

CASO PRÁCTICO

Cobertura LiDAR-Fotogramétrica, batimetría y levantamiento de infraestructuras como soporte al análisis de riesgos de inundación en la subcuenca del río Genil

J.J. Vales-Bravo^{1*}, E.M. Méndez-Caballero¹, R. Prieto-Molina¹, L. Granado-Ruíz¹, I. Pino-Serrato¹, E. Sañudo-Costoya², G. García-Alén Lores², A.M. Pello-Rodríguez¹, A. Zabala-Ordóñez³, E. Ortega-Díaz³

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua. Junta de Andalucía. Calle Johan G. Gutenberg, 1. 41092. Isla de la Cartuja. Sevilla. España.

² Universidade da Coruña, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, ETSICCP, Elviña, 15071 A Coruña. España.

³ Secretaría General de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul. Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul. Junta de Andalucía. Casa Sundheim. Avda. Manuel Siurot, 50. 41071 Sevilla. España.

Resumen: Las inundaciones son los desastres naturales que afectan a más personas en el Área Atlántica. En este sentido, el proyecto AA-Floods tiene el objetivo de desarrollar y poner en valor nuevas herramientas, planes y regulaciones que mejoren la gestión y la respuesta a las inundaciones. La importancia de la información altimétrica de calidad para la evaluación del peligro de inundación se basa en el conocimiento lo más detallado y preciso posible del relieve y de las alturas de los elementos situados sobre el suelo. Para ello se ha llevado a cabo una cobertura LiDAR de densidad 21 ptos/m² y fotogramétrica de resolución 0,10 m para la generación de productos altimétricos de gran exactitud posicional y alta precisión en los ámbitos de estudio de la cuenca del río Genil. Así mismo, se ha realizado el levantamiento batimétrico del cauce del río Genil y la obtención de Modelo final Topobatimétrico. Además, para el desarrollo adecuado de la modelización hidráulica y determinación de zonas inundables es necesario tomar en consideración todos aquellos elementos estructurales del cauce que afectan a la inundabilidad. Se ha realizado análisis de zonas inundables con estas fuentes de información que mejoran las utilizadas por el SNCZI. Los resultados se han contrastado con las láminas de inundación de 2010 cartografiadas mediante observación directa mediante satélite Radar.

Palabras clave: LiDAR, fotogrametría, dron, GNSS, batimetría, modelización hidráulica.

LiDAR-photogrammetry coverage, bathymetry and infrastructures survey to support flood risk analysis in the Genil River sub-basin

Abstract: Floods are the natural disasters that affect the most people in the Atlantic Area. In this sense, the AA-Floods project is developed with the objective of developing and highlighting new tools, plans and regulations that improve the management and response to floods. The importance of quality altimetric information for the assessment of flood danger is based on the most detailed and precise knowledge possible of the relief and the heights of the elements located above the ground. For it, LiDAR coverage with a density of 21 points/m² and photogrammetric coverage with a resolution of 0.10 m has been carried out for the generation of altimetric products with great

To cite this article: Vales-Bravo, J.J., Méndez-Caballero, E.M., Prieto-Molina, R., Granado-Ruíz, L., Pino-Serrato, I., Sañudo-Costoya, E., García-Alén Lores, G., Pello-Rodríguez, A.M., Zabala-Ordóñez, A., Ortega-Díaz, E. 2024. LiDAR-photogrammetry coverage, bathymetry and infrastructures survey to support flood risk analysis in the Genil River sub-basin. *Revista de Teledetección*, 63, 79-97. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20481>

* Corresponding author: juanj.vales@juntadeandalucia.es

positional accuracy and high precision in the study areas of the Genil River basin. Likewise, the bathymetric survey of the Genil River bed has been carried out and the final Topobathymetric Model has been obtained. Furthermore, for the adequate development of hydraulic modeling and determination of flood zones, it is necessary to take into consideration all those structural elements close to the channel that affect flood risk. Analysis of flood zones has been carried out with these sources of information that improve those used by the SNCZI. The results have been contrasted with the 2010 flood sheets mapped by direct observation using Radar satellite.

Key words: LiDAR, photogrammetry, drone, GNSS, bathymetry, hydraulic modeling.

1. Introducción

Las inundaciones son los desastres naturales que afectan a más personas en el Área Atlántica. Por tanto, resulta imprescindible el desarrollo de sistemas, y la obtención de la información más adecuada que permita el seguimiento y la evaluación de estos fenómenos para la toma de medidas de mitigación de daños frente a las mismas. La Comisión Europea aprobó en noviembre de 2007 la Directiva 2007/60, sobre la evaluación y gestión de las inundaciones, transpuesta a la legislación española mediante Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación. Esta se centra en las zonas con mayor riesgo de inundación, denominadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs).

La información cartográfica generada está sometida a un proceso de revisión y actualización recurrente. Durante el periodo 2011-2015 se desarrolló el 1^{er} ciclo de la aplicación de esta Directiva 2007/60/CE, que motivó la aprobación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) en el año 2016. De acuerdo con el apartado 1 del artículo 21 del Real Decreto 903/2010, la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) tendrán una cadencia de actualización de seis años, y de igual forma los mapas de peligrosidad por inundación y de riesgo de inundación se revisarán y actualizarán cada seis años haciendo uso de la información altimétrica más adecuada al efecto. Esta información se provee principalmente desde PNOA LiDAR.

El proyecto AA-Floods (EAPA 45/2018 AA-FLOODS) se inició en 2018 y se ha desarrollado en paralelo al 2^o ciclo de la Directiva 2007/60 incluyendo no solo las ARPSIs sino también otras áreas de interés para las comunidades locales.

La entonces Consejería de Agricultura, Pesca, y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía, ha participado como socio en este proyecto en calidad de autoridad en la gestión de las cuencas hidrográficas intracomunitarias, responsable del dominio público hidráulico, prevención de inundaciones en cauces urbanos (Decreto de 189/2002 de 2 Julio), ordenación e integración de terrenos inundables y zonas de servidumbre, y policía en el planeamiento territorial y urbanístico (Ley 7/2007 de 9 Julio). En el proyecto se ha continuado trabajando desde la actual Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul (CSMAyEA), responsable de la Red de Información Ambiental, REDIAM (Decreto 347/2011, de 22 de noviembre), como entidad de referencia de la Información Ambiental (IA) de Andalucía.

La guía para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) presenta metodologías a seguir para generar la cartografía de dominio público hidráulico y las zonas inundables así como los mapas de peligrosidad de inundación.

En este contexto, la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) se presenta como la solución más adecuada para conocer las elevaciones del terreno y de los objetos sobre éste, al nivel de exactitud posicional y precisión que exige el análisis de las inundaciones. La CSMAyEA está implicada en el desarrollo de coberturas PNOA LiDAR sobre Andalucía en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Con el 1 objeto es mejorar los resultados de las aplicaciones entre las que se encuentran las hidráulicas, la CSMAyEA está desarrollando la depuración de clasificación de la 2^a cobertura en el ámbito regional y generando modelos digitales de elevaciones con metodologías basadas principalmente en triangulación a partir de nubes de puntos (Montealegre et al., 2015).

En relación a la obtención de batimetrías, las características del río Genil restringen mucho la navegabilidad de medios para la toma de datos, por lo que se ha optado por un dron náutico con capacidades de medición batimétrica mediante ecosonda. Existen diferentes casos de éxito que han validado el uso de esta tecnología (Erena *et al.*, 2019). Por otro lado, se han utilizado otras técnicas y herramientas geomáticas para el cartografiado de estructuras e infraestructuras hidráulicas sobre los ríos (topografía clásica, GNSS, lasergrametría (LST) y fotogrametría con dron).

En relación a los episodios históricos de inundación en la Cuenca del Guadalquivir, para la EPRI correspondiente al 2º Ciclo se pueden consultar los mismos en base a la actualización del 2011 del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH), que contiene un total de 14 episodios desde el año 2007 hasta el 2011. Entre los episodios más importantes se encuentran los de 2010, en donde se produjeron importantes casos de inundación en muchos ámbitos de las Cuencas del Guadalquivir y Guadalete. Desde la REDIAM se llevaron a cabo trabajos de cartografiado a partir de tecnología Radar a bordo de satélite (Vales *et al.*, 2010 y Vales *et al.*, 2011), que constituye una valiosísima información verdad terreno. Uno de los cinco ámbitos estudiados cubre parte del ámbito de trabajo de AA-Floods y se utilizará para analizar los resultados de las modelizaciones hidráulicas resultantes.

1.1. Objeto del trabajo

El objeto del trabajo es la mejora de la información altimétrica (y complementaria) necesaria para la definición de las zonas de alto interés frente al riesgo de inundación con objeto de mejorar la definición de zonas inundables disponibles en el SNCZI, proponiéndola como modelo de aplicación a otros casos similares.

Tomando en consideración la Guía Metodológica para el desarrollo del SNCZI se pretende llegar más lejos respecto a las recomendaciones sobre la información base a utilizar, principalmente en los modelos digitales para la modelización hidráulica y otra información de interés mediante los siguientes objetivos:

1. Representación de la superficie emergida a partir de una cobertura LiDAR y fotogramétrica tanto

del cauce del Genil como de núcleos urbanos a estudiar, incrementando la densidad de nubes de puntos, mejorando la asignación de clases realizada a esos puntos (procesos de mejora de la clasificación), y adecuando fechas óptimas para penetración de la vegetación debido a la caída de la hoja en algunas especies forestales. Se incluye la obtención de una ortofoto de gran detalle a partir de imágenes simultáneas a la adquisición LiDAR. Según la Guía, la información generada en PNOA tanto en lo que respecta a LiDAR como ortofotos es suficiente para estos estudios. Los análisis de las ARPSIs del 1º y 2º ciclo incluidas en las áreas de interés de este trabajo se han basado en información histórica PNOA LiDAR de 2014-15 y los MDT derivados a 2x2 m (Tabla 1). Partiendo de las prescripciones nominales PNOA (Tabla 2), con carácter demostrativo se pretende plantear mejores prescripciones como recomendación a la obtención de esta información base.

2. Incorporación de información batimétrica del río Genil en los tramos analizados. Según la Guía, las batimetrías pueden ser necesarias, pero en este trabajo se han considerado como imprescindibles en los ámbitos de interés.
3. Definición rigurosa y precisa de estructuras e infraestructuras sobre el río Genil tanto para la corrección del MDT como para su incorporación en la modelización hidráulica.

1.2. Área de interés

El área de interés del proyecto AA-Floods (en ámbito piloto en España) está ubicada principalmente en la Cuenca Bajo Genil (Figura 1), cubriendo parte del cauce del río Genil en cuatro zonas:

- Zona 1: río Genil al paso por Isla Redonda, para modelización hidráulica fluvial.
- Zona 2: Entronque río Genil-Río Blanco, para objetivos de AA-Floods, relacionados con soluciones de mitigación basadas en la naturaleza, no mencionados en esta comunicación.
- Zona 3: río Genil al paso por Écija, para modelización hidráulica fluvial+pluvial. En este artículo solo se aportan resultados de modelización fluvial.

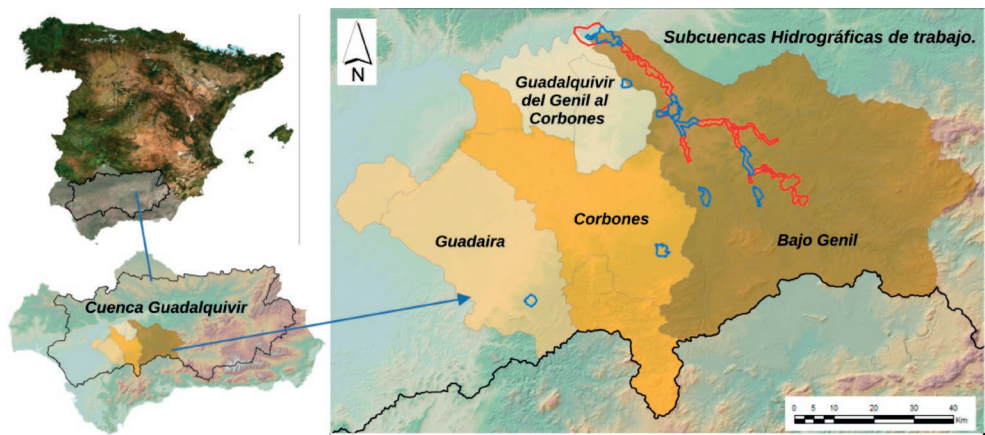


Figura 1. Localización geográfica de Cuencas Hidrográficas del Guadalquivir y Subcuencas en las que se ubica el ámbito piloto de España.

- Zona 4: Río Genil al paso por Palma del Río, para modelización hidráulica fluvial.

Por otro lado, para los objetivos 1 y 2 se han seleccionado núcleos urbanos de cuencas cercanas, para analizar inundaciones pluviales (de las que solo se mencionarán en este artículo los productos cartográficos pero no resultados de los análisis hidráulicos): Morón de la Frontera, Osuna y Cañada Rosal, El Rubio y Herrera (Figura 2).

Para la definición de las zonas de interés de AA-Floods se tomaron en consideración ámbitos sensibles desde el punto de vista del análisis histórico de inundaciones recogidos en el SNCZI que se agrupan en ARPSIs, pero también ámbitos de interés actual para los usuarios y comunidades locales, especialmente en lo que respecta a inundaciones en núcleos urbanos debido a escorrentías superficiales. Respecto a las ARPSIs de origen pluvial, en el ámbito de trabajo de AA-Floods no se

Tabla 1. ARPSIs ubicadas en el ámbito de interés del proyecto AA-Floods.

ARPSIs	Subtramo	Nombre	Cuenca	Subcuenca	Municipio	Provincia	Ciclo	Cartografía
ES050_APSFR_BG004	ES050_APSFR_BG004-01	Río Guadalquivir entre Peñaflores y Alcalá del Río	Bajo Guadalquivir	Guadalquivir del Genil al Guadaira	Peñaflores	Sevilla	C1	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)
ES050_APSFR_MG001	ES050_APSFR_MG001-01 ES050_APSFR_MG001-02	Palma del Río	Curso Medio Guadalquivir	Guadalquivir	Palma del Río / Peñaflores	Córdoba	C1	MDT 2x2 LIDAR
ES050_APSFR_MG044	ES050_APSFR_MG044-01	Genil en Écija	Curso Medio Guadalquivir	Bajo Genil	Écija	Sevilla	C1	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)
ES050_APSFR_MG056	ES050_APSFR_MG056-01	Écija	Curso Medio Guadalquivir	Bajo Genil	Écija	Sevilla	C1	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)
ES050_APSFR_MG029	ES050_APSFR_MG029-01	Río Genil en Puente Genil	Curso Medio Guadalquivir	Bajo Genil	Puente Genil	Córdoba	C1	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)
ES050_APSFR_MG029	ES050_APSFR_MG029-02	Río Genil aguas arriba de Puente Genil	Curso Medio Guadalquivir	Bajo Genil	Puente Genil	Córdoba	C2	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)
ES050_APSFR_BG024	ES050_APSFR_BG024-01	Morón de la Frontera	Bajo Guadalquivir	Guadaira	Morón de la Frontera	Sevilla	C1	MDT 2x2 LIDAR PNOA (2014)

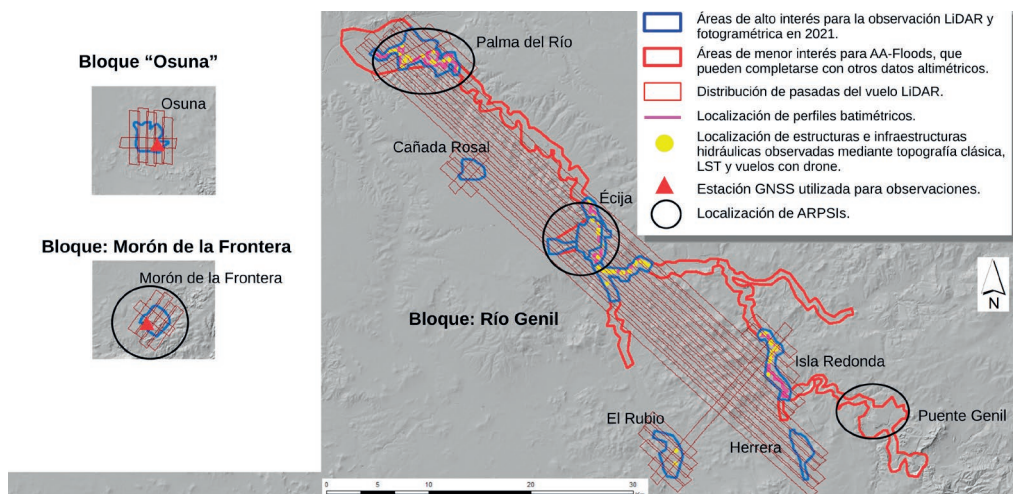


Figura 2. Mapa de distribución de pasadas LiDAR y fotogramétricas ejecutadas para cubrir ámbitos de interés. (Representación de Bloques a la misma escala).

han localizado registros de ninguna en el SNCZI ni en el CNIH.

Las zonas de interés para este trabajo cubren cuatro de las ARPSIs presentes en la cuenca del Genil, identificadas en el análisis del 1^{er} ciclo o en la revisión del 2^o ciclo de la Directiva 2007/60/CE. También cubre una ARPSI fluvial en la Cuenca del Guadaira que afecta al núcleo urbano de Morón de la Frontera (Tabla 1).

2. Material y métodos

2.1. Cartografía base de la superficie terrestre: Elevaciones

En la Cuenca del Guadalquivir, en el análisis de Zonas Inundables del SNCZI (EPRI 2^o ciclo) para cartografiar las ARPSIs (Tabla 1) se utilizó un MDT basado en la información de la 1^a cobertura PNOA LiDAR (2014-15) a 0,5 pto/m² y las ortofotos más cercanas en el tiempo (Tabla 2). En zonas con abundante vegetación, los retornos del pulso LiDAR resultaron insuficientes para definir el cauce con la densidad y calidad adecuada, por lo que se complementó la información con perfiles transversales realizados in situ por topografía clásica. También se levantaron las obras de fábrica (EPRI 2^o ciclo). Estas deficiencias se han intentado solventar en la 2^a cobertura PNOA LiDAR de Andalucía desarrollada entre 2020-21 para futuros trabajos del SNZCI. Para ello, se ha obtenido

una densidad de 1,5 pto/m² obteniéndose una mayor definición de elementos del terreno y de la superficie. Sin embargo, hay zonas en las que esta densidad de puntos sigue siendo insuficiente para la mejor definición de las zonas críticas. Sin embargo, en AA-Floods como proyecto demostrativo se ha planteado una mejora sustancial en la densidad nominal (preliminarmente 17 pto/m²) y una mejor calidad posicional de los productos obtenidos respecto a la calidad definida para la 1^a y 2^a coberturas PNOA (Tabla 2). También se ha planteado la adquisición en fechas óptimas para conseguir una mayor penetración de los pulsos en la vegetación de hoja caduca.

2.1.1. Medios empleados

Para el desarrollo de la cobertura LiDAR y fotogramétrica se ha utilizado una aeronave Cessna 340A portando sensores LiDAR FMS modelo ATLM Galaxy 2000, con el sensor auxiliar fotogramétrico ® Phase One iXM-RS150F, y los sistemas GNSS Trimble BD982 y e IMU-57. El software de procesado: Optech® AMM v5.4.4 para planificación del vuelo; Optech® FMS Nav para controlar y monitorear el sistema, y el plan de vuelo durante la misión; POSPac MMS v8.7 para el cálculo de la trayectoria GNSS/INS; Optech® LMS v4.4.0 para el procesamiento y ajuste datos LiDAR; Phase One iX Capture v3.4 y Capture One v12 para el procesado de las imágenes; Inpho Applications Master v10 para generación de

Tabla 2. Características de coberturas LiDAR y análisis de zonas inundables.

Cuenca Guadalquivir		Unidades	PNOA LiDAR 1ª Cobertura	PNOA LiDAR 2ª Cobertura	ARPSI 1er Ciclo	ARPSI 2º Ciclo	AA-Floods Reales	PNOA LiDAR 3ª Cobertura		
LiDAR	Basado en				PNOA 1ª Cobertura	PNOA 1ª Cobertura	Vuelo expreso			
	Fecha Referencia	Año	2014-15	2020-21	2014-15	2014-15	2021	2024		
	Prescripciones técnicas	Versión	PNOA LiDAR 23/07/2013	PNOA LiDAR 17/10/2018			PNOA LiDAR 18/10/2017	PNOA LiDAR 14/07/2022		
	Densidad de nubes de puntos	ptos/m ²	0,5	1,5	0,5	0,5	17	5		
	Exactitud general altimétrica: RMSE	m	≤ 0,20	≤ 0,15			≤ 0,05	≤ 0,10		
	Exactitud general altimétrica: Error máximo	m	≤ 0,40 en 95% de los casos	≤ 0,30 en 95% de los casos			≤ 0,10	≤ 0,20 en 95% de los casos		
	No podrá haber ningún pto con error superior a	m	0,60	0,60			0,20	0,40		
	Discrepancia altimétrica entre pasadas del vuelo	m	≤ 0,40	≤ 0,30			≤ 0,10 en 87% de los casos	≤ 0,10		
MDE	Basado en			PNOA Postproceso 15/03/2017			PNOA Postproceso 15/03/2017	PNOA Postproceso 15/03/2017		
	Clasificación de nubes de puntos LAS		Automática	Automática + Edición			Automática + Edición	Automática + Edición		
	Resolución	m	5x5 (IGN) y 2x2 (RE-DIAM)	2x2 (IGN) y 1x1 (RE-DIAM)	2x2	2x2	1x1 e inferiores	2x2, 1x1, 0,5x0,5		
	Productos principales desarrollados		MDT y MDS	MDT y MDS	MDT - edificios - puentes		Líneas ruptura, MDT, MDS, MDv, MDedif, MDpuentes,...	MDT, MDS, Mapa Clases, MDHN, Mapa LiDAR, Mapas de diferencias,...		
Ortofoto	Basado en				PNOA Imagen 2013	PNOA LiDAR 2014-15	PNOA LiDAR 2014-15	PNOA Imagen 2016	Vuelo expreso 2021	
	Fecha Referencia				2013	2014-15	2014-15	2016	2021	
	Resolución Orto	m	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25 (Costa) y 0,50	0,10	0,25
Batimetría	Equidistancia perfiles batimétricos	m			No se ha localizado documentación al respecto			10 - 15		
	Elementos transversales al flujo				Puentes, azudes,...			Puentes, azudes, azudes de rocas,...		

Ortofoto; TerraScan © y Global Mapper © para tratamiento de LiDAR. Respecto a los trabajos topográficos de campo, se han utilizado: Antena GNSS Leica RX 1250 X (constelación NAVSTAR y frecuencias L1, L2, L2C, L5 y GLONASS L1, L2); Antena GNSS Leica AX1202GG y receptor GX1200 (NAVSTAR y GLONASS L1 y L2) y el software Leica Geoffice®.

2.1.2. Planificación del vuelo LiDAR y fotogramétrico

Aprovechando las capacidades de los medios a emplear que aportaban un potencial incremento en la densidad de puntos respecto a PNOA se realizó la

configuración del plan de vuelo con los parámetros presentados en Tabla 3.

2.1.3. Ejecución del vuelo y procesamiento

El vuelo se realizó entre el 13 y el 15 de febrero de 2021, según cronograma del trabajo y con objeto de aprovechar máxima penetración de los pulsos LiDAR sobre la vegetación especialmente de hoja caduca para una mejor definición del terreno. En esta época el caudal del Genil suele ser el más bajo por lo que es el momento más adecuado en el que hay mayor superficie emergida que pueda ser registrada por la tecnología LiDAR. En Figura 2, distribución de pasadas de vuelo ejecutado.

Tabla 3. Configuración del vuelo.

Parámetros de planificación	Valores
Frecuencia (EMR)	2000 kHz
Ratio de escaneo	200 hz (scanlines/sec)
Densidad mínima	> 17 pts/m ²
GSD. Resolución de las imágenes capturadas	≤ 10 cm
Altitud sobre el terreno	El proyecto ha sido configurado de modo que la separación máxima entre el avión y el terreno sea de 1370 metros, considerando que esta distancia irá disminuyendo si la altitud de terreno va aumentando a lo largo de la pasada
FOV, Field Of View. Campo de visión	FOV fijo = 50°. El sistema de compensación de FOV corrige posibles variaciones un máximo de 60°
Recubrimiento longitudinal	60% mínimo en vuelo fotográfico
Velocidad de la aeronave	160 knots (296 Km/h)

Con el software Optech LiDAR Mapping Suite (LMS) se ha realizado la calibración y el procesamiento de los datos LiDAR para fusionar con las trayectorias dGNSS/INS calculadas, y la transformación al sistema ETRS89. Posteriormente, se han realizado los ajustes geométricos por bloques independientes (haciendo uso de apoyo topográfico). La Tabla 4 contiene los resultados del ajuste geométrico global de las nubes de puntos obtenidas (para los tres bloques de vuelo considerados conjuntamente) respecto a los 18 campos de control utilizados. Las nubes de puntos son finalmente exportadas a formato LAS. La cobertura se ha sometido a un riguroso control de calidad en el que destacan el test de densidad de puntos (densidad final 21 pto/m²) y el de ajuste altimétrico entre pasadas para obtener calidad posicional definida en Tabla 2.

Tabla 4. Informe de resultados del ajuste geométrico (para los 3 bloques del vuelo LiDAR) del vuelo 2021 respecto a los campos de control utilizados.

Informe de resultados		
Diferencia Mínima	m	-0,123
Diferencia Máxima	m	0,107
Diferencia Media	m	0,022
RMSEz (Raíz del Error Cuadrático Medio)	m	0,030
Desviación Estándar z (SDz)	m	0,030

2.1.4. Apoyo Topográfico de campo

La finalidad de estos trabajos es el control altimétrico que sirva de apoyo al ajuste geométrico de los bloques de pasadas transversales y longitudinales del vuelo LiDAR mediante los “campos de

control” y al ajuste de las pasadas fotogramétricas mediante los “puntos de apoyo”. Ambos se han obtenido mediante observaciones GNSS (Febrero 2021) haciendo uso de la RAP y postprocesando con software Geo-Office de Leica® v8.4.

Se han observado 18 campos de control para los 3 bloques de vuelo LiDAR fotogramétrico mencionados (Figura 2). Además, se han observado 8 campos adicionales por otro equipo de trabajo independiente, para el control de calidad altimétrico (comprobación) de las nubes de puntos resultantes. Respecto a los puntos de apoyo se han observado 2 puntos por cada campo de control, excepto en el campo 18, con 5 puntos. El total fue de 39 puntos.

2.1.5. Generación de ortofoto

Las fases para la obtención de este producto de alto detalle han sido:

- Procesado de imágenes fotogramétricas brutas (*Ground Sample Distance* (GSD)=0,10m) y ajuste radiométrico con software Capture One. El ajuste geométrico y la unión de los canales (composición RGBNir) se ha realizado con software Phase One iX Capture. La ortofoto ha sido generada con diferentes módulos del software Inpho Applications Master v10, contemplando los procesos de:
 - Aerotriangulación a partir de las imágenes digitales y de los datos GNSS/INS del cálculo de las trayectorias del vuelo;
 - Ortorectificación de las 4 bandas (GSD=0,10 m) mediante método de convolución cúbica y

uso de MDT de 2 m a partir de PNOA LiDAR 2014-15 (módulo Inpho OrthoMaster v10).

- Mosaico. Garantizando la continuidad cromática en todas las zonas de trabajo preservando el color natural sin dominantes. Se han eliminado de la imagen los efectos producidos “hot spot” y “vignetting”. Se ha utilizado el área central de las imágenes haciendo uso de línea de mosaico automática con el software Inpho OrthoVista v10.

2.1.6. Edición de nubes de puntos y generación de productos derivados

Las nubes de puntos LiDAR han sido clasificadas automáticamente (Software TerraScan © 2020 Terrasolid) y editadas de forma rigurosa para la obtención de una correcta representación del terreno y de los elementos presentes sobre él (superficie). Para la edición se ha utilizado el software Global Mapper® v19, Blue Marble Geographics®. La edición de puntos se ha realizado haciendo uso de Ortofotografía coetánea e información auxiliar para localizar construcciones y masas de agua, y extraer líneas de ruptura para el cauce del río Genil y pequeños afluentes, infraestructuras fluviales, los puentes, los taludes, terraplenes, motas, etc., presentes en las zonas con riesgo de inundación. Algunos productos derivados de la nube de puntos se han obtenido a resolución 1 m (se presentan en Figura 5).

2.2. Definición geométrica de infraestructuras sobre el río Genil y batimetría

En cuanto a los elementos transversales al flujo (cauce) en las cuatro zonas de interés (ejes de río) junto con la zona adicional de El Rubio, se han identificado un total de 26 infraestructuras y/o elementos estructurales (Tabla 5). Esta tarea también ha contemplado la obtención de la información batimétrica del fondo del río Genil con cuatro tipos de condiciones: perfiles batimétricos a una equidistancia preestablecida, perfiles batimétricos antes y después de infraestructuras y elementos estructurales, y perfiles batimétricos en zonas de lecho del río poco profundo y/o rocoso que constituyen azudes. Éstas últimas zonas también han sido consideradas como elementos estructurales transversales al flujo. En total se han identificado 46 (Tabla 6). Su correcta definición e inclusión en los procesos de modelización hidráulica supone una mejora de información de entrada.

2.2.1. Medios empleados

Para los trabajos topográficos de campo se ha utilizado:

- Dron náutico: equipado con GNSS y dos ecosondas mono-haz de medición.
- Dron aéreo: DJI MATRICE 600 PRO con cámara fotográfica SONY a6000

Tabla 5. Descripción de elementos transversales al flujo identificados para AA-Floods y correspondencias en sus respectivas ARPSIs. (*) Incluidos perfiles antes y después de elementos transversales al flujo (estructuras e infraestructuras).

Id Eje	Tramo de interés	Perfiles batimétricos sobre el cauce del Genil				Elementos transversales al flujo considerados			
		Perfiles prediseñados con equidistancia establecida	Equidistancia nominal	Perfiles observados (*)	Equidistancia real aproximada	AA-Floods	SNCZI ARPSIs		
						Nº elementos: Estructuras e Infraestr.	Lechos rocosos, poco profundos, pequeños azudes	Nº elementos: Estructuras e Infraestr.	Id ARPSIs
1	Río Genil a su paso por Isla Redonda	122	90	437	25	6	8		
2	Entronque Río Genil – Río Blanco	68	90	267	25	3	17		
3	Río Genil a su paso por Écija	78	90	319	25	9	5	6	ES050_APSFR_MG044
4	Río Genil a su paso por Palma del Río	172	90	791	25	6	16	4	ES050_APSFR_MG001
5	Río Blanco a su paso por El Rubio					2			
						26	46		

- Laser Escáner Terrestre (LST): Faro Focus 3D 330 (Captura 250 000 ptos/s).
- Geoposicionamiento GNSS y puntos de control terrestre: Leica GNSS GS14 (NAVSTAR, GLONASS, GALILEO) y software Geo-Office de Leica® v8.4.
- Estación total Leica TS 15 1”.

En cuanto al software empleado para la restitución fotogramétrica y tratamiento datos LST (lasergratimetría) fue Agisoft © Metashape y Cyclone ©.

2.2.2. Topografía de detalle elementos estructurales

Los trabajos de topografía de detalle se han abordado con una combinación de técnicas clásicas y observaciones GNSS, captura mediante LST y fotogrametría. El uso de una técnica u otra ha estado en función del elemento estructural, y considerando limitaciones visuales debidas a vegetación de ribera y/o limitaciones legales asociadas al uso de drones en espacios aéreos restringidos. El uso de LST y fotogrametría mejoran la eficiencia de la adquisición de datos frente a topografía clásica, optimizando tiempos y también la eficacia en la misma dado que se obtienen imágenes y modelos 3D que proporcionan una representación completa de los elementos, sobre los que es mucho más simple la realización de medidas en gabinete y la extracción de la información necesaria para llevar a cabo su reconstrucción esquemática en la modelización hidráulica. Además, proporcionan un registro documental extraordinario de cara a futuras actuaciones, reconstrucciones, mejoras de estos elementos (respecto de los documentos habituales como son planos, gráficos o fotos). El flujo de trabajo seguido contempla los siguientes pasos:

- Revisión visual de la zona de trabajo y planteamiento de metodología a emplear para el levantamiento.
- Materialización (con Geo-Punto) y observación de bases topográficas conGNSS.
- Planificación y vuelo fotogramétrico con dron y/o escaneados 3D con LST.
- Levantamiento por topografía clásica, GNSS y/o estación total de elementos estructurales clave para su posterior delineación.

Todas las observaciones GNSS se han realizado haciendo uso de la RAP postprocesando con Geo-Office de Leica® v8.4.

Los vuelos se han planificado a baja altura (máximo 60 metros) para obtener imágenes cenitales y oblicuas con un GSD aproximado de 0,015 m, así como nubes de puntos fotogramétricas de gran densidad. Esta captura se ha realizado especialmente sobre azudes (como el de San Calixto. Isla Redonda) y tableros de puentes. El posicionamiento absoluto se realiza con apoyo topográfico materializado a partir de los Geo-Puntos.

Para la obtención de nubes de puntos tridimensionales, las capturas con LST son posicionadas con coordenadas absolutas a partir de puntos de apoyo (dianas) observadas mediante Estación Total a partir de los Geo-Puntos.

Se diferencian dos tipos de elementos estructurales o infraestructuras hidráulicas: puente y presa o azud. La geometría de cada estructura se refleja en fichas descriptivas. En el caso de los puentes, la ficha (Figura 3) contiene información esencial para la correcta incorporación de la infraestructura en el software Iber+ para modelización hidráulica. Por ello en la ficha se ha registrado información geométrica básica y acotaciones en los perfiles aguas arriba y aguas debajo de la infraestructura. Por otro lado, las fichas relativas a los azudes o presas incluyen un perfil topográfico del cauce del río, elaborado a partir de la batimetría aguas arriba y aguas abajo así como información básica que delimita la estructura.

2.2.3. Observación de perfiles batimétricos

La captura de perfiles batimétricos se realiza mediante medición vertical (profundidades) y asignación de posicionamiento 3D al punto del lecho del río. De esta forma se han obtenido coordenadas (X, Y, Z) del fondo del río y elementos presentes (troncos, rocas, etc.) que en ellos puedan existir. La metodología se basa en:

- Planificación preliminar de perfiles: Dependiendo de la zona se han seleccionado equidistancias entre los 80 m (Isla Redonda) y 120 m (Palma Río). Ver Tabla 5.
- Geoposicionamiento: Observaciones GNSS conectando con estaciones RAP y correcciones

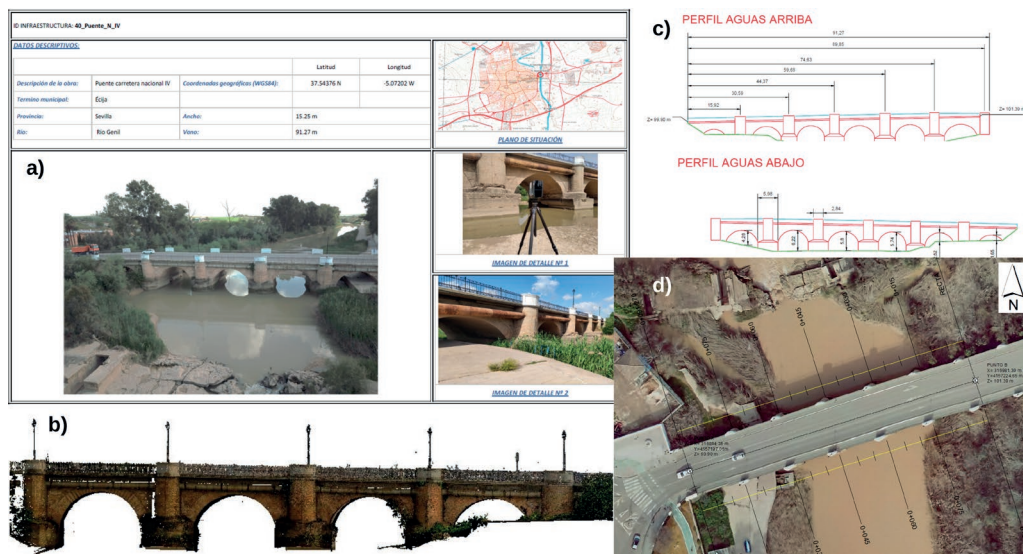


Figura 3. Fichas descriptivas de elementos transversales al flujo. Ejemplo: Puente N-IV sobre Río Genil (Écija). a) Descripción general; b) Modelo 3D (puntos+asignación de color a partir de fotos); c) Croquis de alzados a partir de modelo 3D; d) ortofoto de detalle y croquis de planta.

diferenciales en tiempo real (protocolo NTRIP) y posicionamiento RTK.

- Navegación: la navegación del dron batimétrico se realiza de forma manual mediante el sistema de control remoto desde una embarcación auxiliar (zodiac), realizando pasadas transversales al eje del río según equidistancia planificada.
- Captura de datos: Se ha realizado incluso en profundidades inferiores a 0,5 m.
- Transmisión de información a estación en tierra mediante telemetría.

2.2.4. Incidencias importantes

Al contrario que la captura LiDAR, la captura batimétrica se planificó para el período estival en el que suelen ocurrir los máximos caudales del río Genil por descargas del embalse de Iznájar (situado en cuenca del Alto Genil) principalmente para abastecer a los riegos de cultivos agrícolas. Este caudal se traduciría en un nivel de agua mayor que el que existe en otras épocas del año, y por tanto se favorecería la navegación del dron y de la embarcación auxiliar. Sin embargo, se produjo el efecto contrario. Iznájar desembalsa agua regularmente a un ritmo aproximado de 20 m³/s, incrementándose el caudal medio del río hasta los 15 m³/s llegando a tener picos de caudal de 30 m³/s,

cuando el caudal ecológico es de aproximadamente 1-2 m³/s. Estos caudales estivales provocan un aumento de la velocidad del agua que deriva en unas condiciones inseguras para la navegación y la captura batimétrica. Las zonas rocosas quedan ocultas y el agua se arremolina en torno a ellas generando rápidos. Por todo ello, la campaña se pospuso a Octubre-Noviembre (2021), mediante la que se han adquirido 112 000 puntos de calado.

2.3. Generación del Modelo Batimétrico del Río Genil

Para obtener este producto (Figura 4) fue necesaria un minucioso procesado de las observaciones batimétricas y tratamiento posterior que conllevó:

- La depuración de datos erróneos (eliminando puntos cuya incertidumbre es superior a 35 mm) y filtrado por distancia de puntos (<1 m).
- La generación de una lámina de agua a partir del MDT PNOA LiDAR 2ª Cobertura (2021) obtenido previamente.
- Generación de una superficie batimétrica extrapolada a partir de la lámina de agua y los puntos batimétricos mediante algoritmo de *Kriging* (definiendo la línea de separación entre terreno emergido y sumergido), generando un modelo preliminar.

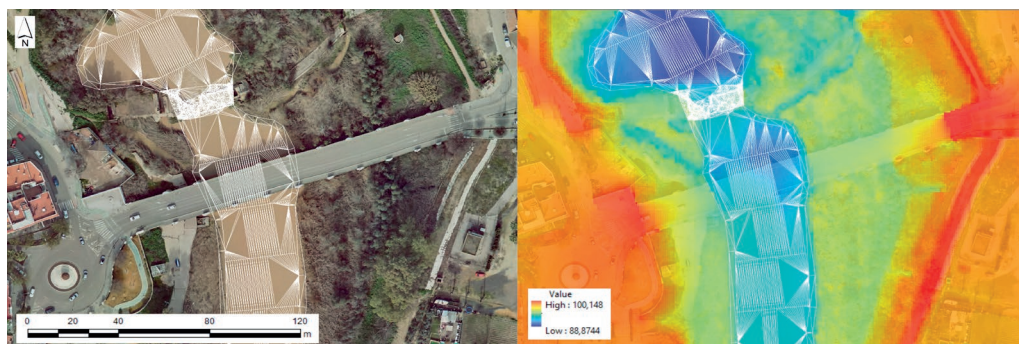


Figura 4. Detalle de modelo triangular (TIN) derivado de captura batimétrica. Izquierda: Sobre ortofoto de detalle. Derecha: Sobre modelo final topobatimétrico.

- Generación de la estructura geométrica triangular de los fondos, a partir de la definición del eje del río y los perfiles transversales a dicho eje. Posteriormente interpretación del contacto coherente con los márgenes de ribera, e inclusión de líneas de ruptura (a partir de la Ortofoto coetánea) para la correcta definición del modelo.
- Inclusión de presas y azudes en la triangulación.
- Obtención del Modelo Digital Batimétrico. A partir del modelo triangular se ha realizado una rasterización (a resolución 1 m) y la aplicación de filtros de suavizado personalizado en cada zona de trabajo.

La información de entrada para la modelización hidráulica comprende el modelo del terreno natural que incluye la información batimétrica de los cauces analizados y los elementos estructurales (presas, azudes). Para su obtención se ha llevado a cabo la fusión de ambos productos MDT LiDAR y MD Batimétrico, realizando un proceso de suavizado posterior en la zona de contacto entre ambos productos.

2.4. Cartografía de inundaciones Radar

Ante los episodios de inundación de 2010, se planteó el reto de cartografiar en fase de emergencia la lámina de agua en ámbitos muy afectados por inundación en cuencas del Guadalquivir y Guadalete. Para ello se empleó tecnología radar a bordo del satélite TerraSAR-X (© Airbus) obteniendo escenas 30×50 km en modo StripMap MGD (*Multi Look Ground Range Detected*) a resolución 3,3 m de píxel que fueron posteriormente

ortorectificadas para obtener de forma automática las zonas inundables y depuradas con edición de operador. El ámbito de Palma del Río se capturó tanto en Febrero como en Diciembre de 2010 (Vales *et al.*, 2010 y Vales *et al.*, 2011). Las láminas de inundación obtenidas se han utilizado para verificar resultados de modelización hidráulica desarrollada en AA-Floods y SNCZI.

2.5. Modelización hidráulica

Se ha realizado con Iber+ (Bladé *et al.*, 2014; García-Feal *et al.*, 2018). Para la estimación del hidrograma de entrada se ha construido en Iber+ un modelo hidrológico de la cuenca del río Genil y se han estimado los caudales en régimen natural, es decir, sin tener en cuenta la laminación que produce el embalse de Iznájar. Se ha calculado un hidrograma para varios periodos de retorno y se han calibrado haciendo coincidir su pico con el valor de caudal establecido por el CAUMAX en el mismo punto. De esta forma no se considera la capacidad de regulación del embalse en el modelo (definiendo el escenario más desfavorable de cara a la definición de zonas potencialmente afectables). Los resultados de la modelización se presentan en la Figura 7.

2.6. Análisis de los productos altimétricos obtenidos y de la modelización hidráulica

Con objeto de analizar la mejora de resultados en la determinación de zonas inundables para los diferentes periodos de retorno, se ha procedido a contrastar los productos obtenidos en el

proyecto AA-Floods (2021) con los disponibles para el SNCZI en ese ámbito. Concretamente, el análisis de ARPSIs (tanto del 1^{er} como 2^o ciclo) se ha basado principalmente en PNOA LiDAR 2014-15. Para el análisis, se han calculado diferencias entre los modelos digitales derivados, y también se han contrastado las láminas de inundación a partir de modelización hidráulica en base a ambos productos.

Se ha procedido de acuerdo a las metodologías descritas en la Guía de Gestión del SNCZI y a las memorias de revisión y actualización de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo (MAPRI 2^o ciclo). Para ello, en ambas fechas se ha tomado como referencia el MDT sin edificios ni puentes, que representa un estado no antropizado del terreno y es, por tanto, el que se emplea en los modelos hidráulicos correspondientes a la Máxima Crecida Ordinaria para la determinación hidráulica de Dominio Público Hidráulico (DPH). Los edificios se interpretan sobre la ortofoto de la fecha correspondiente para ser sustraídos de la superficie del modelo. Además, se han tomado en consideración los usos del suelo a un nivel de escala bajo (*Corine Land Cover*).

Aunque la densidad de 21 ptos/m² (2021 AA-Floods) permite la obtención de un modelo digital de mayor resolución y la definición geométrica de elementos importantes como muros y paredes, para la comparación se ha remuestreado el MDT 2014-15 de 2 m a 1 m y se ha contrastado con el de 2021 AA-Floods a 1 m de resolución.

En cuanto a la modelización hidráulica, el objetivo era realizar una comparativa de zonas inundables obtenidas bajo la misma parametrización en la modelización con ambos conjuntos de datos (2014-15 y 2021) para verificar si existían resultados sustanciales respecto a la mejora de la información de entrada. Para ello se ha utilizado software Iber+ con caudales en régimen natural (sin tener en cuenta la laminación de caudal que produce el embalse de Iznájar, aguas arriba del río Genil en la Cuenca Hidrográfica Genil Alto),

analizando los *ámbitos* de interés del proyecto AA-Floods (Figura 7).

Por último, se ha realizado una evaluación de las zonas inundables cartografiadas para la fecha de 2021 obtenidas en AA-Floods (en los 3 períodos de retorno) contrastándolas con las zonas inundadas en Febrero y Diciembre de 2010 en el ámbito en el que estaban disponibles (Palma del Río).

3. Resultados

3.1. Precisiones de Campos de Control y Puntos de Apoyo fotogramétrico

Procesadas todas las observaciones se obtuvieron las precisiones mostradas en Tabla 6 para los campos de control (ajuste altimétrico LiDAR) y campos de comprobación altimétrica del LiDAR, y puntos de apoyo fotogramétrico para el proceso de orientación de fotos y ortorectificación.

3.2. Cobertura LiDAR y fotogramétrica

Acorde a la planificación, se realizaron 35 pasadas de vuelo distribuidas en los tres bloques mencionados (1 Cauce Genil, 2 Osuna, 3 Morón de la Frontera) que se han procesado y ajustado de forma independiente (Figura 2). Los campos de comprobación solo se ubicaron en el bloque Genil (y concretamente en la ciudad de Écija).

Tras los análisis realizados de cobertura superficial y densidad de la nube de puntos se ha verificado que los resultados son coherentes con la densidad mínima planificada (17 ptos/m²) llegando a conseguirse un valor medio de 21 ptos/m², incrementando de forma importante la densidad definida para PNOA (0,5-4 ptos/m² a nivel nacional). Así mismo, el análisis de las diferencias altimétricas entre pasadas ha proporcionado resultados mucho mejores que los exigidos en PNOA (Tabla 2).

Por otro lado, atendiendo a los resultados del control geométrico altimétrico con los campos de

Tabla 6. Precisión de las soluciones GNSS para trabajos de campo (Q raíz cuadrada de la varianza de las coordenadas).

Tipo	Nº Campos	Nº Puntos	Qxy	Qz	Qxy + Qz	SDx	SDy	SDz
Campos de Control	18	1086	0,013	0,022	0,026	0,011	0,008	0,022
Campos de Verificación	8	311						
Puntos de Apoyo		39	0,004	0,005	0,007	0,003	0,003	0,005

Tabla 7. Resultados del control geométrico respecto a campos de comprobación altimétrica.

Cobertura	LiDAR	Average Dif z	Minimum Dif	Maximun Dif	MSE z	RMSE z	Std z
PNOA 1ª Cobertura	2014-15	-0,005	-0,179	0,211	0,006	0,079	0,079
PNOA 2ª Cobertura	2020-21	0,155	-0,043	0,342	0,028	0,167	0,062
AA-Floods	2021	-0,022	-0,145	0,065	0,001	0,035	0,027

comprobación de las nubes de puntos disponibles (PNOA 2014-15 y 2021, y 2021AA- Floods), se verifica que los mejores resultados se obtienen para el ajuste geométrico altimétrico local de 2021 (AA-Floods) (Tabla 7). Es importante mencionar que la campaña de campo para obtener puntos de comprobación se realiza en otra fecha a la captura LiDAR-fotogramétrica, por lo que se han desechado puntos que durante esta captura presentaran obstáculos que invalidasen puntos para la correcta comparación altimétrica (por ejemplo; presencia de coches en aparcamientos, mesas en terrazas, y similares). De los 312 puntos disponibles en los campos de comprobación, se han utilizado 176 puntos útiles comunes a las 3 coberturas LiDAR tras desechar de la comparativa puntos que presentan obstáculos (como los mencionados) en alguna de ellas.

3.3. Productos obtenidos en el trabajo

El Sistema Geodésico de Referencia utilizado en todo el trabajo y en los productos obtenidos es ETRS89, Sistema cartográfico de representación

UTM Huso 30, y cotas ortométricas para todos los productos generados (EPSG: 25830). Para el corte de ficheros de las nubes de puntos LiDAR y productos ráster se ha utilizado retícula 2x2 km del PNOALiDAR. En la Figura 5 aparecen algunos de los productos obtenidos.

3.4. Diferencias entre MDE 2014-15 y 2021

En la comparación entre modelos digitales de ambas fechas se ha verificado que existen diferencias importantes especialmente en las zonas en donde se ha llevado a cabo levantamientos batimétricos (Figura 6 y Tabla 8). Analizando los datos se comprueba que los MDT de ARPSIs tienen una corrección altimétrica estimada en el cauce pero no ha quedado documentada en los informes de realización y fichas documentales. Por otro lado, resulta evidente la mejoría en la representación altimétrica obtenida a partir de los trabajos de AA-Floods (generada a 1 m de resolución) respecto del producto de 2014-15 (2 m remuestreado a 1 m). Las diferencias detectadas entre ambas fuentes



Figura 5. Ejemplos de ortofotos y productos altimétricos obtenidos (en dos núcleos urbanos Écija y El Rubio) en contraste con la ortofoto PNOA 2019.

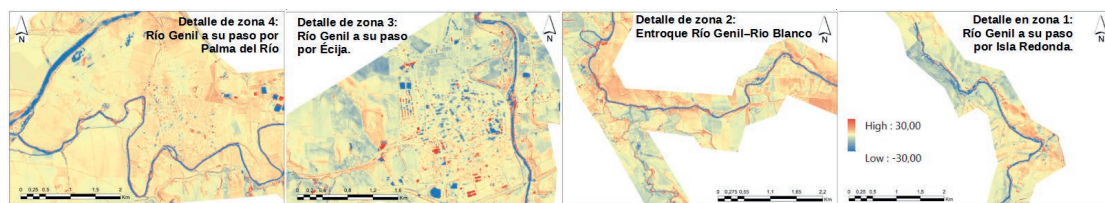


Figura 6. Ejemplos de diferencias MDT 2021 (AA-Floods) y 2014-15 (1ª Cobertura PNOA).

pueden ser debidas principalmente a las mejoras del AA-Floods: datos más recientes, mayor exactitud geométrica del ajuste local LiDAR al terreno, mayor definición de elementos derivados del incremento de densidad LiDAR, edición y depuración de la clasificación, inclusión de batimetrías, etc. En la Figura 6 se muestra una comparación y puede apreciarse el orden de magnitud de las mismas y su distribución.

3.5. Modelización hidráulica para 2014-15 y 2021

Como verificación de que la mejora en la información altimétrica utilizada provoca resultados diferentes en los análisis de zonas inundables (obtenidos mediante modelización hidráulica), se presenta comparación entre zonas inundables en los 3 ámbitos analizados.

Tal como puede apreciarse en la Figura 7, para los diferentes períodos de retorno analizados (T10, T100 y T500) existen diferencias en los calados obtenidos (alturas de las láminas de agua sobre la ciudad y las zonas rústicas) para las zonas analizadas 3 y 4, por lo que se demuestra que con mejoras en la información de partida de los modelos hidráulicos de 2014-15 al 2021 se producen resultados diferentes en la modelización. Este hecho se justifica no solo con la inclusión de información batimétrica sino información de mayor detalle y mayor exactitud posicional en la determinación de

las superficies del terreno obtenidas con LiDAR 2021 (ajuste altimétrico local de 2021 versus ajuste altimétrico regional de PNOA 2014-15, y resto de factores mencionados). En la zona 1 (Isla Redonda) los resultados no son sustanciales. Es importante mencionar que esta zona se seleccionó por interés de las comunidades locales, pero no ha demostrado ser tan susceptible a inundaciones (no ha reflejado inundaciones históricas destacables, ni se ha catalogado como ARPSI). En la Figura 7 se ha invertido el orden del coloreado para esta zona 1, para mejorar la visualización. La zona 2 no ha sido analizada hidráulicamente, dado que se cartografió con otros objetivos de AA-Floods.

3.6. Comparación con zonas inundadas en 2010

Tal como se ha mencionado, en el ámbito de Palma del Río (zona 4) se dispone de la cartografía de zonas inundadas (lámina de agua) en Febrero y Diciembre de 2010 a partir de análisis de imágenes radar TerraSAR-X. Es importante mencionar que este satélite captura a una hora concreta que no tiene por qué coincidir con la hora en la que se produce la altura máxima de la lámina de agua o pico de inundación (por tanto la lámina de agua cartografiada en 2010 será por tanto igual o ligeramente menor que la que representaría este pico de inundación). Durante esos procesos de inundación, además de producirse intensas y acumuladas precipitaciones se produjeron descargas

Tabla 8. Diferencias entre Modelos Digitales altimétricos 2014-15 (SNCZI) – 2021(AA-Floods).

Ámbito	Nº píxeles	Sup. analizada (ha)	Media	Desviación estándar
Zona 1	7972304	797,23	-0,27	0,77
Zona 2	8020200	802,02	-0,08	0,55
Zona 3	17327137	1732,71	-0,17	0,68
Zona 4	15663403	1566,34	-0,08	0,87
Ámbito Completo	171587452	17158,75	-0,04	0,52

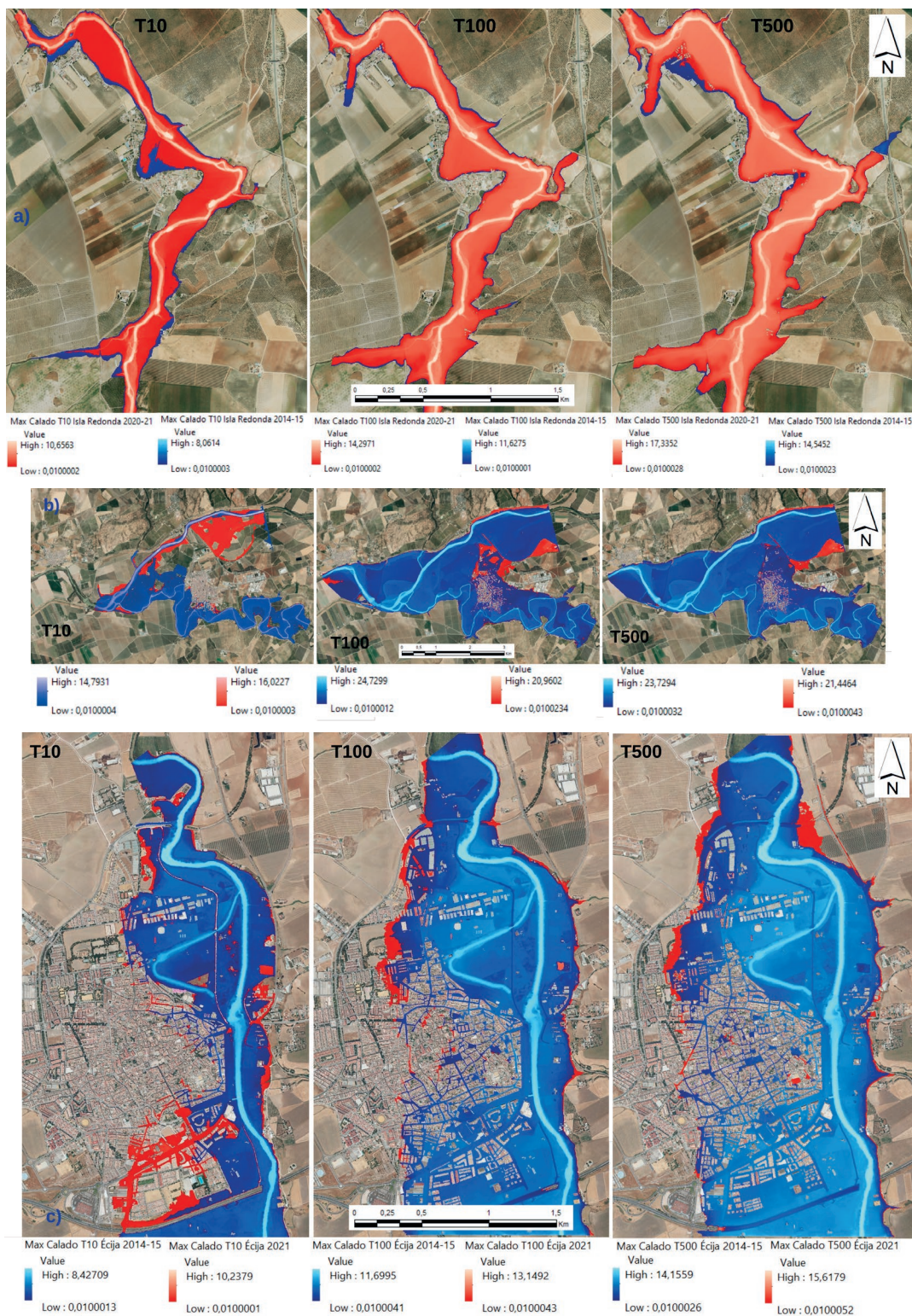


Figura 7. Comparación de calados máximos (T10, 100, 500) para ámbitos en los que se ha desarrollado modelización hidráulica (ejemplos): a) Isla Redonda (zona 1): 2014-15 Azul (abajo) y 2021 Rojo (arriba); b) Écija (zona 3) y c) Palma del Río (zona 4) en ambas fechas: 2014-15 Azul (arriba) y 2021 Rojo (abajo) para ambas zonas.

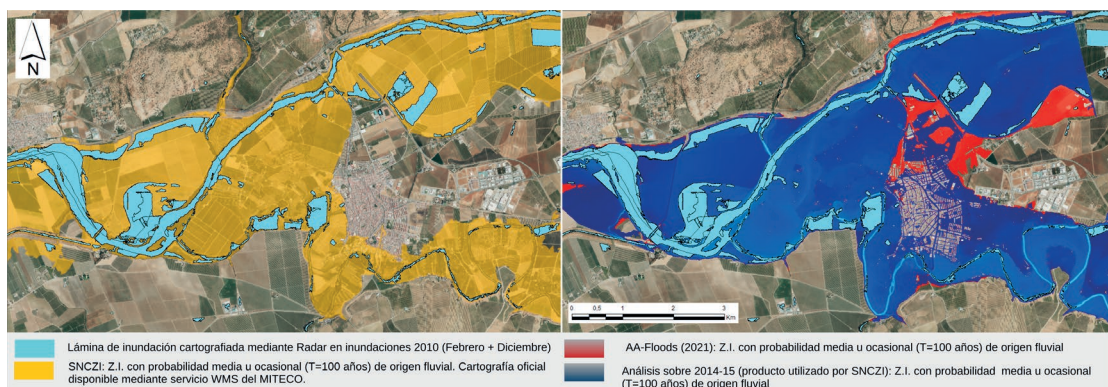


Figura 8. Láminas de inundación en 2010 sobre análisis de zonas inundables del SNCZI 2014-15 (izquierda) y AA-Floods 2021 (derecha) para T100 (en donde ha verificado mejor correspondencia) del producto AA- Floods 2021. También se aprecian diferencias respecto del producto obtenido en base a información de 2014- 15.

de agua de los diferentes embalses. El escenario más desfavorable de inundaciones (régimen natural) asimilaría estas descargas de embalses. En este escenario el análisis de zonas inundables debe contener las láminas de agua reales que se cartografiaron en 2010. Tal como se aprecia en la Figura 8, y haciendo uso de los resultados para T100 (el que más se ajusta a esa circunstancia) se verifica que no hay zonas inundadas en 2010 fuera de los ámbitos potencialmente inundables obtenidos en la modelización hidráulica tanto en AA-Floods como en el SNCZI. Se puede considerar que las superficies afectadas se corresponden con las mostradas en la figura 7 (T100) analizadas sobre el MDT 2021 (AA-Floods) y concluir que las inundaciones de 2010 se corresponden con una probabilidad media u ocasional de ocurrencia.

4. Discusión

4.1. Información de PNOA y fechas de adquisición

EL IGN y la Junta de Andalucía desarrollaron de forma colaborativa la 1ª cobertura PNOA LiDAR sobre Andalucía (2014-15) y la 2ª cobertura de 2020-21 con densidades nominales 1,5 ptos/m² y depuración de la clasificación automática mediante edición rigurosa posterior. Esto redundará en una mejora definición del territorio para los próximos estudios generales de SNCZI. Aunque algunos países de la Unión Europea tienen planes similares y/o se están programando coberturas a

corto plazo, no existe actualmente una provisión de datos sistemática similar que abarque todo el territorio paneuropeo para disponer de resultados homogéneos en las zonas susceptibles a inundaciones, por lo que resultaría de interés el desarrollo de coberturas nacionales similares a PNOA España. En cualquier caso, estas coberturas son multipropósito y su rango de fechas de adquisición tendrán limitaciones para adaptarse a la temporalidad adecuada de las diferentes aplicaciones, frente a las coberturas locales (como las de AA- Floods) en fechas específicas.

4.2. Mejora de la información de partida

Se han capturado datos LiDAR (21 ptos/m²) con una densidad muy superior a la densidad mínima establecida por PNOA (0,5 ptos/m²) para generar mapas y modelos digitales del terreno de alto detalle, cuando el PNOA (Andalucía) en 2014 fue de 0,5 ptos/m² y en 2021 ha sido de 1,5 ptos/m². Se considera que los datos actualizados junto con el incremento de densidad de nubes de puntos, la captura en fechas óptimas, y la depuración de clasificación resultan fundamentales para la definición de elementos del territorio (suelo, edificios, muros,...). Por otro lado, resulta fundamental la aportación de las batimetrías en la definición de un modelo topobatimétrico más adecuado a los retos de la determinación de zonas inundables. Estos elementos repercuten de forma positiva en el resultado de las modelizaciones hidráulicas, tal como ha podido verificarse (Figura 7). Así

mismo, pueden mejorar la definición de los Mapas de Riesgo y Peligrosidad con software de modelización de última generación para simular el flujo de agua y ajuste de parámetros.

4.3. Calidad posicional

Considerando prescripciones PNOA LiDAR en Andalucía 1ª (2014-15), 2ª (2020-21) y AA-Floods 2021 (Tabla 2), se verifica la mejora en la exactitud posicional (Tabla 7) para AA-Floods, y por tanto la calidad geométrica de los productos altimétricos (nubes de pto LiDAR ajustadas altimétricamente). Por ello, se considera que las prescripciones para AA-Floods (Tabla 2) se podrían tomar como recomendación para su aplicación en trabajos similares en la UE. Esto se justifica porque los ajustes altimétricos de PNOA (y proyectos de la UE similares) son regionales o parcialmente regionales, y los ajustes de AA-Floods son locales (y las prescripciones más rigurosas), adecuándose más a la geometría del territorio (ámbitos locales). Se ha verificado en las diferencias de MDT mostradas en Figura 6 que proporcionan resultados diferentes en las modelizaciones hidráulicas bajo las mismas parametrizaciones (Figura 7).

Se ha comprobado que aunque 2ª cobertura PNOA ha sido validada tras rigurosos controles de calidad, en ámbitos localizados puede proporcionar discrepancias geométricas importantes en sus productos de elevación respecto a la comprobación altimétrica. Estas diferencias pueden alterar en gran medida los resultados de las modelizaciones hidráulicas. Por ello se considera importante llevar a cabo una exhaustiva comprobación altimétrica de PNOA antes de ser usado en ARPSIS u otras áreas de alto interés, y realizar ajustes locales de las nubes de puntos en caso de ser necesario. Como aspecto deseable, se proponen capturas LiDAR con características similares a las de AA-Floods para cartografiar ARPSIS y áreas equivalentes en EU.

4.4. Captura de batimetrías

Es necesario tomar en consideración las fechas óptimas para realizar esta captura (régimen de presas, etc.) para disponer de las mejores condiciones de accesibilidad a los cauces y navegabilidad. Las características específicas de cada cauce deben ser

analizadas previamente a la planificación y desarrollo de trabajos batimétricos.

4.5. Modelización hidráulica

El objetivo no era comparar los resultados de modelizaciones hidráulicas desarrolladas en este trabajo con los obtenidos en el SNCZI sino la demostración de que los resultados en modelización son diferentes (mejores) cuando se mejora la información de entrada a dichos modelos (Figura 7). Aunque no presentados en esta comunicación, en el marco del proyecto AA-Floods se han desarrollado hidrogramas específicos para las zonas analizadas. Por otro lado, también se han llevado a cabo levantamientos de red de saneamiento de los núcleos urbanos para incorporar esa información en la modelización hidráulica (fluvial+pluvial) y refinar resultados tomando en consideración esa variable.

4.6. Cartografía de zonas afectadas durante episodios de inundación

Constituyen una fuente importante de comprobación de resultados de las modelizaciones hidráulicas. En este caso se han utilizado los productos REDIAM (CSMAyEA) pero ante próximos episodios también puede contemplarse el uso de la cartografía de Copernicus *Emergency Management Service (EMS) Rapid Mapping*.

4.7. Aplicabilidad de productos de alto detalle

Las nubes de puntos de alto detalle pueden tener múltiples aplicaciones principalmente en zonas urbanas, entre ellas “gemelos digitales” (“*digital twins*”) de las ciudades o modelos “*bin*” de edificios. Por otro lado, la mejora de la resolución de los productos derivados tienen amplias aplicaciones. Entre las mismas, el uso de modelos de edificios para análisis y modelización pluviométrica en las ciudades se erige como próximo reto tras AA-Floods.

4.8. Aplicabilidad de la metodología empleada

Se considera que los productos y calidad posicional obtenidos en este proyecto piloto son

recomendables para su aplicación en el análisis de ARPSIs del SNCZI y sistemas similares de la UE. Los análisis preliminares indican que por costes económicos (considerados moderados) y por los necesarios análisis territoriales, hidrológicos e hidráulicos (que son complejos), esta metodología es aplicable en grandes áreas locales de la UE cercanas a zonas susceptibles de inundación, y será especialmente indicada para los puntos más conflictivos y para aquellos en los que se necesite evaluar la aplicación de Soluciones basadas en la Naturaleza.

5. Conclusiones

Las técnicas LiDAR, fotogrametría y batimetría se revelan como herramientas muy útiles para la obtención de información altimétrica de amplias zonas para modelización hidráulica y análisis de riesgo de inundaciones. En AA-Floods se han obtenido productos altimétricos mejorados respecto de los utilizados en el SNCZI orientados a cubrir las zonas sensibles de inundaciones. Se considera que para ello ha sido fundamental el incremento de densidad de la nubes de puntos LiDAR y la mejora en la calidad posicional respecto a PNOA considerado suficiente para los análisis del SNCZI. También ha sido crucial la inclusión de información batimétrica (considerada como mejora en la Guía Metodológica para el desarrollo del SNCZI) y la determinación precisa de estructuras e infraestructuras que afectan al flujo de agua.

A partir de la comparación de productos altimétricos AA-Floods (2021) y SNZCI (2014-15) se considera que las importantes diferencias encontradas son debidas a la actualización del territorio, pero sobretudo a la mejora de la información: densidad de nubes de puntos, depuración de la clasificación, inclusión de batimetría, etc. Para analizar esta mejoría se ha realizado una modelización hidráulica con la misma parametrización sobre ambos sets de datos de partida. Se considera que estos cambios en superficies afectadas van a poder servir para localizar de forma más correcta y precisa los ámbitos más vulnerables y ubicar las infraestructuras de mitigación de forma más optimizada.

A la vista de resultados obtenidos, se considera que coberturas LiDAR nacionales pueden cubrir determinadas necesidades de sistemas nacionales

de cartografía de zonas inundables en la UE, pero para el análisis de zonas de alto riesgo se recomienda las fuentes de información, metodología y prescripciones utilizadas en AA-Floods como modelo a seguir con objeto de reducir la incertidumbre en el análisis de zonas más sensibles.

Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado por el proyecto EAPA_45/2018_AA-FLOODS. Agradecimiento a los socios ARECIAR, CSMAYEA, BOREAS por el análisis de necesidades de las diferentes comunidades de afectados y la identificación de áreas de interés. A las empresas proveedoras SPASA (Servicios Politécnicos Aéreos, S.A.) por la cobertura LiDAR y fotogramétrica, e IPH (Ingeniería y Proyectos Huelva) por el levantamiento batimétrico y de infraestructuras.

Referencias

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Copernicus Emergency Management Service (EMS). <https://emergency.copernicus.eu/>
- Erena, M., Atenza, J.F., García-Galiano, S., Domínguez, J.A., Bernabé, J.M. 2019. Use of Drones for the Topo-Bathymetric Monitoring of the Reservoirs of the Segura River Basin. *Water*, 11(3), 445. <https://doi.org/10.3390/w11030445>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J.M., Formella, A. 2018. ‘An accelerated tool for flood modelling based on Iber’, *Water (Switzerland)*, 10(10), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- Junta de Andalucía. 2002. Decreto 189/2002 de 2 de julio. Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, número 91.
- Junta de Andalucía. 2011. Decreto 347/2011, de 22 de noviembre, por el que se regula la estructura y funcionamiento de la Red de Información Ambiental de Andalucía y el acceso a la información ambiental.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH). Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). 2022. Caracterización de la peligrosidad y riesgo por inundación fluvial en los PGRI de 2º ciclo Directiva 2007/60/CE en las cuencas intercomunitarias (2022-2027).

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). Evaluación Preliminar de Riesgo de Inundación (EPRI) 2º Ciclo 2007/60/CE. Episodios históricos y Memoria. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., De La Riva, J. 2015. Interpolation routines assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications. *Remote Sensing*, 7, 8631-8654. <https://doi.org/10.3390/rs70708631>

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea. (2007). Directiva 2007/60/CE, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (Texto pertinente a efectos del EEE).

Proyecto AA-Floods (EAPA 45/2018 AA-FLOODS). <http://aafloods.eu/es/>

Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación. Boletín Oficial del Estado, número 171, de 15/07/2010.

Vales, J.J., Carpintero, I.R., Granada, L., Méndez, E., Montoya, G., Pino, I., Prieto, R., Giménez de Azcarate, F., Cáceres, F., Moreira, J.M. 2010. Estudio de áreas afectadas de inundación en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite TerraSAR-X. *XIV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. ISBN 978-84-472-1294-1, págs. 587-596

Vales, J.J., Carpintero, I.R., Granada, L., Méndez, E., Montoya, G., Pino, I., Prieto, R., Giménez de Azcarate, F., Cáceres, F., Moreira, J.M. 2011. Estudio y seguimiento de áreas afectadas de inundación (Febrero-Marzo y Diciembre) en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite TerraSAR-X. *XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. "Bosques y Cambio Climático"*. AS-3588-2011, págs 448-451