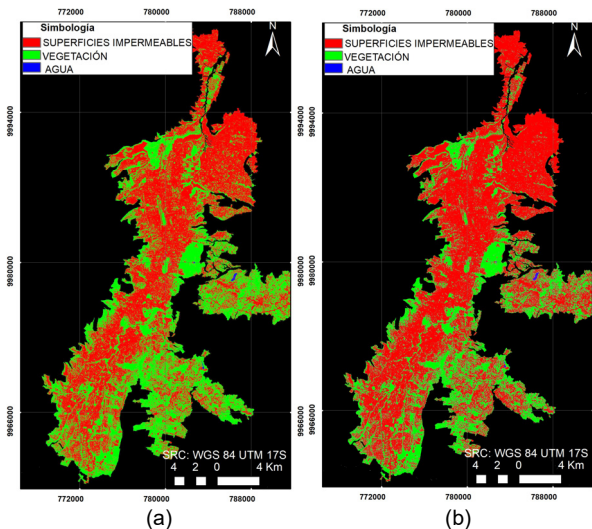
En la Tabla 4 se observa que el valor de separabilidad es aproximadamente 2,0 en todos los casos, lo que indica que el espacio de entidades elegido es adecuado.

**Tabla 4:** Resultado del análisis de separabilidad Jeffries-Matusita.

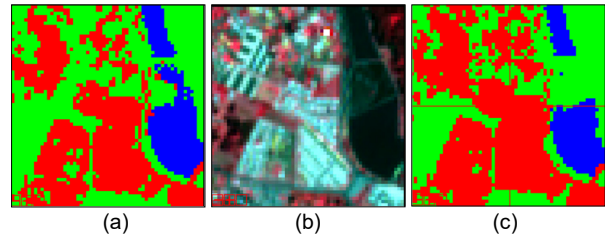
Clase	Quito	León
A-SI	1,99997853	1,99866325
SI-V	1,99999801	2,00000000
A-V	1,99999984	1,99998865

#### 3.2. Clasificación mediante RN y SVM de Quito

La Figura 6 muestra los resultados de la imagen clasificada mediante los métodos RN y SVM. La Figura 7 muestra una vista de detalle donde se observan las tres coberturas clasificadas por ambos métodos y la vista a falso color. La Figura 7a muestra que el método RN obtuvo mejores resultados, en la Figura 7c se observa que el método SVM presentó problemas para clasificar píxeles de la clase agua. En cuanto a las clases superficie impermeable y vegetación, visualmente RN es más eficiente que SVM.



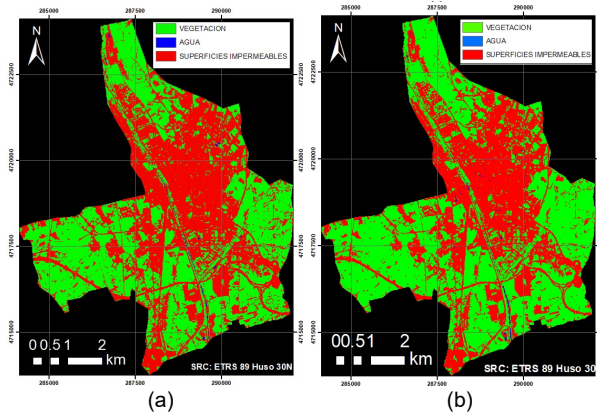
**Figura 6:** Resultados de la clasificación para la ciudad de Quito. Métodos utilizados: a) RN; b) SVM.



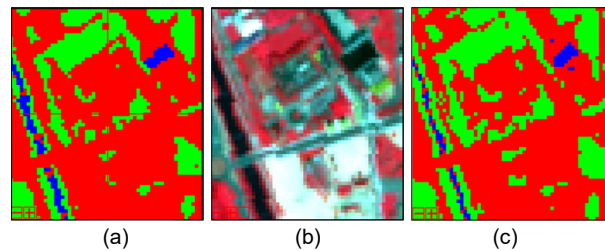
**Figura 7:** Resultados de la clasificación para la ciudad de Quito. Vista de detalle: a) RN; b) Falso color; c) SVM.

#### 3.3. Clasificación mediante RN y SVM de León

La Figura 8 muestra los resultados de la clasificación por RN y SVM. La Figura 9 muestra un enfoque más detallado donde se diferencian las tres clases definidas y la misma vista en falso color. La Figura 9a muestra que el método RN identifica mejor los píxeles de la clase agua que el método SVM (Fig. 9c), dado que es capaz de diferenciar mejor los píxeles de agua cercanos a los de vegetación, lo que no ocurre con SVM, el cual clasifica estos como suelo impermeable. En cuanto a las clases vegetación y suelo impermeable, visualmente RN muestra más eficiencia para determinar los límites entre ambas clases y clasifica mejores píxeles borde.



**Figura 8:** Resultados de la clasificación para la ciudad de León. Métodos utilizados: a) RN; b) SVM.



**Figura 9:** Resultados de la clasificación para la ciudad de León. Vista de detalle: a) RN; b) Falso color; c) SVM.

#### 3.4. Validación de la clasificación de de Quito

La Tabla 5 muestra los resultados de los errores de omisión y comisión de los dos métodos de clasificación considerados. Para la clase vegetación el error de omisión es inferior al 14% con un intervalo de confianza entre 6,2-21,3 empleando RN y el error de comisión inferior al 6% con intervalo de confianza de 0,26-10,70,



Esto indica que más del 85% de los píxeles con vegetación se han identificado correctamente. Con SVM el error de omisión de esta clase está próximo al 43% (31,67-53,33), lo que quiere decir que el 57% de los píxeles clasificados han sido clasificados correctamente. Para la clase SI, el error de comisión es del 5% (0,22-9,78) y el de omisión es del 11,63 (4,85-18,40) en la clasificación de RN, lo que significa que el 88% de los píxeles pertenecientes a esta clase han sido clasificados correctamente. Con SVM el error de omisión es del 0% lo que indica su fortaleza al clasificar esta superficie pero el error de comisión es 29,82 (21,43-38,22), es decir, que el 30% de los píxeles de SI no han sido clasificados correctamente, esto se debe a que en las zonas con suelo desnudo y zonas próximas a vegetación SVM generaliza la superficie o extiende su límite adicionando píxeles a esta clase. (Ver Figuras 8 y 9). La Tabla 5 muestra que la fiabilidad global para la clasificación con RN es de 90% (86,11-95,14), lo que indica que el 90% de píxeles están bien clasificados mientras que para SVM es de 78,75 (71,74-84,41), es decir que el 79% de los píxeles están bien clasificados.

**Tabla 5:** Estadísticos de validación de la clasificación de Quito. Valores más probables e intervalos de confianza al 95% de probabilidad

Clases		Clasificación RN	Clasificación SVM
Exactitud global (%)		90,63 (86,11-95,14)	78,75 (71,74-84,41)
Error de Omisión (%)	V	13,75 (6,20-21,30)	42,50 (31,67-53,33)
	SI	5,00 (0,22-9,78)	0,00 (0,00-0,00)
Error de comisión (%)	V	5,48 (0,26-10,70)	0,00 (0,00-0,00)
	SI	11,63 (4,85-18,40)	29,82 (21,43-38,22)

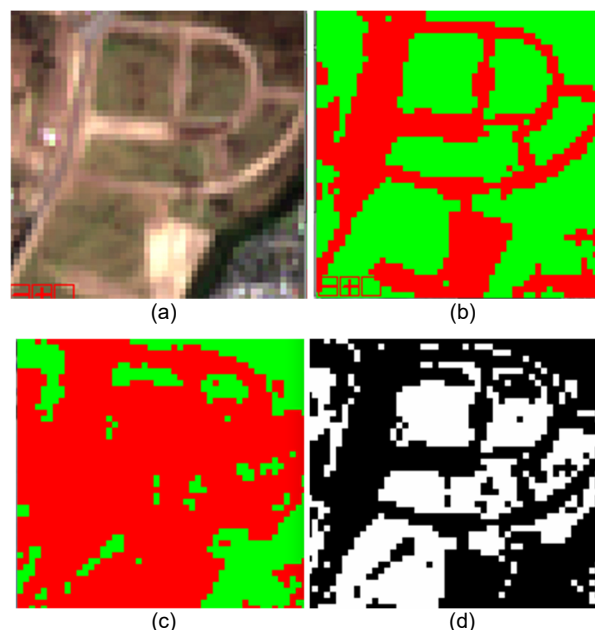
La validación a partir de las imágenes complementaron la información obtenida con los intervalos de confianza, la clasificación con RN (Fig. 10b) es más fiable para la clase vegetación mientras la clasificación por SVM tiene un mayor error de comisión para la clase SI (Fig. 10c). Las zonas de conflicto son zonas con suelo desnudo, como se puede observar en la Figura 10d.

### 3.5. Validación de la clasificación de León

En la Tabla 6 se muestran los resultados de los errores de comisión y omisión de los métodos de clasificación RN y SVM para la ciudad de León. El error de omisión de la clase vegetación es inferior al 13% (6,74-21,69) empleando SVM y el error de comisión inferior al 11% (5,05-19,19). Esto quiere decir que más del 87% de los píxeles con vegetación se han identificado correctamente (Exactitud del productor). Por otro lado, el error de comisión de la vegetación, empleando RN, es inferior al 2% (0,00-8,52) pero el error de omisión es de un 15% (8,64-24,57), mediante lo cual se demuestra que más del 85% de los píxeles de vegetación hayan sido clasificados correctamente.

Para la clase de SI, el error de omisión con el método SVM es inferior al 11% (5,05-19,19) y el error de comisión es inferior al 13% (6,74-21,69). Esto quiere decir que más del 89% de los píxeles de SI fueron clasificados correctamente. Con el método de RN, el error de omisión para superficies impermeables es inferior al 2% (0,00-

7,41) y el error de comisión inferior al 14% (7,56-21,80) lo que indica que con este método más del 98% de píxeles fueron asignados a la clase correcta.



**Figura 10:** Validación visual de los métodos RN y SVM – Quito: a) Falso color; b) Resultado de clasificación con RN; c) Resultado de la clasificación con SVM; d) Diferencia entre RN vs SVM.

**Tabla 6:** Estadísticos de validación de la clasificación de León. Valores más probables e intervalos de confianza al 95% de probabilidad.

Clases		Clasificación RN	Clasificación SVM
Exactitud global (%)		91,87 (86,49-95,30)	88,61 (82,63-92,75)
Error de Omisión (%)	V	15,00 (8,64-24,57)	12,50 (6,74-21,69)
	SI	1,25 (0,00-7,41)	10,26 (5,05-19,19)
Error de comisión (%)	V	1,45 (0,00-8,52)	10,26 (5,05-19,19)
	SI	13,19 (7,56-21,80)	12,50 (6,74-21,69)

Analizando los estadísticos, no se puede llegar a una conclusión definitiva respecto al mejor método de clasificación debido a que los porcentajes de los errores de omisión y comisión de la clase vegetación son similares entre ambos métodos e invertidos para la clase de superficies impermeables. Por consiguiente, se complementa la evaluación con un análisis visual de ambas imágenes clasificadas.

### 3.6. Indicadores de sostenibilidad

Después de realizar los análisis estadísticos y visuales de ambos métodos de clasificación, se concluye que Redes Neuronales refleja de manera más fiable la realidad del terreno en las clases vegetación y superficies impermeables en ambas zonas de estudio, por lo que se calcularon las áreas con los resultados obtenidos por este método (ver Tabla 7).

Mediante un análisis visual se determinó que para Quito y León se excluyen zonas verdes de interés como lo son jardines, huertos urbanos y áreas menores a 0,05 ha. Lo

que afecta el resultado final. Sin embargo, el AMC real fue mayor a la media hectárea nominal inicial, esto debido a que la diferencia espectral entre ambas clases de estudio es grande.

**Tabla 7:** Indicadores de sostenibilidad calculados para Quito y León según la clasificación obtenida.

Indicador	Quito	León
Superficies de zonas impermeables (ha)	21220	1710
Superficie de vegetación (ha)	15530	2180
RVhab (m <sup>2</sup> /habitante)	77,22	174,71
RVS	0,73	1,27
%ZV (%)	42,26	55,47

Los resultados de los indicadores mostraron que tanto Quito como León cumplen con los umbrales establecidos por la OMS respecto a áreas verdes por habitante (10 m<sup>2</sup>/habitante), con valores de 77 m<sup>2</sup>/hab tomando como base los 2 millones de habitantes que tiene el centro urbano de Quito, y 174 m<sup>2</sup>/hab considerando los 124000 habitantes de León. Además, ambas ciudades superan el 20% de zonas verdes recomendado por la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, con un valor de 42,26 para Quito y 55,47 para León.

Un factor por considerar en el presente estudio es la diferencia morfológica de ambas ciudades ya que esta puede afectar a los resultados. En los datos derivados de la teledetección, las clases dominantes tienden a sobreestimarse, por consiguiente, ciudades con áreas verdes más fragmentados pueden subestimarse. (Kopecká *et al.* 2017). En este sentido, el centro urbano de Quito es más fraccionado que el de León pudiendo así tener más áreas verdes que lo estimado. Un análisis más detallado de la conformación de las áreas verdes junto con otras variables como datos demográficos zonales en cada ciudad permitiría a los planificadores urbanos una

mejor toma de decisiones con enfoque eficiente y sostenible.

Este trabajo, junto con otros desarrollados previamente con las imágenes del sensor del Sentinel-2A MSI (Zhou 2019; Kopecká *et al.* 2017), demuestran la capacidad de discriminar vegetación dentro de un contexto urbano complejo (Zhou 2019) y así poder desarrollar diferentes índices de base para futuras investigaciones.

#### 4. Conclusiones

Los análisis realizados indican que las dos ciudades cumplen con los umbrales establecidos por la OMS respecto a áreas verdes por habitante, sin embargo el valor puede decaer para las próximas décadas si se cumple el hecho de que para el año 2050 el 70% de la población vivirá en áreas urbanas. Para mitigar el impacto de la densidad poblacional y mantener los umbrales es necesario que los planes de ordenamiento de ambos centros poblacionales implementen la reforestación y recuperación de zonas verdes.

El empleo de imágenes de satélite permitió hacer las estimaciones de áreas verdes con errores de omisión inferiores al 15% (a escala 1:20.000), facilitando la obtención de indicadores base que han de tenerse en cuenta para el diseño de futuros proyectos urbanísticos y que permiten comparar de forma objetiva centros urbanos de diferentes localizaciones. Respecto a los métodos de clasificación empleados, la validación mostró que el método RN fue más exacto globalmente en la clasificación de las cubiertas de superficie impermeable y vegetación. Además, de acuerdo con los resultados visuales de la clasificación, el método RN fue más eficiente para clasificar las zonas con píxeles borde. El suelo desnudo clasificado como superficie impermeable es un factor de sesgo de los resultados, por lo que en estudios posteriores se debe categorizar suelo desnudo como una de las clases.

#### References

- AYUNTAMIENTO DE LEÓN, 2021. Información General. Available: <http://www.aytoleon.es/es/ayuntamiento/areasmunicipales/turismo/Paginas/imaci%C3%B3ngeneral.aspx> [5/7, 2021].
- BARRERA, F. and ENRÍQUEZ, C., 2017. Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, **81**, pp: 265-273. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.05.067
- CHUKWUKALO, I. and IZUCHUKWU, J., 2019. Mapping of Urban Features of Nnewi Metropolis Using High Resolution Satellite Image and Support Vector Machine Classifier. *Journal of Environment and Earth Science*, **6**(9), pp. 117-130. DOI: 10.7176/JEES/9-6-11
- CONGALTON, R.G. and GREEN, K., 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices. Lewis Publishers, Boca Raton.
- DEBOJIT, B., HITESH, J., ARORA, M., and BALASUBRAMANIAN, R., 2011. Study and Implementation of a Non-Linear Support Vector Machine Classifier. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, **04**(64), pp. 338-341.
- DOLE, J., 1989. Greenscape 5: Green Citys. *Architects Journal*, **10**, pp: 61-69
- FOODY, G., 2001. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, **80**(1), pp.185-201. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4
- GIL, I., DÍAZ, P. and RODRÍGUEZ, J., 2019. Técnicas y usos en la clasificación automática de imágenes. *14° Congreso Isco España*. Barcelona, España, pp. 1-14.
- GUPTA, K., KUMAR, P., PATHAN, S.K. and SHARMA K.P., 2012. Urban Neighborhood Green Index – A measure of green spaces in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, **105**(2012), pp: 325-335. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.01.003

- KOPECKÁ, M., SZATMÁRI, D. and ROSINA, K., 2017. Analysis of Urban Green Spaces Based on Sentinel-2A: Case Studies from Slovakia. *Land*, **6**(25), pp: 1-17. DOI: 10.3390/land6020025
- LEHMAN, I., MATHEY, J., RÖBLER, S., BRÄUER, A. and GOLDBERG, V., 2014. Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services-Application to the analysis of micro-climatic effects. *Ecological Indicators*, **42**, pp: 58-72. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.02.036
- LUCK, G., SMALLBONE, L. and O'BRIEN, R. 2009. Socio-Economics and Vegetation Change in Urban Ecosystems: Patterns in Space and Time. *Ecosystems*, **12**(4), pp: 604-620. DOI: 10.1007/s10021-009-9244-6
- MARTÍNEZ, A., MUÑOZ, J., and PASCUAL, A. (2004). Tamaño de muestra y Precisión estadística. *Ciencia y tecnología*, **23**, pp. 23.
- METZGER, P. 2001. Perfiles ambientales de Quito. Quito, Ecuador: AH.
- NDEHEDEHE, C., EKPA, A., SIRAEON, O. and NSE, O., 2013. Understanding the Neural Network Technique for Classification of Remote Sensing Data Sets. *New York Science Journal*, **6**(8), pp. 26-33.
- ONU, 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [5/7, 2021].
- RESTREPO, Z. and MUÑOZ A., 2019. Conservación de la biodiversidad. Documento de trabajo, 14, pp. 1-56.
- SAURO, J., and LEWIS, J., 2005. Estimating Completion Rates from Small Samples using Binomial Confidence Intervals: Comparisons and Recommendations. *Oracle Denver*, **40**(24), pp. 2100-2103. DOI: 10.1177/154193120504902407
- THANH NOI, P. and KAPPAS, M., 2018. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors*, **18**(1), pp: 1-18. DOI: 10.3390/s18010018
- TOBLER, W., 1987. Measuring Spatial Resolution. *Land Resources Information Systems Conference*, Beijing, China, pp. 12-16.
- USGS, 2021. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) [5/7, 2021].
- ZHOU, X., LI, L., CHEN, L., LIU, Y., CUI, Y., ZHANG, Y., and ZHANG, T., 2019. Discriminating Urban Forest Types from Sentinel-2A Image Data through Linear Spectral Mixture Analysis: A Case Study of Xuzhou, East China. *Forests*, [online] **10**(6), p.478. DOI: 10.3390/f10060478



## MEDITERRANEAN SURFACE GEOSTROPHIC CIRCULATION FROM SATELLITE DATA

### CIRCULACIÓN GEOSTRÓFICA EN SUPERFICIE EN EL MAR MEDITERRÁNEO A PARTIR DE DATOS DE SATELITE

Ferdous Zid\*, Isabel Vigo, David García

Department of Applied Mathematics, University of Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain. [zf5@gcloud.ua.es](mailto:zf5@gcloud.ua.es); [vigo@ua.e](mailto:vigo@ua.e); [d.garcia@ua.es](mailto:d.garcia@ua.es)

#### Abstract:

In this work, we provide an updated geodetic approach to the Mediterranean Surface Geostrophic circulation based on satellite data. We follow same methodology as in a previous approach by Vigo *et al.* (2018), but here both the Sea Surface Height (SSH) and the Geoid (N) have been updated by enhanced solutions, and the time period covered has been extended to 23 years, from 1993 to 2015. The main general pattern of circulation is confirmed with respect to previous approach, but the new estimation provides enhanced resolution of the details, and higher variations in the climatology. When compare both satellite data-based approaches to the Mediterranean Surface Geostrophic Circulation (SGC) with Mercator model simulations that assimilates in-situ measurements, our new estimate shows clearly better agreement than the earlier approach. The mean circulation for the studied period, and the climatology of the SGC for the Mediterranean Sea are presented in the context of previous literature.

**Key words:** Mediterranean sea circulation, ocean geostrophy, mean dynamic topography, satellite gravimetry, satellite altimetry, remote sensing

#### Resumen:

En este trabajo, proporcionamos una actualización de la circulación geostrófica en superficie del Mediterráneo obtenida a partir de datos de gravedad y altimetría desde satélite. Seguimos la misma metodología que en un enfoque anterior de Vigo *et al.* (2018), pero aquí tanto la altura de la superficie del mar (SSH) como el geode (N) se han actualizado usando soluciones mejoradas, y el período de tiempo cubierto se ha ampliado a 23 años, de 1993 a 2015. El patrón general de circulación se confirma con respecto a la aproximación anterior, pero esta nueva estimación proporciona una resolución mejorada en los detalles de pequeña escala, así como mayores variaciones en la climatología. Cuando se comparan ambos enfoques basados los dos en datos satelitales para la Circulación Geostrófica de la Superficie del Mediterráneo (SGC) con las simulaciones del modelo Mercator (que asimila las mediciones in situ), nuestra nueva estimación muestra claramente una mejor concordancia que la aproximación anterior. La circulación media para el período estudiado y la climatología del SGC para el mar Mediterráneo se presentan en el contexto de la literatura previa.

**Palabras clave:** circulación del Mar Mediterráneo, geostrofia oceánica, topografía dinámica media, gravimetría satelital, altimetría satelital, teledetección

### 1. Introduction

In the recent years the determination of the geoid has experience a remarkable improvement in terms of accuracy and spatial resolution thanks to the availability of satellite data, mainly from space missions such as the ESA mission Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE), or the NASA and DLR mission Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and its Follow-On. Also our knowledge of the Sea Surface Height (SSH) has improved, given the availability of new satellite missions. This translates in enhancements on the geodetic estimation of the ocean Absolute Dynamic Topography (ADT), and therefore on the geostrophic currents derived from that.

Thus, in this work we will revisit the first approach given by Vigo *et al.* (2018) to the Surface Geostrophic Circulation (SGC) in the Mediterranean Sea based entirely on satellite data from gravity and altimetry missions by providing an estimate of the SGC following the same methodology but with an improved Mean Dynamic Topography (MDT) and enhanced SSH. We will use the new geodetic Mean Dynamic Topography model DTU19MDT from the Danish National Space Center (Knudsen *et al.* 2020) that is obtained from the OGMOC geoid model (augmented using the EIGEN-6C4 coefficients to d/o 2160), and it has been derived using this geoid model and the DTU18MSS mean sea surface Andersen *et al.* (2018). And the new release of sea level maps provided by the CCI-Sea Level Project from several altimetry satellites (Jason 1&2, Topex/Poseidon, Envisat,

\* Corresponding Author: Ferdous Zid, [zf5@gcloud.ua.es](mailto:zf5@gcloud.ua.es)

ERS1&2, GFO). The time period has also been extended, with respect to the previous approach, spanning from 1993 to 2015.

## 2. Data and Methodology

The Surface Geostrophic Currents can be estimated based on only satellite observations. On one side, satellite gravity data, mainly from GOCE Mission, provide us an accurate approach of the Geoid ( $N$ ) with high spatial resolution. On the other side, the multiple satellite altimetry missions allow us to measure precisely the SSH. Thus, defining the Absolute Dynamic Topography (ADT) as Ec. (1):

$$ADT(x, y, t) = SSH(x, y, t) - N(x, y) \quad (1)$$

where  $N$  is a time averaged geoid,  $x$  and  $y$  stands for the longitude and latitude respectively,  $t$  represents the time and SSH identifies the Sea Surface Height. The vector field of the SGC, with  $u_s$  being the zonal component of the velocity (positive eastward) and  $v_s$  the meridional component (positive northward), follows from the geostrophic equation, that is, the balance between the pressure gradient and the Coriolis forces, Ecs. (2) and (3)

$$u_s(t) = -\frac{g}{f} \frac{\partial ADT}{\partial y} \quad (2)$$

$$v_s(t) = \frac{g}{f} \frac{\partial ADT}{\partial x} \quad (3)$$

where  $g$  is the gravitational acceleration,  $f = 2\omega \sin\phi$  is the Coriolis frequency, which depends on the latitude  $\phi$  ( $\omega$  represents the rate of rotation of the Earth).

In this work, as for the SSH, measured by altimetry missions, we will use the dataset provided by the CCI-Sea Level Project (<http://www.esa-sealevel-cci.org>) as a monthly merged solution from several altimetry satellites (Jason 1&2, Topex/Poseidon, Envisat, ERS1&2, GFO), covering the time span 1993/01/01 to 2015/12/31, and with a spatial resolution of 1/4 by 1/4 degree (Product Version 1.1). All recommended geophysical and atmospheric corrections have been applied to the data. This product consists of Sea Level Anomalies (SLA), with respect to a Mean Sea Surface (MSS), we obtain the SSH by restoring back the MSS. The MSS product is the DTU18MSS: The high-resolution mean sea surface model DTU18MSS provided by the Danish National Space Center (Andersen *et al.* 2018), based on 25 years of multi-mission satellite altimeters from several different satellites, including 3 years of Sentinel-3A and an improved 7 years Cryosat-2 LRM record.

Regarding to  $N$ , in this approach we use the GOCE-OGMOC (Optimal Geoid Modelling based on GOCE and GRACE third-party mission data and merging with altimetric sea surface data to optimally determine Ocean Circulation) augmented using the EIGEN-6C4 coefficients to d/o 2160. This new geoid model will improve resolution of the details since it has been optimized to avoid striations and orange skin like features (Gruber and Frecher 2018). We recover it from the the new geodetic Mean Dynamic Topography model DTU19MDT from the Danish National Space Center Knudsen *et al.* (2020) that is obtained from the OGMOC geoid model and the DTU18MSS MSS.

As a result, we obtained the SGC vector fields as monthly maps of the zonal and meridional components of the

Mediterranean Geostrophic Circulation in the surface with a spatial resolution of 1/4 degree and covering the time period from January 1993 to December 2015.

## 3. Results and Discussion

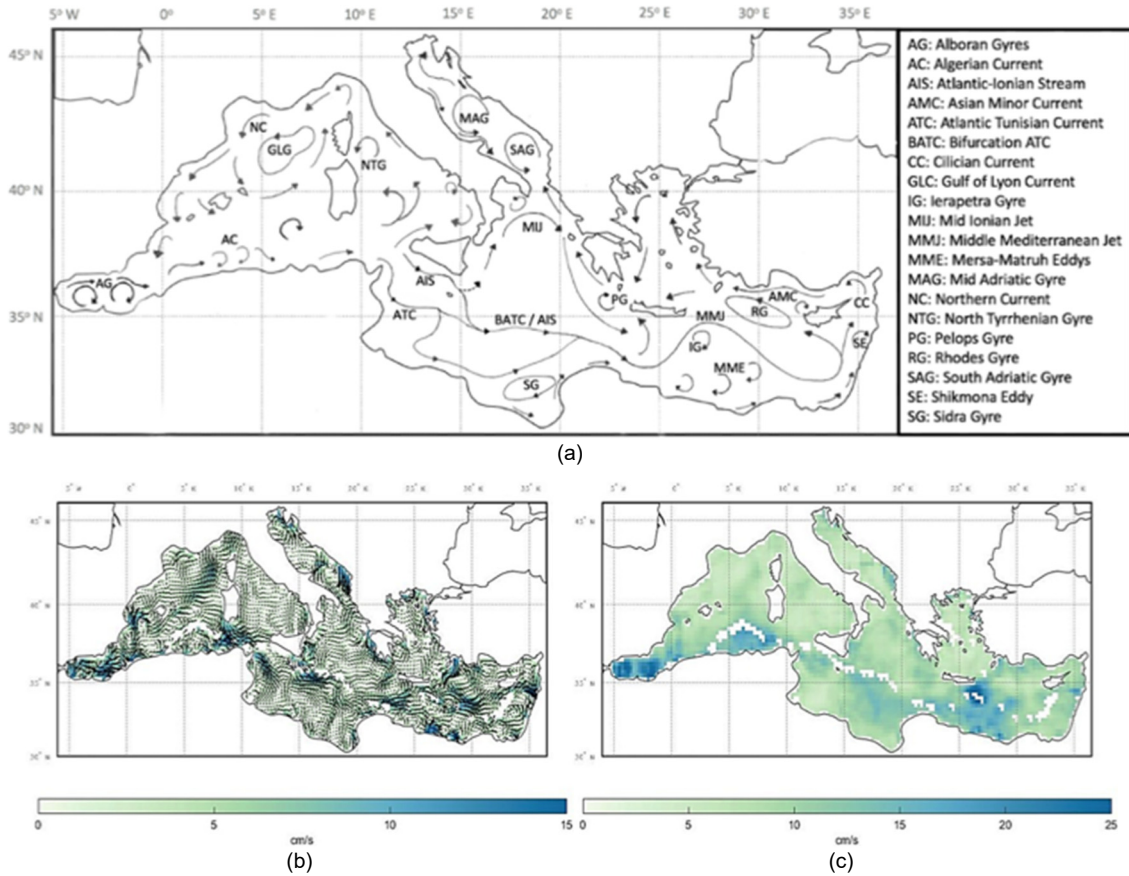
In this section, we present the results for the Mean Mediterranean SGC for the 23 years period 1993-2015, and its monthly climatology and seasonal variations. The Mediterranean circulation pattern shows two sub-basins naturally divided, that are the Western and Eastern or Levantine basins. To present the results, we consider these two sub-basins, and a third region that we refer as the Mediterranean Central region, and it comprises the Tyrrhenian and the Ionian seas. This work is an update of Vigo *et al.* (2018); thus, we focus the discussion on a comparison with previous results therein. In Figure 1a. is included a schematic map of the main pattern of the Mediterranean surface circulation, characterized by a large amount of mesoscale variability phenomena.

In Figure 1b, we represent our approach of the flow vector field, direction of the mean vectors overlapped to their norm. Most of the major mesoscale features in the circulation are cancelled out when computing the mean, we analyse those, later in this section, by considering the anomalies with respect to this mean.

In the latter subsections, we present the monthly climatology of SGC as anomalies respect to the mean (shown in Fig. 1b) to capture the seasonal variability of the SGC; The SGC anomalies variations group by seasons (winter, spring, summer and autumn) for the different three regions (Western sub-basin, Central region and Eastern sub-basin) are examined later in subsection 3.3.

### 3.1. Mean Mediterranean SGC

Our results confirm the mean SGC shown in Figure 1a, that is in good agreement with previous studies of the general pattern of the Mediterranean Sea circulation (Robinson *et al.* 1991, 1999; Poulan *et al.* 2012). The general circulation of the Mediterranean Sea is mainly characterized by the Atlantic Water Jet with its instabilities, bifurcations and multiple veins, which travels from west (Gibraltar basin) to east (Levantine basin) Robinson *et al.* (2001); Due to its geographic location the Atlantic water inflow travels over the southern part all of the Western, the Ionian and the Levantine basins identifying several important features along the coast such as the Alboran gyres which appears with higher intensity in the mean circulation (Fig. 1b), Algerian currents creating some eddies and branches up to the Balearic sea, going to the southern part of the eastern basin Mersa-Martuh eddies and the Irapetra and Pelops gyres are clearly identified in Figures 1b and 1c with mean speed reaching up to 28.5 cm/s, move eastward to the Sardinia Channel where two streams of water enter the eastern basin through the Sicily Strait: the Atlantic Tunisian Current (ATC), first reported by Béranger *et al.* (2004), traveling along the Tunisian coast, and the Atlantic-Ionian Stream (AIS) flowing off the southern coast of Sicily. The latter has a branch northward that becomes the Mid-Ionian Jet (MIJ), and a second branch turns south-eastward and merges with Bifurcation of the ATC (BATC) close to Lampedusa Island depending on the season it could be just BATC or mainly AIS as we will see latter.



**Figure 1:** Mean Mediterranean Surface Circulation: a) Schematic map of Mean Mediterranean Circulation from (Vigo *et al.* 2018), reproduced with authors permission; b) Mean Mediterranean SGC flow field for the period 1993-2015, direction (arrows) superposed to their norm (shading, in cm/s); c) Mean monthly Mediterranean SGC Speed (in cm/s).

### 3.2. Monthly Climatology and Seasonal Variations

The monthly climatology of the SGC is represented in Figures 2 and 3 as monthly maps of anomalies with respect to the mean shown in Figure 1b; they catch the seasonal variation of the general pattern of circulations, in general, follows in good agreement the results in Vigo *et al.* (2018), thought here we can observe better the detail in the small-scale phenomena, and higher variations with respect to the previous approach in almost all the main currents.

Many seasonal variations for some of the Mediterranean Sea mesoscale features can be identified as we will discuss later by regions. For a better visualization of this mesoscale features seasonal variations, we present the results by zooming in by regions. Therefore, in the following, we analyse the four seasons for the Western Mediterranean (Fig. 4); the Central region including Tyrrhenian and Ionian Sea (Fig. 5); and the Eastern Mediterranean (Fig. 6). The four maps (one per season) represented on each figure correspond to the 1993-2016 mean according to the following season definition: Winter (December, January, February); Spring (March, April, May); Summer (June, July, August); Autumn (September, October, November).

#### 3.2.1. Western basin

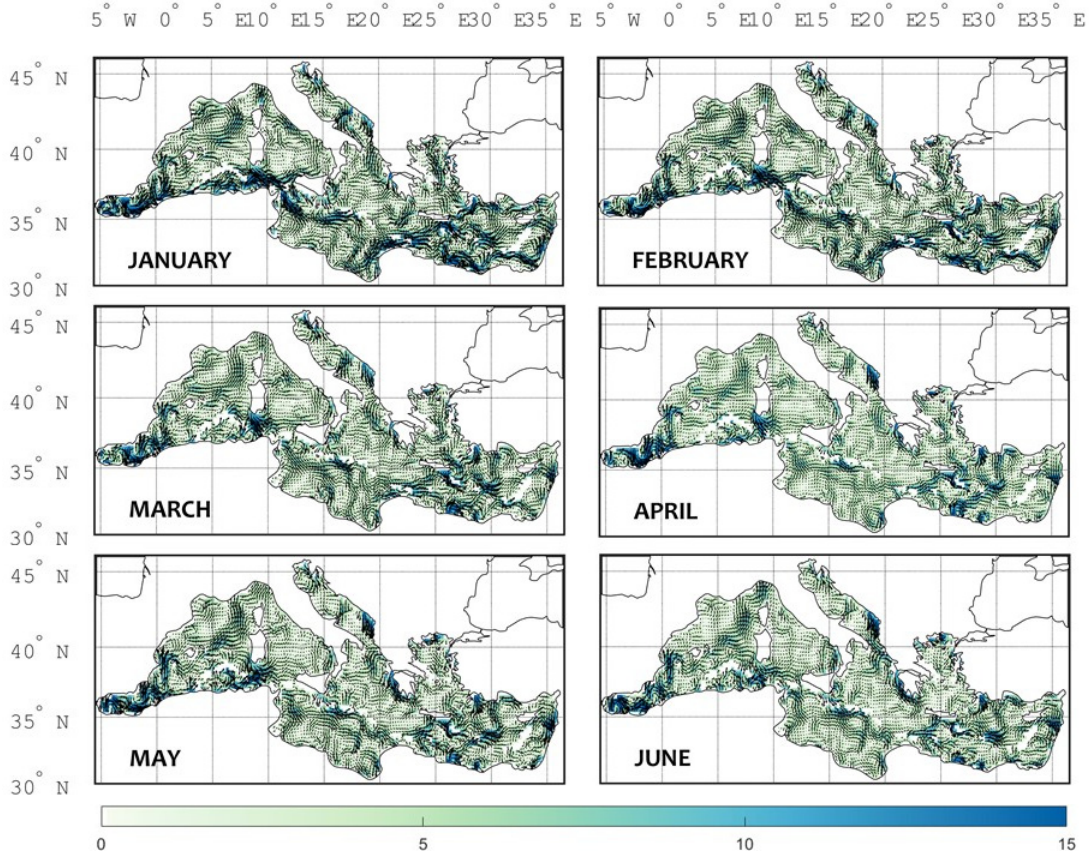
The main features in the western basin are the Alboran gyres (AG) and the Algerian Current (AC) circulation, as

observed in Figure 2 two strong cyclonic AG appears in the west southern part and a third one with less intensity appears around (1° East, 37° North) in both seasons winter and spring, at the same location all the AG changes its direction into anticyclonic gyres in summer and autumn when the third gyre remains with the same direction with lower speed, our findings appears to be partly substantiated by our previous work Vigo *et al.* (2018).

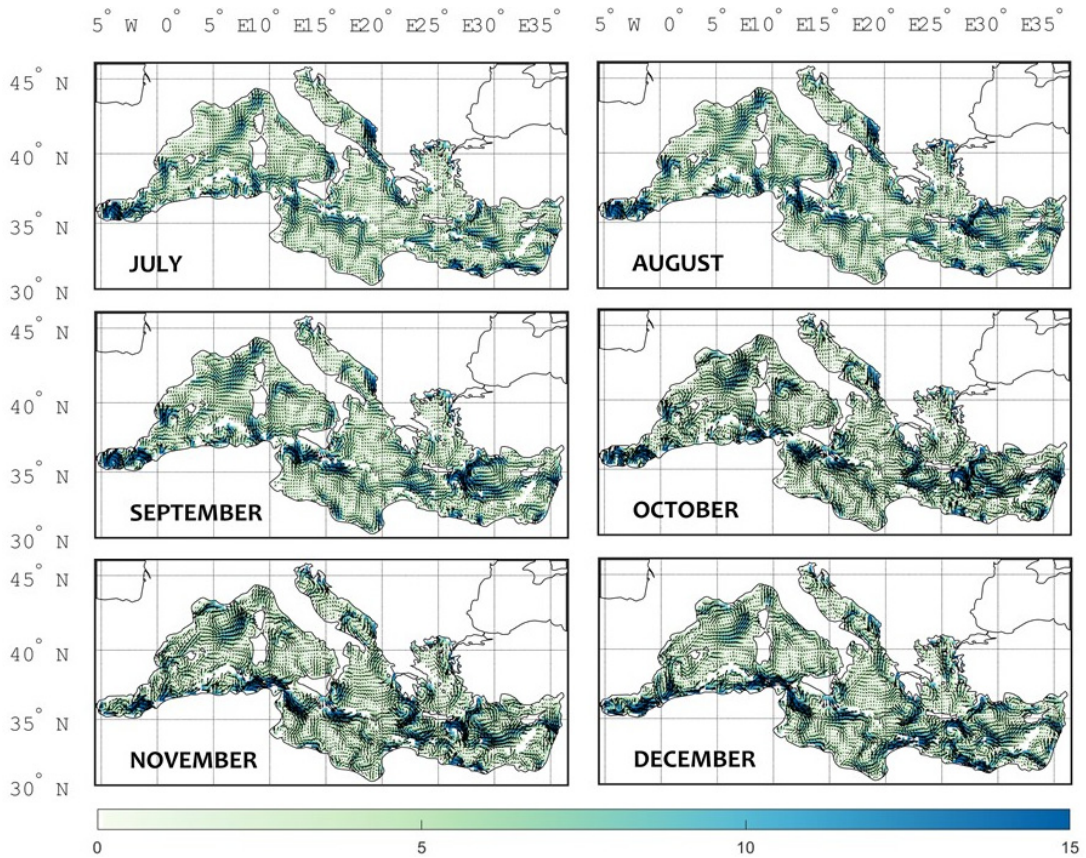
As shown in Figure 4, the AC flows eastward along the Algerian coast with a speed increase of around 12-13 cm/s only in winter time, and slows down the rest of the year, the flow emerges nesting small meanders along the coast in all seasons northward to Sicily Island; Noticing remarkable changing in direction west ward in the summer season of the AC, these changing appears strongly in August and June (see Fig. 2), remarking also a permanent appearance of the Gulf of Lyon Current with higher visualization in winter and spring seasons; As we estimated only the geostrophic circulation, the past studies often referred to the total circulation, it is well known that the Alboran Sea upper layer circulation behaviour is driven by wind stress and atmosphere pressure is largely ageostrophic, see Viudez *et al.* (1996, 1998).

The observed seasonal reversal in the western basin, thus need to be interpreted with caution considering the high variability of the mesoscale phenomena and the difficulty to validate it with in situ observations in the region given the lack of literature about it.



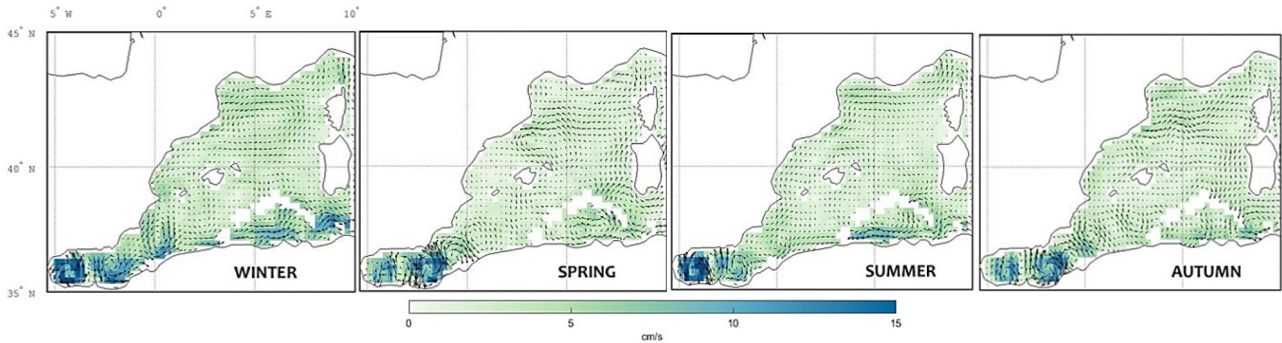


**Figure 2:** Monthly climatology of the Mediterranean Surface Geostrophic Currents anomalies with respect to the 1993–2015 mean (shown in Figure 1a). Months from January to June, the month is indicated at the right bottom of each panel.

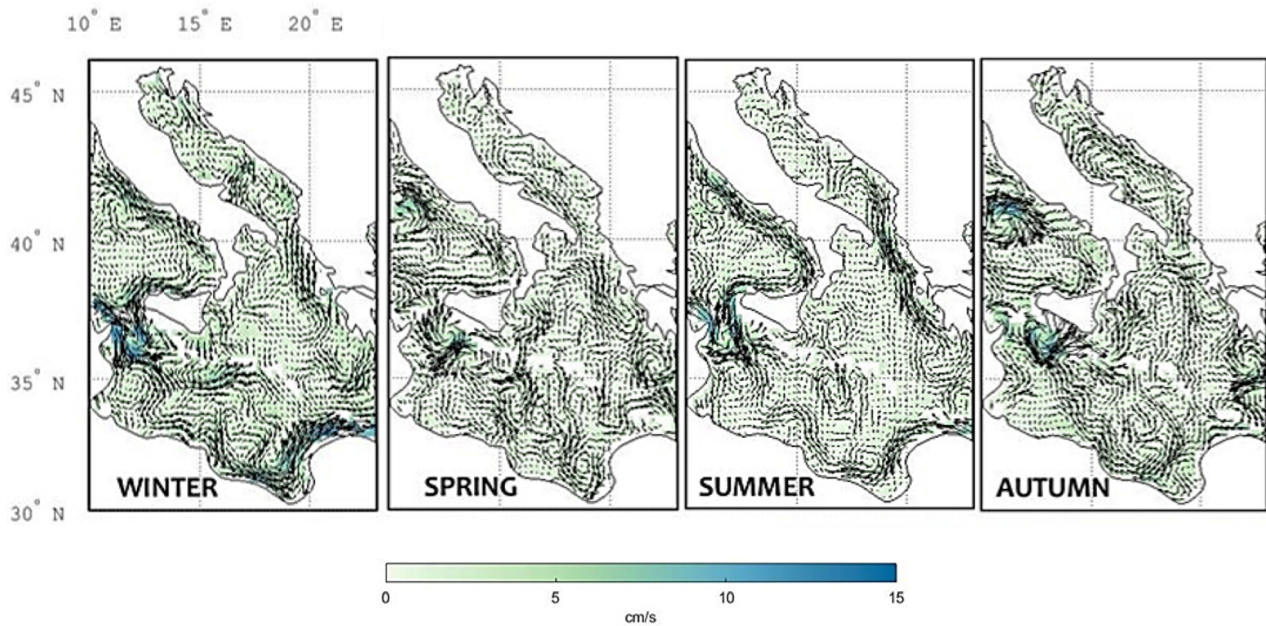


**Figure 3:** Monthly climatology of the Mediterranean Surface Geostrophic Currents anomalies with respect to the 1993–2015 mean (shown in Figure 1a). Months from July to December, the month is indicated at the right bottom of each panel.

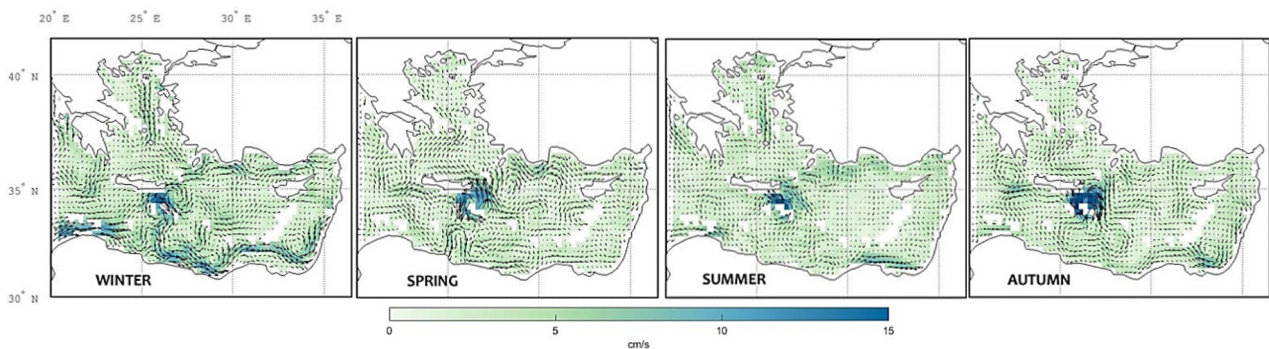




**Figure 4:** 1993–2015 Seasonal Mean Western Mediterranean Surface Geostrophic Currents as estimated from satellite data. Season is indicated at the bottom left of each panel. The colour scale is designed to better visualize the full range of values and it's saturated to 15 cm/s, though speed reaches up to 18.6 cm/s.



**Figure 5:** 1993–2015 Seasonal Mean Surface Geostrophic Currents in the Central Mediterranean region estimated from satellite data. Season is indicated at the bottom right of each panel. The colour scale is designed to better visualize the full range of values and it's saturated to 15 cm/s, though speed reaches up to 16.5 cm/s.



**Figure 6:** 1993–2015 Seasonal Mean Eastern Mediterranean Surface Geostrophic Currents as estimated from satellite data. Season is indicated at the bottom left of each panel. The colour scale is designed to better visualize the full range of values and it's saturated to 15 cm/s, though speed reaches up to 18 cm/s.

### 3.2.2. Central region

Figure 5 focuses on the central region of the Mediterranean Sea located between longitude lines 10° and 25° east. Circulation in this area is characterized by a branch of the AIS that travels cyclonically toward the north, in autumn the Tyrrhenian gyre is confined north of the Bonifacio Strait and has a definite zonal orientation

and nested smaller eddies inside, in summer the current at the frontal region increases while the gyre is stretched out to the north as far as the central Tyrrhenian Sea specially in May and June reversing its direction in September as shown in Figures 2 and 3.

This reversal also reported in Vigo *et al.* (2018) was not mentioned in the earlier literature, although there is an

agreement in the general pattern of the Tyrrhenian gyre with Artale *et al.* (1994).

The southern Tyrrhenian sub basin is characterized by a branch of the AIS that reaches its maximum velocity in both winter and summer when its norm exceeds the 15 cm/s, it's mainly influenced by outside circulation conveyed into the sub basin through Strait of Sicily, where we notice a strong motion of AIS and ATC with high anomalies around 14.5 cm/s in winter and 13-10 cm/s in the rest of the year. This merging creates a dipole composed of cyclonic and anticyclonic circulation, see Marullo *et al.* (1994).

The Adriatic general circulation system is confirmed as a global cyclonic circulation except in the northern Adriatic area where an anticyclonic meanders going northeast direction towards Trieste in autumn, winter and spring, nevertheless it flows out southeast direction along Greece coast with higher strength that reaches up to 15 cm/s in summer season forming Pelops seasonally gyre with low velocity around 2-5 cm/s in June as shown in Figure 2, a similar observation in different periods has been reported by Artegiani *et al.* (1997) and Poulain (2001).

### 3.2.3. Eastern basin

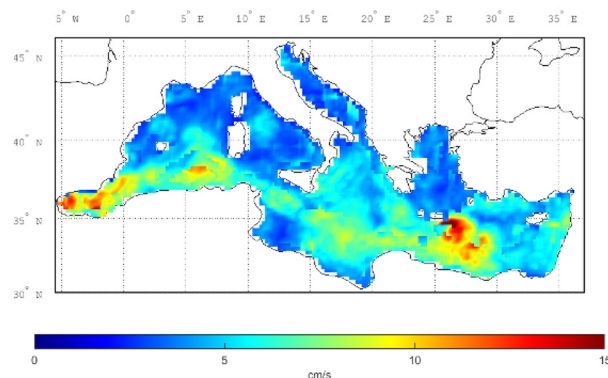
In the eastern Mediterranean Basin shown in Figure 6 several seasonal variations are observed regarding the Middle Mediterranean Jet (MMJ), Ierapetra Gyre (IG) and the Mersa-Martuh Eddies (MME), both of MMJ and IG shift their position seasonally with higher velocities in the central part of Levantine Sea, reporting a cyclonic Ierapetra Gyre in both seasons spring and summer, shifting into a cyclonic gyre in autumn at the same spot, the southern vein flows eastward from the edge of Tunisian and Libya coast noticing an increment of velocity in winter shifting westward direction in summer with less intensity forming the MME with stronger speed in winter and spring, the seasonal reversal is in a good agreement with our previous work Vigo *et al.* (2018).

The velocity vector field reveals a basin-scale cyclonic circulation along the shelf slope in the Levantine basin in winter and spring with average speed that reaches to 16 cm/s, while the southern part appears to be dominated by mesoscale eddies, the last gyre series seem to be generated by the instability of the coastal current and its interaction with the Mersa- Matruh continental shelf (29–30°East). It seems that these interactions intensify the eddy signature and increase its size in winter. Then, it sheds the coastal current and propagates seaward (north-eastward) across the Shikmona area.

Along the eastern Levantine coasts, the northward stream meanders and generates many eddies, gets stronger and larger in winter, precisely in December and January, although it remains motionless in several months of the year as April and May (see Figs. 2 and 3). This feature is similar to the behaviour of the AC reported earlier. As for the AG, this apparent discrepancy can be partly explained by the strong ageostrophic component of the IG due to the Etesian winds see (Mkhinini *et al.* 2014). This results share a number of similarities with Alhammoud *et al.* (2005) and also confirms our previous finding Vigo *et al.* (2018).

### 3.3. Comparison with Mercator data

In this section we compare our results with the SGC from the hydrodynamic model Mercator that assimilates in situ, SST and altimetry data. For the comparison, we will consider only the 7 years period from 2007 to 2013, in order to consider the same period as in Vigo *et al.* (2018) and make easier to evaluate the enhancement of the new approach. In Figure 7 we have plotted the standard deviation of Mediterranean SGC speed for that period. Notice that the colour scale is designed to resolve regional features rather than extreme values and saturates at 15 cm/s. It confirms for this sub-period the variability follows the same behaviour commented on the former analysis of the annual climatology (Figs. 2 - 6).



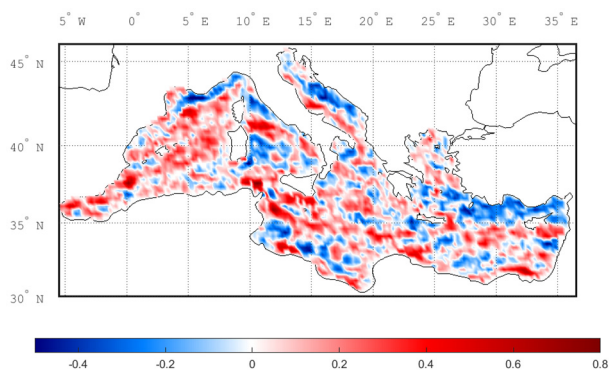
**Figure 7:** Standard deviation of the Mediterranean Surface Geostrophic Currents speeds as estimated from satellite data for the period 2007-2013.

Comparing our approach with the Mercator SGC, we find that the annual mean speed Mercator SGC Climatology (not shown) presents a similar pattern that our approach, but with higher velocities southeast of Crete, where the IG forms, and in the western part of the Alboran Sea, where the first AG takes place. We have estimated the correlation between the mean SGC speed from both datasets restricted to the Mercator period and the correlation between two maps is 0.61 (statistically significant at the 0.05). That is a remarkable increase in the correlation with Mercator simulations with respect to the previous approach (whose mean SGC correlation with Mercator mean SGC was 0.46). This increase on correlation offers a compelling evidence for the improvement of our updated approach and confirms again the validity of the methodology and the data, to capture not only the general pattern of circulation, but also small-scale circulation features, as is the case of the Mediterranean Sea circulation.

The mean SGC speed for both data sets (not shown) is in very good agreement showing the same pattern all over, but quantitatively it shows much better agreement in the Eastern and south of the Western basin (where the main variability takes place), while in the north part mean velocities are lower in our SGC approach, the main differences are in the coastline of Gulf of Lion and north part of the Balearic basin.

In Figure 8, we have represented the map of correlation coefficients between the mean Mercator SGC speed and our approach, where correlation values ranging between mainly 0.6 and 0.8 are observed all over, reaching up to 1 in some spots located at along the main path of the Atlantic Stream System.





**Figure 8:** Correlation coefficients map between the Mediterranean Surface Geostrophic Currents Speed as estimated from satellite data and from ocean model Mercator simulated data (time period 2007–2013).

#### 4. Conclusions

This study provides an improved geodetic approach, based on satellite data, to the Mediterranean SGC and its climatology. Our estimated mean SGC reproduces the general known patterns of the Mediterranean Sea Circulation at the basin and sub basin scale (Robinson *et al.* 1991, 1999; Roussenov *et al.* 1995; Millot and Taupier-Letage 2005; Poulain *et al.* 2012) beside reporting new findings and enhancing the methodology and data sets used in our previous work Vigo *et al.* (2018).

For both the Western and Eastern basins, seasonal variations of the circulation are observed for well-marked events such as the AC and AG seasonal reversal for the first, and the IG for the latter, confirming our previous results and other studies such as: (Alhammoud *et al.* 2005; Artegiani *et al.* 1997; Poulain 2001; Marullo *et al.* 1994). The central region is characterized by the AIS and the Adriatic circulation system with three gyres that vary seasonally reported, what partly supports previous studies as Marullo *et al.* (1994). For the Eastern basin, dominated by the MME, MMJ and the IG, we present a

seasonal variation that shares a similarity with Alhammoud *et al.* (2005) and also confirms our previous results Vigo *et al.* (2018).

The outcomes presented for the Mediterranean must be interpreted with caution, given the high variability and the small scale phenomena that characterize the Mediterranean Sea, as well as their possible ageostrophic nature. Unfortunately, the limited availability of in situ observations doesn't allow a full validation of the results. Nevertheless, considerable progress has been made with regards to comparison with Mercator model simulations that assimilate in situ data among other. A noticeable improvement in the correlation with Mercator simulations has been reported with respect to our previous approach, we obtained also similar patterns and intensities for the main characteristics at basin and sub basin scales for the seasonal variations. Though our approach currents intensities are still weaker than those provided by Mercator simulations, mainly in the northern part of the Western basin.

In this work, the incorporation of an enhanced SSH and a more accurate geoid, allowed to provide improved geodetic estimates of the Mediterranean SGC from satellite data only. This represents an evaluation tool for studying ocean dynamics at the basin and sub-basin scales, where further efforts need to be made.

#### Acknowledgements

We acknowledge the support of all data providers: ESA CCI Sea Level Project for the Altimetry data, DTU SPACE from the Danish National Space Centre for MDT and MSS products, the surface currents from the Mercator Ocean Project, and LEGOS and CERSAT for the Ekman Surface Currents. The work is supported by Spain Ministry of Science, Innovation and Universities grant number RTI2018-093874-B-100. Zid Ferdous is supported by PhD Grant of Ministry of Higher Education and Scientific Research from Algerian Government for residential training abroad.

#### References

- ALHAMMOUD, B., BÉRANGER, K., MORTIER, L., CRÉPON, M., and DEKEYSER, I., 2005. Surface circulation of the Levantine Basin: comparison of model results with observations. *Progress in Oceanography*, **66**(2-4), pp. 299-320.
- ANDERSEN, O., KNUDSEN, P., and STENSENG, L., 2018. A new DTU18 MSS mean sea surface—Improvement from SAR altimetry. *In 25 years of progress in radar altimetry symposium*.
- ARTALE, V., ASTRALDI, M., BUFFONI, G., and GASPARINI, G. P., 1994. Seasonal variability of gyre-scale circulation in the northern Tyrrhenian Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **99**(C7), pp. 14127-14137.
- ARTEGIANI, A., PASCHINI, E., RUSSO, A., BREGANT, D., RAICICH, F., and PINARDI, N., 1997. The Adriatic Sea general circulation. Part II: baroclinic circulation structure. *Journal of physical Oceanography*, **27**(8), pp. 1515-1532.
- BÉRANGER, K., MORTIER, L., GASPARINI G.-P., GERVASIO, L., ASTRALDI, M., and CRÉPON, M., 2004. The dynamics of the Sicily Strait: a comprehensive study from observations and models, Deep Sea Research Part II: Topical Studies. *Oceanography*, **51**(4–5), pp. 411-440.
- GRUBER, T., and FECHER, T., 2018. Optimal Ocean Geoid as Reference Surface for Mean Ocean Circulation and Height Systems. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 8691.
- KNUDSEN, P., ANDERSEN, O., and MAXIMENKO, N., 2019. A new ocean mean dynamic topography model, derived from a combination of gravity, altimetry and drifter velocity data. *Advances in Space Research*.
- MARULLO, S., SANTOLERI, R., and BIGNAMI, F., 1994. Tyrrhenian Sea: Historical Satellite Data Analysis. *Seas. Interannu. Var. West. Mediterr. Sea*, **46**, pp. 135-154.

- MILLOT, C., and TAUPIER-LETAGE, I., 2005. Circulation in the Mediterranean Sea. In *The Mediterranean Sea*, pp. 29-66. Springer, Berlin, Heidelberg.
- MKHININI, N., COIMBRA, A. L. S., STEGNER, A., ARSOUZE, T., TAUPIER-LETAGE, I., and BÉRANGER, K., 2014. Long-lived mesoscale eddies in the eastern Mediterranean Sea: Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**(12), pp. 8603-8626.
- POULAIN, P. M., 2001. Adriatic Sea surface circulation as derived from drifter data between 1990 and 1999. *Journal of Marine Systems*, **29**(1-4), pp. 3-32.
- POULAIN, P. M., MENNA, M., and MAURI, E., 2012. Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data. *Journal of Physical Oceanography*, **42**(6), pp. 973-990.
- ROBINSON, A. R., GOLNARAGHI, M., LESLIE, W. G., ARTEGIANI, A., HECHT, A., LAZZONI, E., MICHELATO, A., SANSONE, E., THEOCHARIS, A., and ÜNLÜATA, Ü., 1991. The eastern Mediterranean general circulation: features, structure and variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **15**(3-5), pp. 215-240.
- ROBINSON, A. R., SELLSCHOPP, J., WARN-VARNAS, A., LESLIE, W. G., LOZANO, C. J., HALEY JR, P. J., ANDERSON, L.A. and LERMUSIAUX, P. F. J., 1999. The Atlantic ionian stream. *Journal of Marine Systems*, **20**(1-4), pp. 129-156.
- ROBINSON, A. R., LESLIE, W. G., THEOCHARIS, A., and LASCARATOS, A., 2001. Mediterranean Sea circulation. *Ocean currents*, **1**(19).
- ROUSSENOV, V., STANEV, E., ARTALE, V. and PINARDI, N., 1995. A seasonal model of the Mediterranean Sea circulation. *J. Geophys. Res.*, **100**(13), pp. 515–13,538.
- VIGO, M. I., SEMPERE, M. D., CHAO, B. F., and TROTTINI, M., 2019. Mediterranean surface geostrophic circulation from satellite gravity and altimetry observations. In *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas*, pp. 269-285. Birkhäuser, Cham.
- VIÚDEZ, Á., TINTORÉ, J., and HANEY, R. L., 1996. Circulation in the Alboran Sea as determined by quasi-synoptic hydrographic observations. Part I: Three-dimensional structure of the two anticyclonic gyres. *Journal of Physical Oceanography*, **26**(5), pp. 684-705.
- VIÚDEZ, A., PINOT, J. M., and HANEY, R. L., 1998. On the upper layer circulation in the Alboran Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**(C10), pp. 21653-21666.

## **CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES COSTEROS CON IMÁGENES LANDSAT 8 Y SENTINEL 2 (2015-2019) EN CHILE CENTRAL; PLAYA REÑACA, BAHÍA DE CONCÓN Y BAHÍA DE ALGARROBO**

**COASTAL SPATIAL-TEMPORAL CHANGES WITH LANDSAT 8 AND SENTINEL2 IMAGINE (2015-2019) IN  
 CENTRAL CHILE; REÑACA BEACH, CONCÓN BAY AND ALGARROBO BAY**

Idania Briceño de Urbaneja<sup>a,b,\*</sup>, Elena Sánchez-García<sup>c</sup>, Josep E. Pardo-Pascual<sup>b</sup>, Jesús Palomar-Vázquez<sup>b</sup>, Raúl Ugalde-Peralta<sup>a</sup>, Catalina Aguirre-Galaz<sup>d</sup>, Waldo Pérez-Martínez<sup>a,b</sup>, Paulina Vidal-Páez<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Centro de Observación de la Tierra (Hémera), Universidad Mayor, Camino La Piramide 5750, 8580745 Santiago, Chile. [Idania.briceno@umayor.cl](mailto:Idania.briceno@umayor.cl); [raul.ugalde@umayor.cl](mailto:raul.ugalde@umayor.cl); [waldo.perez@umayor.cl](mailto:waldo.perez@umayor.cl); [paulina.vidal@umayor.cl](mailto:paulina.vidal@umayor.cl)

<sup>b</sup> Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [jepardo@cgf.upv.es](mailto:jepardo@cgf.upv.es); [jpalomav@upvnet.upv.es](mailto:jpalomav@upvnet.upv.es)

<sup>c</sup> Research Institute of Water and Environmental Engineering (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. [elsncgar@upv.es](mailto:elsncgar@upv.es)

<sup>d</sup> Escuela de Ingeniería Civil y Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile. [catalina.aguirre@uv.cl](mailto:catalina.aguirre@uv.cl)

### Abstract:

Due to their oceanographic and climatic ecological characteristics, the coastal areas of the Valparaíso Region of Chile are of great importance for the country's tourist, economic, and environmental development. The region's coasts have been affected by extreme events since 2015, with recurrent swells that have increased between 10% and 25% compared to previous years, causing the interruption of the annual dynamic process of the beaches accentuated by anthropic interventions on beaches, wetlands and coastal dunes that promote coastal degradation. This work aims to characterize which part of the beaches and at what time of year there is a higher risk of severe erosion in the immediate areas to the coast and explain its causes based on satellite images of medium resolution satellite images. 128 SDS were extracted with Landsat 8 OLI and Sentinel 2 images with systems SHOREX. Average widths calculated for the series in each of the seasons. Recording the minimum widths in the proximal areas with averages of 12.3 m; 23.6 m and 21.2 m Concón Bay, Reñaca Beach and Algarrobo bay, respectively showing critical or problematic states. The dominant direction of the waves and the geographical disposition of the three beaches seems evident that there is a robust longitudinal transport to the north that generates less sediment accumulation in the proximal areas. The seasonal variation of the beaches distinguishes by more energetic conditions in winter than in summer. But they are also influenced by rapid episodic periods, low atmospheric pressure systems from the north and south, swells and tropical storms. Hence, it is unlikely that the variations in the width of the beach are only due to winter-summer energetic conditions.

**Key words:** coastal dynamics, coastline, erosion, critical areas, multitemporal coastal mapping, remote sensing

### Resumen:

Las áreas costeras de la región de Valparaíso de Chile por sus características oceanográficas, climáticas y ecológicas son de gran importancia para el desarrollo turístico, económico y ambiental del país. Las costas de la región se han visto afectadas por eventos extremos desde 2015, con marejadas recurrentes que han aumentado respecto a años anteriores entre el 10% y 25%. Esto ha provocado la interrupción del proceso dinámico anual de las playas, acentuado por las intervenciones antrópicas sobre estos ambientes costeros, humedales y dunas que promueven su degradación. El trabajo que se presenta tiene como objetivo caracterizar en qué parte de las playas y en qué momento del año hay un riesgo más alto de erosión grave en las áreas inmediatas a la costa, así como tratar de explicar sus causas apoyándose en la utilización de imágenes satelitales de resolución media. Se extrajeron 128 SDS con imágenes Landsat 8 OLI y Sentinel 2 con el sistema SHOREX. Se calcularon los valores promedio de anchura de playa para la serie en cada una de las temporadas registrando anchuras mínimas en las zonas proximales de 12,3 m; 23,6 m y 21,2 m para la Bahía de Concón, Playa Reñaca y Bahía de Algarrobo respectivamente, demostrando estados críticos o problemáticos. La dirección dominante del oleaje y la disposición geográfica de las tres playas hace evidente la existencia de un fuerte transporte longitudinal hacia el norte que genera que las áreas proximales presenten menor acumulación de sedimentos. La variación estacional de las playas se caracteriza por condiciones más energéticas en invierno que en verano. No obstante, se ven también influenciadas por periodos episódicos rápidos, sistemas de bajas presiones atmosféricas del norte y del sur, así como marejadas y tormentas tropicales que se suman al moldeamiento de las playas.

**Palabras clave:** dinámica costera, línea litoral, erosión, áreas críticas, cartografía multitemporal de costas, teledetección

\* Corresponding Author: Idania Briceño de Urbaneja, [Idania.briceno@umayor.cl](mailto:Idania.briceno@umayor.cl)



## 1. Introducción

Las costas de la Región de Valparaíso por su ubicación son muy atractivas para diferentes actividades económicas, emplazamiento de población y desarrollo regional. Desde hace 30 años las acciones antrópicas han estado provocando el deterioro de los ambientes marino-costeros (Martínez *et al.* 2019), mediante la construcción de infraestructuras sobre playas, humedales y dunas (Rangel-Buitrago *et al.* 2018; Martínez *et al.* 2018).

Las costas son ambientes que constantemente están cambiando, debido a las interacciones entre el océano, la atmósfera, la tierra y las personas (Nicholls 1995).

La monitorización del cambio de la posición de la línea de costa es importante para el desarrollo de actividades económicas, planificación regional, recreación y protección ambiental (Sekovski *et al.* 2014). Es un indicador que permite cuantificar, zonificar áreas con peligros naturales, revelar procesos de erosión-acreción, detectar áreas críticas, estudiar los patrones sedimentarios, componentes bióticos y abióticos presentes, entender la morfodinámica costera, entre otros (Gens 2010).

A lo largo de la región de Valparaíso, el litoral arenoso desde 2015 ha sido frecuentemente afectado por diversos eventos extremos, tales como: tormentas, marejadas e inundaciones. En los últimos años se ha manifestado el aumento de marejadas en temporadas de primavera-verano respecto a años anteriores, con un incremento que oscila entre 10% y 25% según los pronósticos (<https://marejadas.uv.cl/>), convirtiéndose en la principal amenaza para la región (Iguait *et al.* 2019). Adicionalmente, desde 2010 la región central de Chile atraviesa por una sequía extrema, con registros de disminución de precipitación entre 25% a 45% en las secciones altas de las cuencas que aportan sedimentos a la costa. Esto ha generado la reducción de la carga sedimentaria de los ríos hacia las costas en hasta un 90% (Garreaud *et al.* 2020; Masotti *et al.* 2018).

Ante esta problemática, surge la necesidad de estudiar las costas con metodologías y herramientas robustas y estables que permitan monitorizar en periodos cortos los cambios descritos, pues la región de Valparaíso se enfrenta a diversas amenazas asociadas a cambios rápidos en la geomorfología costera.

Las técnicas tradicionales para establecer la posición de la línea de costa requieren, una amplia inversión en tiempo y recursos y es costoso abarcar grandes superficies costeras (Sunder *et al.* 2017). En Chile se han realizado estudios espacio-temporales de la variabilidad interanual e interdecenal de la posición de la línea de costa, utilizando técnicas fotogramétricas a múltiples escalas, con modelos de ajustes espiral logarítmica, sistemas de información geográfica, levantamientos topográficos y modelamiento a través de los forzamientos oceánicos con énfasis en eventos puntuales de marejadas, temporales y tsunamis (Martínez 2011; Martínez *et al.* 2016, 2018; Winckler *et al.* 2017). Con estas técnicas se ha concluido que el 80% del litoral arenoso en Chile presenta problemas de erosión, especialmente las playas con campos dunares y humedales (Ministerio del Ambiente 2019).

En las últimas décadas las imágenes multiespectrales, se han convertido en una fuente robusta y estable de datos para el seguimiento sistemático de las costas, debido a su gran cobertura, resolución espacial y temporal, así como su libre disponibilidad en los portales del Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Agencia espacial europea (ESA).

Este acervo de información espacial ha estimulado el desarrollo y aplicación de métodos automáticos y semiautomáticos para la extracción de líneas de costa y la aplicación de múltiples metodologías y escalas: TasseledCap (Scott *et al.* 2003), redes neuronales (Mas 2004), índices espectrales (Feyisa *et al.* 2014; Liu *et al.* 2017). Con frecuencia dichas metodologías han requerido utilizar vehículos aéreos no tripulados con resolución espacial centimétrica (Zanutta *et al.* 2020), LiDAR aerotransportado (Kim *et al.* 2017) y, comúnmente, con satélites de resoluciones medias de la constelación Landsat MSS, TM, ETM, OLI y Sentinel 2 (Cabezas-Rabadán *et al.* 2017; Cabezas-Rabadán and Pardo-Pascual 2017; Sánchez-García *et al.* 2019, 2020; Vos *et al.* 2019).

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar en qué parte de las playas y en qué momento del año hay un riesgo más alto de erosión grave en las áreas inmediatas a la costa, así como tratar de explicar sus causas, apoyándose en la utilización de imágenes satelitales de resolución media.

## 2. Área de estudio

La Bahía de Concón, la playa de Reñaca y la Bahía de Algarrobo se ubican en la Región de Valparaíso, Chile Central (Fig. 1). Son lugares de interés para comprender la influencia del océano, agentes atmosféricos y antrópicos en la dinámica costera. Tienen una longitud de 3,3; 1,3 y 4,5 km respectivamente. Las playas están orientadas aproximadamente de norte a sur y suelen estar expuestas a marejadas persistentes de alta energía del Océano Pacífico (Agredano *et al.* 2019). Concón incluye un extenso campo de dunas costaneras, principalmente de los tipos barjan y longitudinal, con edades pleistocenas tardías y holocenas. Reñaca tiene una morfología cambiante, mostrándose más plana como consecuencia de las marejadas. Algarrobo se caracteriza por un extenso litoral arenoso en sus zonas central y distal, con aportes sedimentarios locales a través de los estuarios El Membrillo y San Jerónimo (Martínez 2007).

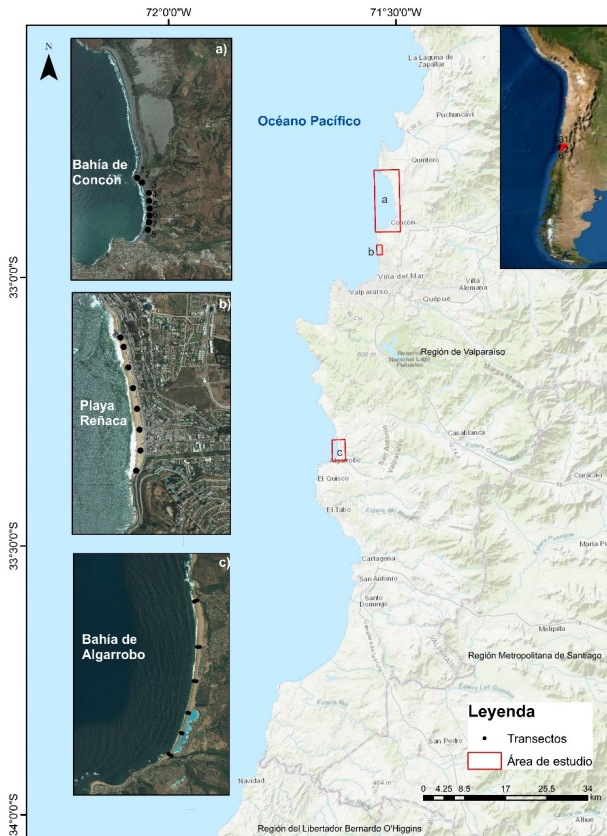
## 3. Metodología

Se escogieron y contrastaron 3 playas con características distintivas entre sí: playas con dunas y desembocadura de río, playa urbana, playa con construcciones sobre humedales costeros.

### 3.1. Extracción automática de posición de la línea de costa

El sistema de extracción de la posición de líneas de costas propuesto (Pardo-Pascual *et al.* 2012, 2018; Almonacid-Caballer *et al.* 2016; Palomar-Vázquez *et al.* 2018, Sánchez-García *et al.* 2019) sistematiza en tres bloques de trabajo a realizar mediante la descarga, preprocesamiento y procesamiento de grandes volúmenes de información espacial georreferenciada, y

extracción a nivel subpíxel de la posición de la línea de costa a partir de imágenes de resolución media (Landsat 5, 7 y 8 y Sentinel 2).



**Figura 1:** Ubicación de las tres zonas de estudio. Los círculos negros corresponden a transectos perpendiculares. De norte a sur: a) Bahía de Concón; b) Playa Reñaca y c) Bahía de Algarrobo.

En este trabajo, se utilizó el sistema SHOREX de Palomar-Vázquez *et al.* (2018). Se emplearon las bandas SWIR1 1,57-1,65  $\mu\text{m}$  y 1,56-1,65  $\mu\text{m}$  de Landsat 8 OLI y Sentinel 2 respectivamente. En la (Fig. 2) se muestra la distribución temporal de las 128 SDS utilizadas en este estudio.

### 3.2. Ancho de la playa

Se estableció una línea interior fija para determinar el ancho de la playa. Esta línea se digitalizó a partir de imágenes de alta resolución espacial (0,5 m) usándose como criterio de definición el borde de las dunas, infraestructura de caminerías y calzadas (Fig. 3).

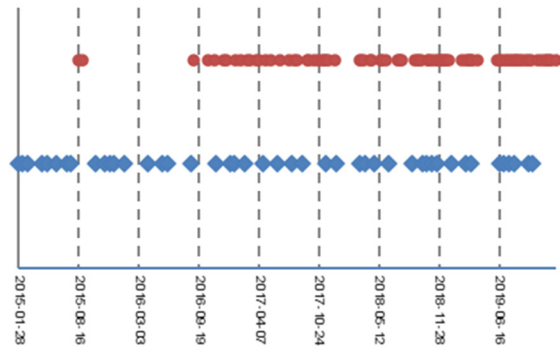
Los anchos de la playa se analizaron en segmentos de 100 m (Fig. 4). Se calcularon los promedios por temporadas de los anchos de la línea de costa para evidenciar la variabilidad temporal de las SDS.

La categorización de los anchos de la playa se estableció según los criterios (Cabezas-Rabadán *et al.* 2019) como sigue: Playas < 15 m críticas, entre 15-30 m problemáticas, y > 30 m no problemáticas.

### 3.3. Oleaje

En Chile no existen registros de oleaje de largo plazo, por lo que se han llevado a cabo simulaciones numéricas

utilizando el modelo espectral Wavewatch III desarrollado por el NOAA/NCEP, de la Universidad Técnica de Delft y NASA.



**Figura 2:** Distribución temporal de SDS obtenidas de las imágenes Landsat 8 (rombos rojos) y Sentinel 2 (puntos azules).



**Figura 3:** Delimitación línea interior de la playa

Para realizar simulaciones del oleaje que incide en las costas de Chile es necesario contar con un dominio espacial que abarque toda la cuenca del océano Pacífico (Fig. 5a). En esta configuración, el dominio tiene una resolución espacial de un grado. Para la creación de la batimetría, máscaras de obstrucción y grilla computacional se utilizó el algoritmo de generación de mallas GridGen (Chawla *et al.* 2013). La base de datos batimétrica utilizada para generar condiciones de borde de fondo es ETOPO2, la cual cuenta con una resolución espacial horizontal de ~4 km (Fig. 5b). Para generar condiciones de borde laterales, se utilizó la línea de costa de la base de datos GSHHS (A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database).



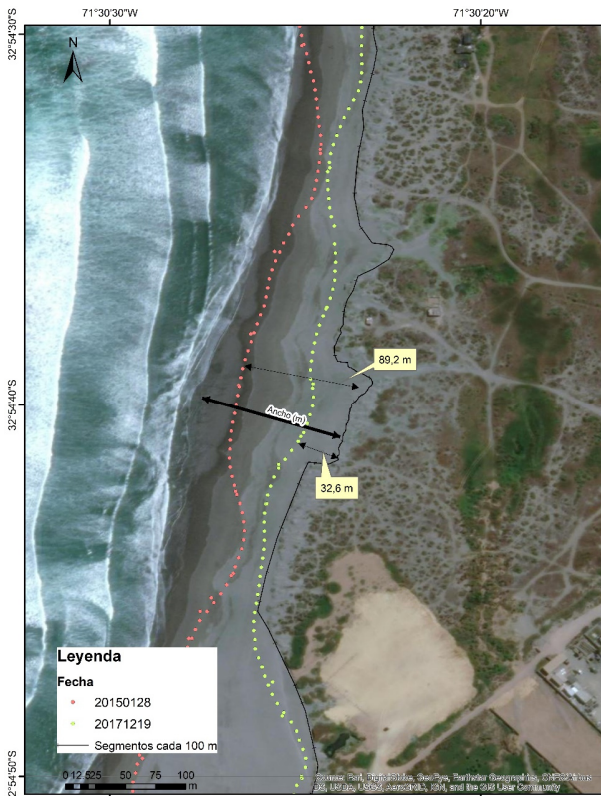


Figura 4: Diagrama de medición de ancho de la playa.

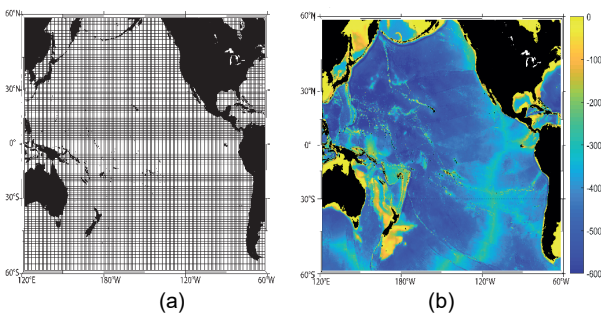


Figura 5: Modelación de oleaje: a) Malla de cálculo; b) batimetría (ETOPO2) utilizada.

Como condición de borde superficial, el modelo fue forzado por el viento del reanálisis ERA5 (Fig. 6), perteneciente al Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico (ECMWF, por sus siglas en inglés). Este reanálisis posee aumentos en la resolución de las capas verticales, aumentos en la resolución horizontal de 80 km a 31 km, y adicionalmente asimila más conjuntos de

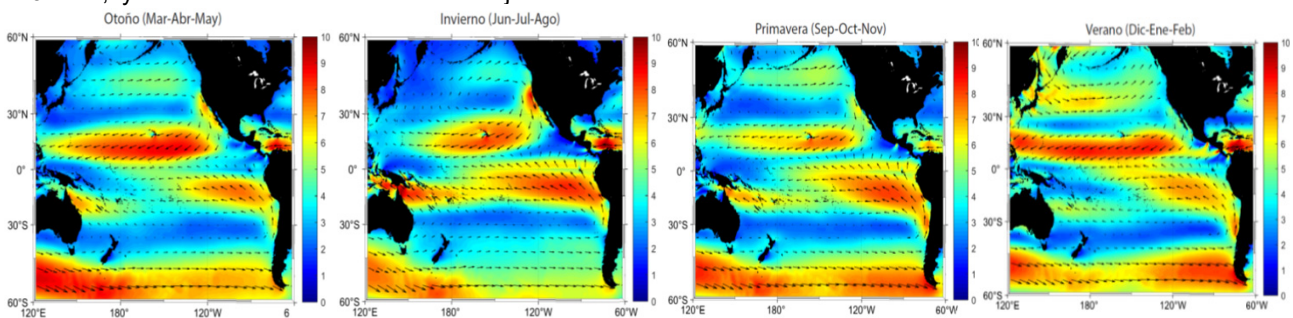


Figura 6: Climatología del viento a 10 m de altura sobre el Océano Pacífico del reanálisis ERA5 ( $\text{ms}^{-1}$ ). La velocidad del viento es mostrada en colores y su dirección en vectores. Datos cada 6 h han sido utilizados para forzar el modelo de oleaje Wavewatch III.

datos de observación que los reanálisis anteriores (Hersbach *et al.* 2020). Datos de la velocidad zonal y meridional del viento a 10 m sobre la superficie con una resolución temporal de 6 h fueron utilizados. Además, se incorpora la concentración de hielo marino del reanálisis ERA5, considerando un umbral de 30% de hielo para distinguir el punto de grilla como tierra. Si la concentración de hielo cae bajo el umbral, el punto de grilla es reactivado (Chawla *et al.* 2013).

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Extracción automática de la línea de costa

Se obtuvo 128 posiciones de la línea de costa entre los años 2015-2019, 46 con imágenes Landsat 8 OLI de 30 m de resolución y, 82 con imágenes Sentinel 2 de 20 m. Uno de los problemas de la utilización de imágenes ópticas en Chile está relacionado con la vaguada costera, que genera un complejo patrón de nubosidad sobre las costas. Por esta razón, se descartaron las SDS donde se produce confusión de la orilla con las sombras de edificios, acantilados rocosos y sombras de nubes. Esto se resolvió parcialmente aplicando para las imágenes Sentinel 2 el producto Scene Classification (SC) y las bandas en nivel Bottom of the Atmosphere (BOA). Para las imágenes Landsat se resolvió a través del índice espectral AWEINSH propuesto por (Feyisa *et al.* 2014).

El sistema SHOREX ha sido utilizado para la extracción de líneas de costas en entornos micromareales de baja energía en playas del Mediterráneo y entornos mesomareales del Atlántico (Cabezas-Rabadán *et al.* 2017, 2019). La información que se extrae con este sistema es la más estable en cuanto a resolución espacial, periodos de revisita y análisis de series temporales. Permitiendo la comparabilidad de los datos en series largas y con errores de precisión subpíxel.

### 4.2. Anchos de las playas

El ancho de la playa a menudo exhibe una variación intraanual que se ve afectada por sistemas de bajas presiones en latitudes medias de los hemisferios sur y norte, marejadas durante el invierno, anticiclón y tormentas tropicales (Beyá *et al.* 2016). Los procesos naturales como las mareas, la fijación de bancos, la migración de canales, así como la influencia antropogénica, pueden afectar directamente la morfología y, en consecuencia, el ancho de la playa (Wijnberg 2002).



En el área de estudio los anchos críticos con valores inferiores a 15 m se localizan en la zona proximal. En la Bahía de Concón con un promedio de 12,3 m y una desviación estándar de 10,5 m. En la desembocadura del río Aconcagua las variaciones de los anchos oscilan en promedio 73,6 m, desviación estándar de 32,9 m y ancho máximo de 157 m, este sector muestra fuerte dinámica sedimentaria (Martínez 2007). Las zonas central y distal de la bahía de Concón se mantuvieron estables.

En Reñaca por su ubicación y exposición muestra valores de anchos de playa variables, en algunos casos determinados por marejadas en agosto de 2015 que movilizaron grandes volúmenes de sedimentos en la zona distal de la playa provocando grandes cambios morfológicos (Agredano *et al.* 2019). Los eventos extremos de oleaje (denominados comúnmente marejadas) que se propagan desde el W y NW tienen el potencial de producir grandes impactos a lo largo del borde costero, particularmente en sectores de las bahías abiertas al NW (Campos-Caba 2016).

El valor promedio del ancho de playa en la zona proximal es de 23,6 m, el valor máximo 54,2 m, y una desviación estándar de 9,24 m. En la zona distal de la playa los valores promedio son 38,6 m, máximo 70,2 m y desviación estándar de 12 m.

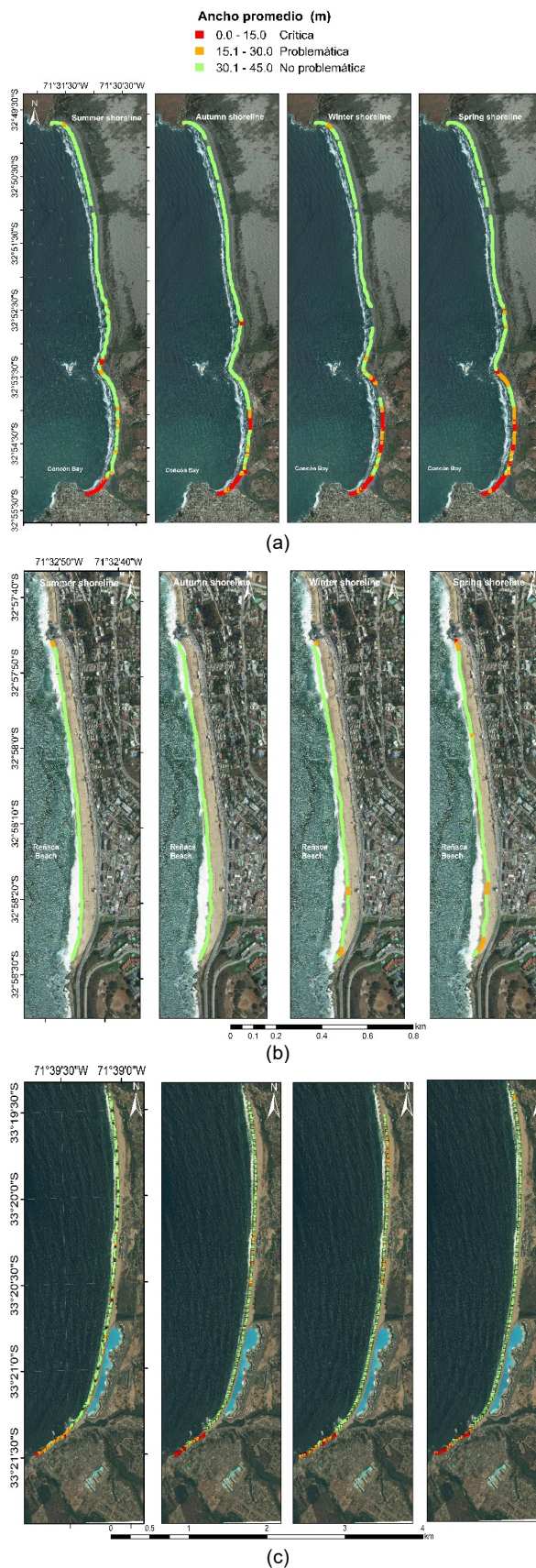
La bahía de Algarrobo en su zona proximal presenta valores promedios de 21,2 m, desviación de 9,95 m y valor máximo de 57 m. Las zonas centrales y distales se mantuvieron estables.

Dada la dirección dominante de los oleajes y la disposición geográfica de las tres playas parece evidente que existe un fuerte transporte longitudinal hacia el norte que genera que las partes proximales (meridionales) de las mismas sean las que puedan sufrir un déficit de sedimentos principalmente si disminuyen los aportes externos. Ello explicaría la menor anchura de las tres playas en dichos sectores (Fig 7).

Los ciclos estacionales de la playa generalmente se atribuyen a variaciones en el nivel de energía de las olas incidentes, lo que resulta en playas anchas y sin barreras en verano, junto a playas estrechas y con barras en invierno (Masselink and Pattiaratchi 2001). Las costas a lo largo de Valparaíso son muy variables tanto espacial como temporalmente. Atraviesan periodos de erosión episódica rápida, seguida de años intermedios, a décadas durante las cuales se reconstruyen las playas y las dunas. Los procesos naturales de recuperación de playas son los que se han visto alterados en los últimos años, debido al aumento de las marejadas en temporadas de primavera y verano.

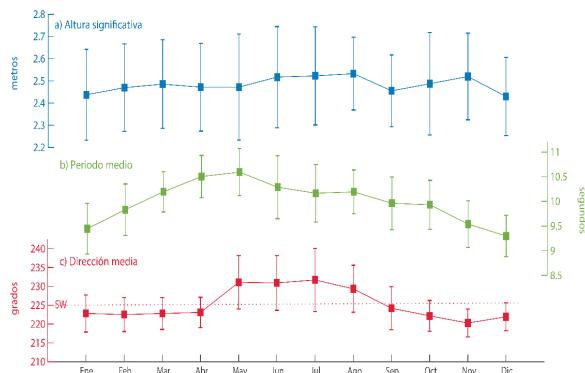
### 4.3. Oleaje

Las series de tiempo de los parámetros del oleaje muestran una importante variabilidad intraestacional e interanual. Esta última ha sido relacionada principalmente a la variabilidad climática que introduce El Niño, Oscilación del Sur y el Modo Anular Austral (e.g. Hemer *et al.* 2010; Stopa and Cheung 2014; Aguirre *et al.* 2020).



**Figura 7:** Variabilidad temporal del ancho de la línea de costa de izquierda a derecha verano, otoño, invierno y primavera: a) Bahía de Concón; b) Playa Reñaca; c) Bahía de Algarrobo. Color Rojo Playas críticas anchos < 15 m. Color Naranja Playas problemáticas anchos 15-30 m y color verde playas con anchos superiores a 30 m.

La región de Valparaíso, en particular, muestra una baja variabilidad estacional en los parámetros promedio de altura del oleaje (Fig 8). La altura significativa se encuentra en torno a los 2,5 m y presenta un cambio estacional promedio del orden de 10 cm (Fig. 8a). Algo similar ocurre con los períodos, los cuales se encuentran en el orden de 10 segundos, y tienen una variación estacional promedio del orden de 1 segundo (Fig. 8b) siendo ligeramente mayor en los meses invernales y primaverales. La climatología de la dirección del oleaje muestra la dominancia de las olas propagándose desde el SW (225°), la cual presenta una variación promedio de 10° (Fig. 8c).



**Figura 8:** Climatología de parámetros del oleaje frente a la costa de Valparaíso (33°S;73°W): a) altura significativa; b) período medio; c) dirección media, la línea segmentada indica el SW. Los datos de oleaje han sido aportados por el IHC de Cantabria y se basan en la modelización por reanálisis de Pérez *et al.* (2017).

Los parámetros de resumen del oleaje pueden esconder cambios que se producen en el estado del mar, ya que, por ejemplo, distintos espectros de energía de oleaje pueden conducir a un mismo resultado de altura significativa.

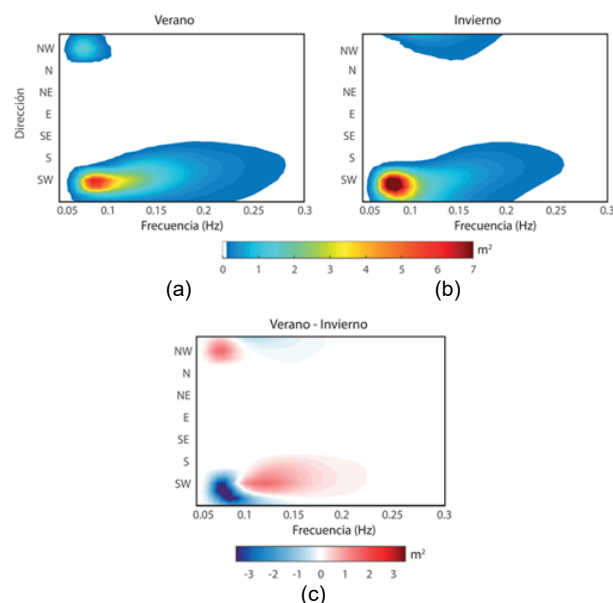
La energía dominante desde el SW presenta una disminución durante el verano, consistente con la disminución de la intensidad de los vientos sobre el Océano Austral y el desplazamiento de las trayectorias de tormentas hacia mayores latitudes. Sin embargo, durante el verano podemos ver un máximo de energía que tiene una dirección de propagación desde el NW y centrado en una frecuencia de 0.07 Hz. Este máximo de energía en el espectro está asociado al aumento de la intensidad de los ciclones extratropicales en el hemisferio norte (Fig 9).

Si bien los patrones climatológicos calculados muestran un dominio del oleaje en el modelado costero, los eventos puntuales también han sido ejes caracterizadores de los cambios más abruptos en las playas de estudio. Un caso que refleja este escenario es la marejada acontecida en la Bahía de Algarrobo el 15 octubre de 2020, donde las construcciones sobre humedales y dunas costaneras sufrieron importantes daños (Fig 10). Esto avala la condición de susceptibilidad de las estructuras en esta y otras playas del litoral central chileno.

## 5. Conclusiones

El sistema SHOREX permite realizar estudios multitemporales robustos y estables de las playas a diferentes escalas espacio-temporales. La nubosidad es

sin duda una limitación en la adquisición de imágenes ópticas. Sin embargo, en comparación con otras técnicas fotogramétricas, el trabajo con estas imágenes de satélite de resolución media sigue siendo el procedimiento más eficiente para la monitorización de los cambios en las costas y ambientes marino-costeros.



**Figura 9:** Espectros de energía del oleaje: a) Climatología de verano; climatología de invierno; c) diferencia entre verano e invierno.



**Figura 10:** Playa de San Alfonso del Mar (Algarrobo) antes y post evento de marejada: a) 05/03/2020; b) 08/10/2020; c) 08/10/2020; d) 30/10/2020

Los anchos medios por temporadas representan la situación general de las playas en el conjunto de datos analizados, sin embargo, hay eventos puntuales y extremos que no se ven reflejados en estos valores.

El ancho de las costas queda definido por patrones climatológicos dominados por el oleaje donde las corrientes longitudinales promueven la erosión en las zonas proximales de las costas.

Los resultados demuestran que las costas responden episódicamente a las ocurrencias de grandes tormentas que producen grandes olas coincidentes con altos niveles



de agua, y que consecuentemente tienen efectos directos en las infraestructuras, dunas, y humedales costeros.

La evolución morfológica costera es compleja porque los procesos hidromorfodinámicos varían en múltiples escalas espaciales, desde mecanismos de retroalimentación a microescala en el nivel de tamaño de grano del sedimento hasta períodos a escalas de tiempo geológicas. En el área de estudio, las condiciones del clima del oleaje son determinantes, pero también lo son las condiciones topográficas, orientación y exposición de las playas. Los procesos de oleaje pueden describir cambios en intervalos muy cortos de tiempo. Las acciones antropogénicas pueden estar acelerando procesos erosivos sin precedentes.

Las condiciones climáticas y cambios que está padeciendo por megasequías la región central de Chile,

son poco conocidos y su impacto en el equilibrio de los sedimentos costeros, aún no ha podido ser estudiada.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del FONDEF IDeA I+D 2019 – Desafío País Adaptación al Cambio Climático y Desastres Naturales. Código Proyecto ID19I10361. Agradecimiento a los practicantes de Escuela de Geología de la Universidad Mayor por su colaboración en la toma de datos en campo y procesamiento de datos sedimentarios. Álvaro Millamán, Maximiliano Parrao, Catalina Cerda, Nicolás Rodríguez, a las asistentes, Natalia Medina, Roxana Mansilla. Al IHC Cantabria que nos ha cedido datos de oleaje y marea de la zona.

## References

- AGREDANO, R., CIENFUEGOS, R., CATALÁN, P., MIGNOT, E., BONNETON, P., BONNETON, N., and MARTÍNEZ, C.. 2019. Morphological changes in a cusped sandy beach under persistent high-energy swells: Reñaca Beach (Chile). *Marine Geology*, **417**(June 2018), 105988. DOI: 10.1016/j.margeo.2019.105988
- AGUIRRE, C., BECERRA, D., GODOY, M., and SILVA, D., 2020. Interannual variability of ocean surface waves in the Southeast Pacific. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 11567).
- ALMONACID-CABALLER, J., SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PARDO-PASCUAL, J. E., BALAGUER-BESER, A.A., and PALOMAR-VÁZQUEZ, J., 2016. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, **372**, pp. 79–88. DOI: 10.1016/j.margeo.2015.12.015
- BEYÁ, J., ÁLVAREZ, M., GALLARDO, A., HIDALGO, H., AGUIRRE, C., VALDIVIA, J., and WINCKLER, P., 2016. *Atlas de oleaje de Chile*. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso.
- CAMPOS-CABA, R. V., 2016. *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Universidad de Valparaíso. Valparaíso.
- CABEZAS-RABADÁN, C., PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., and RODILLA, M., 2019. Detecting problematic beach widths for the recreational function along the Gulf of Valencia (Spain) from Landsat 8 subpixel shorelines. *Applied Geography*, **110**(July), 102047. DOI: 10.1016/j.apgeog.2019.102047
- CABEZAS-RABADÁN, C., ALMONACID-CABALLER, J., PARDO-PASCUAL, J. E., and SORIANO-GONZÁLEZ, J., 2017. Variabilidad de la línea de costa a partir de imágenes de satélite y su relación con la textura del sedimento. In *Primer Congreso en Ingeniería Geomática*. Libro de actas (pp. 153–161). Editorial Universitat Politècnica de València.
- CABEZAS-RABADÁN, C. and PARDO-PASCUAL, J. E., 2017. Monitorizando la anchura de las playas mediante imágenes Landsat 8 en costas micromareales mediterráneas. *Geotemas (Madrid)*, **17**, pp. 159–162.
- CHAWLA, A., SPINDLER, D. M., and TOLMAN, H. L., 2013. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, **70**, pp. 189–206. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.07.005
- FEYISA, G. L., MEILBY, H., FENSHOLT, R., and PROUD, S. R., 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, **140**, pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029
- GARREAU, R. D., BOISIER, J. P., RONDANELLI, R., MONTECINOS, A., SEPÚLVEDA, H. H., and VELOSO-AGUILA, D., 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, **40**(1), pp. 421–439. DOI: 10.1002/joc.6219
- GENS, R., 2010. Remote sensing of coastlines: Detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, **31**(7), pp. 1819–1836. DOI: 10.1080/01431160902926673
- HEMER, M. A., CHURCH, J. A., and HUNTER, J. R., 2010. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *International Journal of Climatology*, **30**(4), pp. 475–491. DOI: 10.1002/joc.1900
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., and SCHEPERS, D., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**(730), pp. 1999–2049.
- IGUALT JARA, F. E., BREUER, W. A., CONTRERAS-LÓPEZ, M., and MARTÍNEZ, C., 2019. Efectos del cambio climático en la zona urbana turística y costera de Viña del Mar: levantamiento de daños para una inundación por marejadas y percepción de seguridad. *Revista 180*, **44**. DOI: 10.32995/rev180.num-44.(2019).art-626



- KIM, H., LEE, S. B., and MIN, K. S., 2017. Shoreline change analysis using airborne LiDAR bathymetry for coastal monitoring. *Journal of Coastal Research*, **33**(Special Issue 79), pp. 269–273. DOI: 10.2112/SI79-055.1
- LIU, Y., WANG, X., LING, F., XU, S., and WANG, C., 2017. Analysis of coastline extraction from Landsat-8 OLI imagery. *Water (Switzerland)*, **9**(11), pp. 1–26. DOI: 10.3390/w9110816
- MARTÍNEZ, C., 2007. Shoreline changes in Concón and Algarrobo bays, central Chile, using an adjustment model. *Investigaciones Marinas*, **35**(2), pp. 99–112. DOI: 10.4067/s0717-71782007000200010
- MARTÍNEZ, C., 2011. Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en bahías chilenas: orientaciones al manejo costero. *Revista Geográfica de América Central*, **2**(47E).
- MARTÍNEZ, C., ARENAS, F., BERGAMINI, K., and URREA, J., 2019. *Hacia una ley de costas en Chile : criterios y desafíos en un contexto de cambio climático*. (CIGIDEN, Ed.), Serie policy papers cigiden (1st ed.). Santiago, Chile.
- MARTÍNEZ, C., CONTRERAS-LÓPEZ, M., WINCKLER, P., HIDALGO, H., GODOY, E., and AGREDANO, R., 2018. Coastal erosion in central Chile: A new hazard? *Ocean and Coastal Management*, **156**, pp. 141–155. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011
- MARTÍNEZ, C., ROJAS, C., ROJAS, O., QUEZADA, J., LÓPEZ, P., and RUÍZ, V., 2016. Crecimiento urbano sobre geoformas costeras de la llanura de San Pedro, area metropolitana de Concepcion. *En Las Costas Del Neoliberalismo*, pp. 287–312.
- MAS, J. F., 2004. Mapping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **59**(2), pp. 219–230. DOI: 10.1016/j.ecss.2003.08.011
- MASOTTI, I., APARICIO-RIZZO, P., YEVENES, M. A., GARREAUD, R., BELMAR, L., and FARÍAS, L., 2018. The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the Central Chile Coast (33°-37°S): Seasonal cycle and interannual variability. *Frontiers in Marine Science*, **5**(NOV), pp. 1–12. DOI: 10.3389/fmars.2018.00423
- MASSELINK, G., and PATTIARATCHI, C. B., 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Marine Geology*, **172**(3–4), pp. 243–263. DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00128-6
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, 2019. *Amenazas en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”* (Vol. 1). Santiago, Chile.
- NICHOLLS, R. J., 1995. Coastal megacities and climate change. *GeoJournal*, **37**(3), pp. 369–379. DOI: 10.1007/BF00814018
- PALOMAR-VÁZQUEZ, J., ALMONACID-CABALLER, J., PARDO-PASCUAL, J. E., and SANCHEZ-GARCÍA, E., 2018. SHOREX: a new tool for automatic and massive extraction of shorelines from Landsat and Sentinel 2 imagery. In *7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science* (Coastlab). Santander.
- PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., RUIZ, L. A., and PALOMAR-VÁZQUEZ, J., 2012. Remote Sensing of Environment Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM + multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, **123**, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.024
- PARDO-PASCUAL, J. E., SÁNCHEZ-GARCÍA, E., ALMONACID-CABALLER, J., PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M., DE LOS SANTOS, E. P., FERNÁNDEZ-SARRÍA, A., and BALAGUER-BESER, Á., 2018. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from landsat 7, landsat 8 and sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, **10**(2), pp. 1–20. DOI: 10.3390/rs10020326
- PÉREZ, J., MENENDEZ, M., and LOSADA, I. J., 2017. GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, **124**(January), pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.03.005
- RANGEL-BUITRAGO, N., CONTRERAS-LÓPEZ, M., MARTÍNEZ, C., and WILLIAMS, A., 2018. Can coastal scenery be managed? The Valparaíso region, Chile as a case study. *Ocean and Coastal Management*, **163**(April), pp. 383–400. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.07.016
- SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M., PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., CABEZAS-RABADÁN, C., and GÓMEZ-PUJOL, L., 2020. An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery. *Coastal Engineering*, **160**, 103732. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103732
- SÁNCHEZ-GARCÍA, ELENA, BALAGUER-BESER, Á., ALMONACID-CABALLER, J., and PARDO-PASCUAL, J. E., 2019. A new adaptive image interpolation method to define the shoreline at sub-pixel level. *Remote Sensing*, **11**(16). DOI: 10.3390/rs11161880
- SCOTT, J. W., MOORE, L. R., and HARRIS, W. M., 2003. Using the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Tasseled Cap Transformation to Extract Shoreline. US Geological Survey Open-File Report, (March).
- SEKOVSKI, I., STECCHI, F., MANCINI, F., and DEL RIO, L., 2014. Image classification methods applied to shoreline extraction on very high-resolution multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **35**(10), pp. 3556–3578. DOI: 10.1080/01431161.2014.907939

- STOPA, J. E., and CHEUNG, K.FAI., 2014. Periodicity and patterns of ocean wind and wave climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**, pp. 3868–3882. DOI: 10.1002/2013JC009729. Received
- SUNDER, S., RAMSANKARAN, R., and RAMAKRISHNAN, B., 2017. Inter-comparison of remote sensing sensing-based shoreline mapping techniques at different coastal stretches of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, **189**(6), 290.
- VOS, K., HARLEY, M. D., SPLINTER, K. D., SIMMONS, J. A., and TURNER, I. L., 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, **150**(April), pp. 160–174. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.04.004
- WIJNBERG, K. M., 2002. Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Holland coast. *Marine Geology*, **189**(3–4), pp. 227–247. DOI: 10.1016/S0025-3227(02)00480-2
- WINCKLER, P., CONTRERAS-LÓPEZ, M., CAMPOS-CABA, R., BEYÁ, J. F., and MOLINA, M., 2017. El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*, **45**(4), pp. 622–648.
- ZANUTTA, A., LAMBERTINI, A., and VITTUARI, L., 2020. UAV photogrammetry and ground surveys as a mapping tool for quickly monitoring shoreline and beach changes. *Journal of Marine Science and Engineering*, **8**(1). DOI: 10.3390/JMSE8010052