

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado de Ciencias Ambientales



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**Cartografía de masas de aguas
utilizando imágenes WorldView-3
en el Marjal de Gandía**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Sergio Dolz Albertos

Tutor/es:

Javier Estornell Cremades

María Teresa Sebastiá Frasquet

GANDIA, 2020

RESUMEN

Los humedales son zonas que pueden llegar a presentar grandes variaciones en su capa de agua en un breve periodo de tiempo, por lo que dificulta la extracción de la información de las masas de agua mediante métodos manuales, por lo que el desarrollo de métodos de teledetección mediante imágenes de sensores satélites van adquiriendo más importancia. En este estudio, se van a utilizar imágenes obtenidas por el satélite worldview-3 para detectar la lámina de agua de la Marjal de la Safor usando índices publicados previamente, así como la proposición de otros dos para este trabajo. Para la validación de estos resultados se han tomado 66 puntos considerados tanto de agua como no agua, y se usaron ortofotos para su correcta clasificación. El índice de fiabilidad global utilizado para la validación de este trabajo concluye que el índice con mejor resultado es el NDWI, con unos resultados óptimos para el rango del umbral de 0,15 a 0,65. Sin embargo, también se ha demostrado que, con sensores satélite de alta resolución, casi cualquier índice utilizado para este trabajo obtiene unos resultados óptimos para distintos valores del umbral, incluidos los ambos propuestos para este trabajo.

Palabras clave: imágenes satélite; umbral; índice de fiabilidad global; humedales; NDWI

ABSTRACT

Wetlands are areas that can present large variations in their water layer in short periods of time, making it difficult to extract information from water masses using manual methods, so the development of remote sensing methods through images from satellite sensors that are gaining more importance. In this study, images obtained by the worldview-3 satellite will be used to detect the water surface of the Marjal de la Safor using previously published indices, as well as the proposal of two others for this work. For the validation of these results, 66 selected points considered as water and non-water were taken, and orthophotos were used for their correct classification. The overall accuracy used for the validation of this work concludes that the index with the best results is the NDWI, with optimal results for the threshold range of 0.15 to 0.65. However, it has also been shown that, with high-resolution satellite sensors, almost any index used for this work obtains optimal results for different threshold values, including the two proposed for this work.

Keywords: satellite images; threshold; overall accuracy; wetlands; NDWI

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. MATERIALES Y METODOS	2
3.1. DISEÑO	2
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
3.3. DATOS CLIMÁTICOS	4
3.3.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA	5
3.3.2. SELECCIÓN DE ESTACION METEOROLOGICA	6
3.3.3. TERMOMETRIA	7
3.3.4. PLUVIOMETRIA Y REGIMEN DE PRECIPITACIONES	8
3.3.5. DIAGRAMA OMBROTÉRMICO	11
3.4. PROCESAMIENTO DE IMAGEN	11
3.5. ÍNDICES	15
3.5.1. NDWI	15
3.5.2. MNDWI	15
3.5.3. RE-NDWI	16
3.5.4. AWEI	16
3.5.5. SWIR_BLUE	17
3.5.6. IR_RED	18
4. RESULTADOS	19
4.1. NDWI	19
4.2. MNDWI	21
4.3. RE-NDWI	23
4.3.1. AWEI(SH)	24
4.4. ÍNDICES PROPUESTOS	26
4.4.1. SWIR_BLUE	26
4.4.2. IR_RED	28
4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	29
5. CONCLUSIONES	32

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Dispositivo GPS Garmin etrex10	2
Ilustración 2. Fotos tomadas del trabajo de campo correspondientes a los puntos 24, 25, 31 y 29 respectivamente.	3
Ilustración 3. Localización geográfica de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	4
Ilustración 4. Zonas climáticas de la Comunidad Valenciana. Fuente: Atlas Climático de la Comunidad Valenciana.....	5
Ilustración 5. Localización geográfica de la estación meteorológica Gandia-Marxuquera. Fuente: Elaboración propia	6
Ilustración 6. Vista general de la estación meteorológica gandia-marxuquera. Fuente: red siar.	7
Ilustración 7. Vista detallada de la estación meteorológica gandia-marxuquera. Fuente: red siar	7
Ilustración 8. Temperatura media anual durante el periodo 1981-2010. Fuente: Aemet	7
Ilustración 9 . Precipitación media anual durante el periodo 1981-2010. Fuente: Aemet	9
Ilustración 10. Mapa de la toma de puntos. Fuente: Elaboración propia	15
Ilustración 11. Representación de la masa de agua. (A,B): Ortofoto, (C, D): Índice NDWI (umbral 0,35)	20
Ilustración 12. Representación de la masa de agua. (A,B): Ortofoto, (C, D): Índice MNDWI (umbral 0,35).....	22
Ilustración 13. Representación de la masa de agua. (A,B): ortofoto, (C, D): índice RE-NDWI (umbral 0,55).....	23
Ilustración 14. Representación de la masa de agua. (A,B): ortofoto, (C, D): índice AWEI(SH) (umbral 0)	25
Ilustración 15. Representación de la masa de agua. (A,B): ortofoto, (C, D): índice SWIR_BLUE (umbral 0,35).....	27
Ilustración 16. Representación de la masa de agua. (A,B): ortofoto, (C, D): índice IR_RED (umbral 0,35).....	28
Ilustración 17. Representación de la masa de agua. (A): Ortofoto, (B): índice NDWI (umbral 0,35), (C): índice MNDWI (umbral 0,35), (D): índice RE-NDWI (umbral 0,55), (E): índice AWEI(SH) (umbral 0), (F): índice SWIR_BLUE (umbral 0,35), (G) índice IR_RED (Umbral 0,35)	31
Ilustración 18. Representación de la masa de agua. (A): Ortofoto, (B): índice NDWI (umbral 0,35), (C): índice MNDWI (umbral 0,35), (D): índice RE-NDWI (umbral 0,55), (E): índice AWEI(SH) (umbral 0), (F): índice SWIR_BLUE (umbral 0,35), (G) índice IR_RED (Umbral 0,35)	31

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperaturas máximas y mínimas diarias. Estación de Gandia-Marxuquera. Periodo 2002-2020. Fuente: Red SIAR	8
Gráfica 2. Temperaturas media mensual. Estación de Gandia-Marxuquera. Periodo 2002-2020. Fuente: Red SIAR	8
Gráfica 3. Precipitación media mensual. Estación de Gandia-Marxuquera. Periodo 2002-2020. Fuente: Red SIAR	10
Gráfica 4. precipitación total anual. Estación de Gandia-Marxuquera. Periodo 2002-2020. Fuente: Red SIAR	10
Gráfica 5. Diagrama ombrotérmico. Estación de Gandia-Marxuquera. Periodo 2002-2020. Fuente: RED SIAR.....	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la estación meteorológica de Gandia-Marxuquera	6
Tabla 2. Especificaciones del satélite. Fuente: DIGITALGLOBE	12
Tabla 3. Bandas utilizadas por el sensor satélite Worldview-3. Fuente: DIGITALGLOBE	13
Tabla 4. Lista de imágenes utilizadas para este trabajo. Fuente: elaboración propia	13
Tabla 5. Índices espectrales calculados	14
Tabla 6. Índice de fiabilidad global para el índice NDWI con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	19
Tabla 7. Índice de fiabilidad global para el índice MNDWI para 3 bandas SWIR con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	21
Tabla 8. índice de fiabilidad global para el índice RE-NDWI con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	23
Tabla 9. índice de fiabilidad global para el índice AWEI(SH) con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	24
Tabla 10. Índice de fiabilidad global para el índice SWIR_BLUE para 3 bandas swir con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	26
Tabla 11. Índice de fiabilidad global para el índice IR_RED con el rango de umbral de -0,75 a 0,75. Fuente: elaboración propia	28
Tabla 12. Índice de fiabilidad global para todos los índices para el rango del umbral (-0,75 a 0,75)	29

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son áreas terrestres que están saturadas o inundadas de manera estacional o permanente por el agua, el cual es el principal factor controlador del medio y de la vida vegetal y animal asociada a él (Doña Monzó, 2016). Estas áreas son de gran importancia debido a la gran variedad de funciones que aporta al ecosistema, como la regulación del ciclo hidrológico, el almacenamiento del agua, recarga y descarga de acuíferos, así como la protección contra tormentas y la mitigación de crecidas, depuración de aguas, retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes, además son lugares con una gran biodiversidad tanto de fauna como de flora y que ofrecen posibilidades de recreación y turismo, entre otros (Royal & Finlayson, 2018).

De acuerdo con la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, conocida como el Convenio de Ramsar, existen 42 tipos los humedales, los cuales se agrupan en tres categorías: los humedales continentales incluyen ríos, lagos, acuíferos subterráneos, marismas, charcas, pantanos y llanuras de inundación; los humedales costeros, que incluyen marismas de agua salada, estuarios, manglares, albuferas o lagunas litorales, incluso arrecifes de coral; y finalmente los humedales artificiales, como los estanques piscícolas, los arrozales y las salinas.

Las tecnologías remotas de sensores pueden comprender mejor los cambios hidrológicos de los humedales en el tiempo y el espacio (Glasgow et al., 2004; Guo et al., 2017) y, a su vez, puede proporcionar información sobre áreas inaccesibles, donde obtener información puede resultar complicado. También se pueden utilizar para revelar los patrones hidrológicos de los humedales y cómo se relacionan con los parámetros meteorológicos y los climas con una alta variabilidad, como es el clima Mediterráneo. Por estas razones, el mapeo de la superficie de un lecho de agua ayuda a estudiar el equilibrio dinámico al proporcionar información sobre los cambios en la superficie del agua.

A esto se le llama teledetección, una herramienta útil que se puede utilizar para estimar diferentes parámetros de interés en muchos campos de investigación, incluido el estudio de la cobertura del agua u otras características y el estudio de la calidad de las masas de agua. Con este tipo de tecnologías se puede estudiar la superficie de interés sin ningún tipo de contacto con ella (Doña Monzó, 2016).

Una de las formas de realizar la teledetección es a través de sensores en satélites que orbitan alrededor de la tierra. Estos sensores registran la radiación reflejada y emitida por los distintos elementos en la superficie de la tierra, y la atmósfera en una amplia gama del espectro electromagnético. El uso de imágenes satelitales para detectar y analizar humedales se basa principalmente en la clasificación supervisada y no supervisada, así como en la definición del índice de agua y su posterior clasificación mediante umbrales (Fisher et al., 2016; Zhou et al., 2017). Para la teledetección de masas de agua, se suelen utilizar dos tipos de resoluciones dependiendo de la resolución: están los sensores de baja resolución, que se utilizan para monitorizar las extensiones inundadas, diferenciando los píxeles inundados/no inundados (Huang et al., 2014; Li et al., 2015), en humedales con una extensión de 50 km²; y los sensores de alta resolución, que se utilizan para monitorizar humedales de menor tamaño (Jin et al., 2017). La gran ventaja que tienen los sensores de baja resolución es que tienen una resolución temporal más alta y tienen la capacidad de realizar observaciones más frecuentes que los sensores con una alta resolución espacial.

A medida que avanzan los años, cada vez hay más interés en desarrollar indicadores para monitorizar cambios en los humedales a través de la teledetección (Jin et al., 2017). A todo esto, también contribuyen a los nuevos satélites que son lanzados cada año con nuevas y mejoradas características con respecto a los anteriores.

Para este trabajo se utilizarán las imágenes obtenidas por el sensor satélite Worldview-3, con una alta resolución espacial, la cual es idónea para la zona de estudio del trabajo, al tratarse de una extensión pequeña.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es determinar la superficie de lámina de agua de la Marjal de Gandia a partir de las imágenes Worldview-3, así como la proposición de dos nuevos índices para la detección de dicha lámina.

3. MATERIALES Y METODOS

Para este trabajo se va a usar un enfoque cualitativo inductivo como lo es la interpretación contextual y también la recolección de datos, con un alcance de la investigación correlacional, debido a que se pretende proponer un cálculo para diferenciar las masas consideradas como “agua” y “no agua”. También es explicativo, porque se expone una variante de los índices ya existentes para la separación de las masas de agua y no agua. Para la recolección de datos de campo, se ha utilizado un dispositivo GPS Garmin etrex10, localizando aquellas masas de agua y no agua.

3.1. DISEÑO

Para el desarrollo del trabajo de campo se necesitaron dos días para localizar un total de 54 puntos tanto de agua como no agua, y se realizó durante la temporada de otoño, a mediados de noviembre del año 2020. La zona donde se realizó dicha investigación es una zona perteneciente a la Marjal de la Safor próxima a Gandia. Las condiciones en las que hice el trabajo del campo fueron óptimas ya que no hubo mal temporal ni antes ni después de mi trabajo de campo, por lo que los datos obtenidos son estables y no presentaron variaciones. Durante el trabajo de campo se utilizó un dispositivo GPS Garmin etrex10 para localizar las masas de agua para posteriormente analizar los datos obtenidos de cada punto mediante las imágenes del satélite Worldview-3. Todos estos datos fueron procesados mediante la aplicación de ArcGis, y finalmente interpretados y plasmados en este Word.



ILUSTRACIÓN 1. DISPOSITIVO GPS GARMIN ETREX10



**ILUSTRACIÓN 2. FOTOS TOMADAS DEL TRABAJO DE CAMPO
CORRESPONDIENTES A LOS PUNTOS 24, 25, 31 Y 29 RESPECTIVAMENTE.**

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio abarca un área aproximada de 3500 m² situada en la Marjal de Gandia, la cual, junto a otro conjunto de humedales, conforman la Marjal de la Safor. La Marjal de Gandia cuenta con una altura entre -0,25 y 28 m.s.n.m. La Marjal de Gandia se encuentra envuelta por un arco montañoso compuesto por roca de origen cárstico que facilita la infiltración de las aguas y la formación de acuíferos subterráneos.



ILUSTRACIÓN 3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La mayor parte de la aportación hídrica de la Marjal de Gandia proviene del acuífero costero de la Plana de Gandía-Denia, principalmente del acuífero de la Serra Grossa, y de los aportes superficiales del río Vaca (al norte) y Serpis (al Sur) entre otros, y a menor escala los vertidos de origen agrícola, urbano o industrial (Rodrigo et al., 2001).

La Marjal de Gandia consta dentro del Catálogo de Zonas Húmeda de la Comunidad Valenciana, además de en el inventario Español de Zonas Húmedas, y finalmente cuenta como espacio natural sometido a las normas de Gestión de los espacios protegidos de la Red Natura 2000 con código ES5233038.

3.3. DATOS CLIMÁTICOS

El estudio climatológico tiene como objetivo conocer las condiciones climáticas del área de estudio, localizada en la Marjal de la Safor, para ello, se utilizarán los siguientes parámetros para describir los principales rangos climáticos de la zona:

- Selección y recopilación de datos de partida: los datos para la caracterización han sido obtenidos desde las estaciones climatológicas de la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío). Además, se incluye una descripción general de los aspectos más significativos del clima presente de la zona basado en el Atlas climático de la Comunidad Valenciana (Pérez Cueva et al, 1994).
- Termometría: en este apartado se presentan las características climáticas respecto a las temperaturas del área de estudio. Para el análisis de la termometría se ha optado por

representar los datos obtenidos de las temperaturas máximas y mínimas diarias. El periodo de estudio es el 2002-2020.

- Pluviometría y régimen de precipitaciones: en este apartado se presentan los principales rasgos respecto a la caracterización pluviométrica del área de estudio. Para su análisis se ha optado por registrar el volumen total por año y la distribución de las precipitaciones a lo largo del año durante los periodos 2002-2020.
- Diagrama ombrotérmico: con los datos de la temperatura y las precipitaciones se elaborará un diagrama ombrotérmico para observar los periodos secos y húmedos del área de estudio.

3.3.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA

El Atlas climático de la Comunidad Valenciana establece 8 climas o zonas climáticas dentro de la Comunidad Valenciana, como se pueden observar en la siguiente foto:

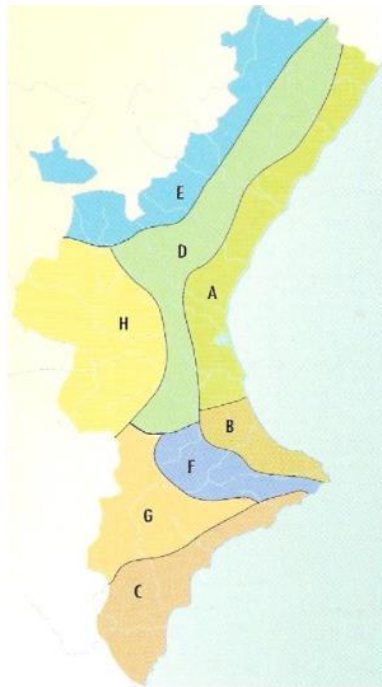


ILUSTRACIÓN 4. ZONAS CLIMÁTICAS DE LA COMUNIDAD VALENCIANA. FUENTE: ATLAS CLIMÁTICO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

Como se puede observar en la Ilustración 4, nuestra zona de estudio se encuentra en la zona B, denominada como *clima de la llanura litoral lluviosa*, caracterizada por tener unas precipitaciones anuales de aproximadamente 650 mm, con el mayor pico de precipitaciones en otoño seguido de la primavera. Estas precipitaciones abundantes se explican por su orientación en la costa, el cual es casi perpendicular con los flujos del Noreste, habituales en las situaciones de ciclogénesis mediterránea o la gota fría. En cuanto a temperaturas, la media anual se suele situar alrededor de los 16-18°C, con unos inviernos suaves con una media de 10°C y veranos con una media de unos 25°C. También hay que destacar una elevada humedad estival, debido a un régimen de brisas marinas muy frecuente que suaviza las temperaturas, pero que crea un ambiente de bochorno muy característico.

3.3.2. SELECCIÓN DE ESTACION METEOROLOGICA

La estación meteorológica que se ha elegido para la recopilación de los datos climáticos ha sido la estación meteorológica de Gandia-Marxuquera. Esta estación ha sido elegida debido a su proximidad geográfica respecto a nuestra zona de estudio, que es de 8,5 kilómetros. Otro criterio que se ha tenido en cuenta es la disponibilidad de los datos climáticos de esta estación, ya que no se han podido obtener datos de otros servicios climáticos próximos a la zona. A continuación, se presentará una tabla con los datos de la estación meteorológica de la estación de Gandia-Marxuquera:

TABLA 1. DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE GANDIA-MARXUQUERA

PROVINCIA	Valencia
TÉRMINO	Gandía
UTM X	738207 m
UTM Y	4316410 m
HUSO	30
ALTURA	105 m
FECHA DE INSTALACIÓN	21/03/2021
MODELO	Modelo 3

Este esquema forma parte de la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío), adoptado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Esta estación meteorológica cuenta con un sensor de temperatura y humedad, un sensor de radiación, un sensor de velocidad y dirección del viento y un pluviómetro. A continuación, se mostrarán unas figuras de la localización geográfica, así como algunas imágenes disponibles en el servicio de la red SIAR.



ILUSTRACIÓN 5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GANDIA-MARXUQUERA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



ILUSTRACIÓN 6. VISTA GENERAL DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GANDIA-MARXUQUERA. FUENTE: RED SIAR



ILUSTRACIÓN 7. VISTA DETALLADA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GANDIA-MARXUQUERA. FUENTE: RED SIAR

3.3.3. TERMOMETRIA

La temperatura media es uno de los principales parámetros climáticos, la cual se calcula con los valores medios diarios obtenidos de las temperaturas máximas y mínimas. En la distribución de las temperaturas influyen la altitud, la latitud, la continentalidad y la proximidad al mar. La tendencia de las temperaturas medias anuales en la Comunidad Valenciana suele aumentar desde el interior hacia la costa, así como del norte hacia el sur. También hay que tener en cuenta el factor orográfico en la distribución de las temperaturas, siendo los valores más elevados en las zonas planas del litoral. La siguiente figura muestra la distribución de las temperaturas medias anuales durante el periodo de 1981-2010 en la Comunidad Valenciana.

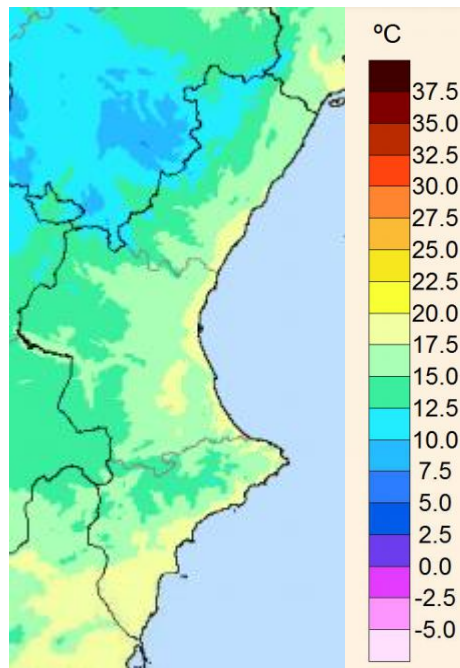
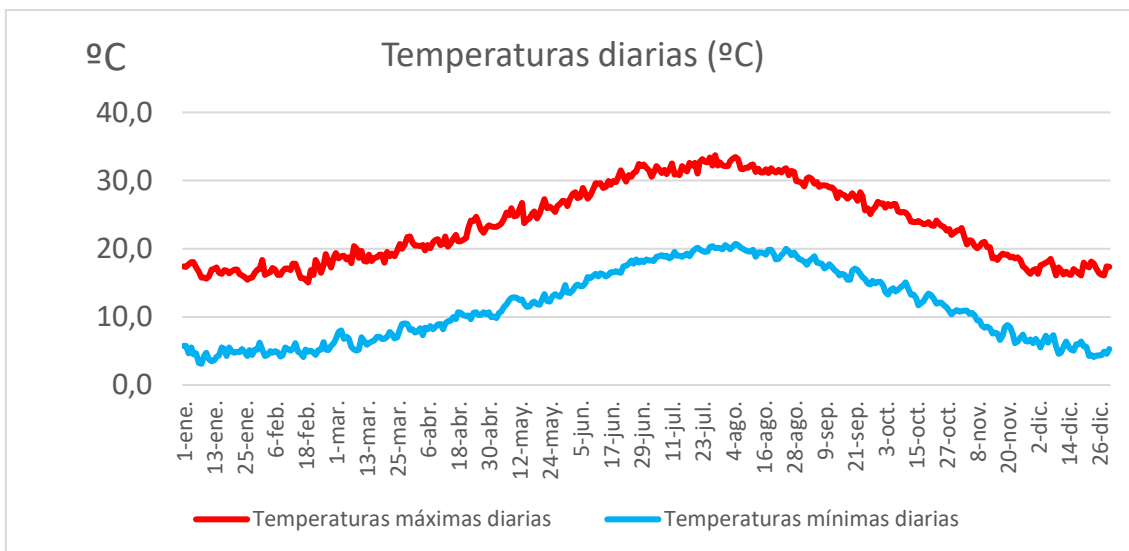
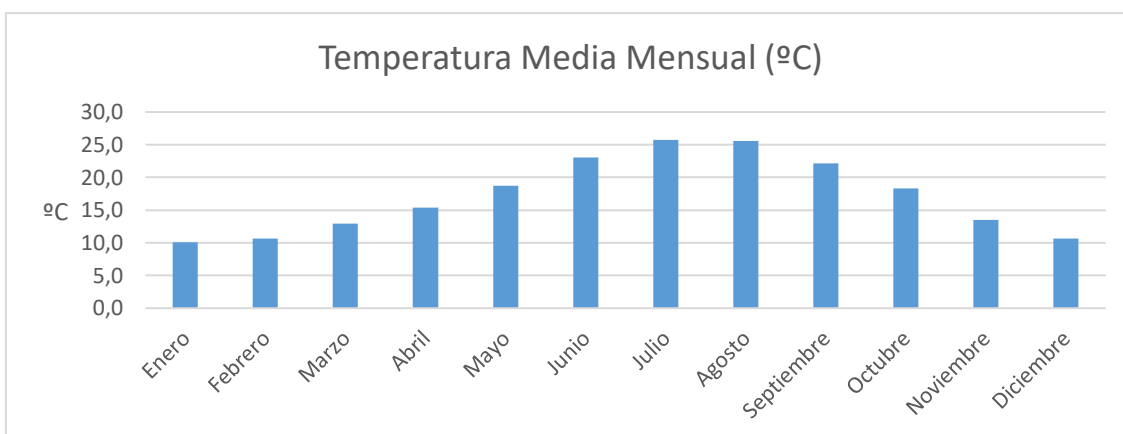


ILUSTRACIÓN 8. TEMPERATURA MEDIA ANUAL DURANTE EL PERIODO 1981-2010. FUENTE: AEMET

Con la finalidad de establecer con detalle la distribución de las temperaturas se han tenido en cuenta las temperaturas medias mensuales y anuales, así como las temperaturas máximas y mínimas diarias. Los datos se presentarán en los siguientes gráficos:



GRÁFICA 1. TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS DIARIAS. ESTACIÓN DE GANDIA-MARXUQUERA. PERIODO 2002-2020. FUENTE: RED SIAR



GRÁFICA 2. TEMPERATURAS MEDIA MENSUAL. ESTACIÓN DE GANDIA-MARXUQUERA. PERIODO 2002-2020. FUENTE: RED SIAR

Como se puede observar, las temperaturas siguen un patrón de clima típico del mediterráneo litoral. Este tipo de clima se caracteriza principalmente por tener veranos secos con temperaturas máximas diarias elevadas, por encima de los 30°C en los meses de julio y agosto (gráfico nº). También se pueden observar episodios de noches tropicales donde las temperaturas mínimas no bajan de los 20°C. en lo que respecta a temperaturas mensuales, se observa que los meses más calurosos son julio y agosto, mientras que los meses de invierno se caracterizan por tener temperaturas suaves con temperaturas que no suelen bajar de los 0°C.

3.3.4. PLUVIOMETRIA Y REGIMEN DE PRECIPITACIONES

La Comunidad Valenciana es considerada como una región llamada la Iberia seca. En el territorio Valenciano, la distribución de medias pluviométricas no es aleatoria, sino que está condicionada por la orografía. La zona de la Safor-la Marina Alta es una de las zonas del territorio con un régimen de temperaturas elevado (Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana, 1994).

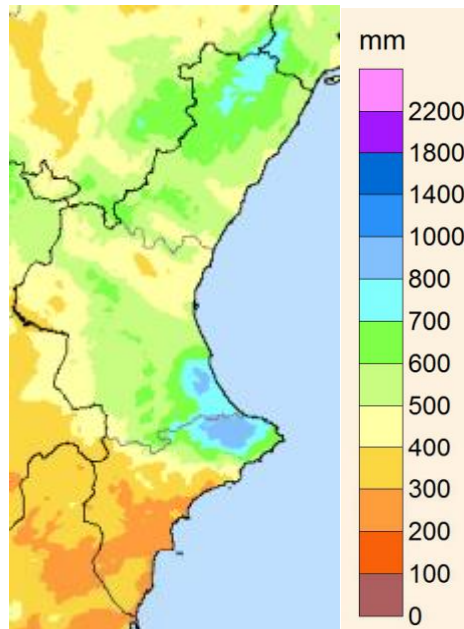
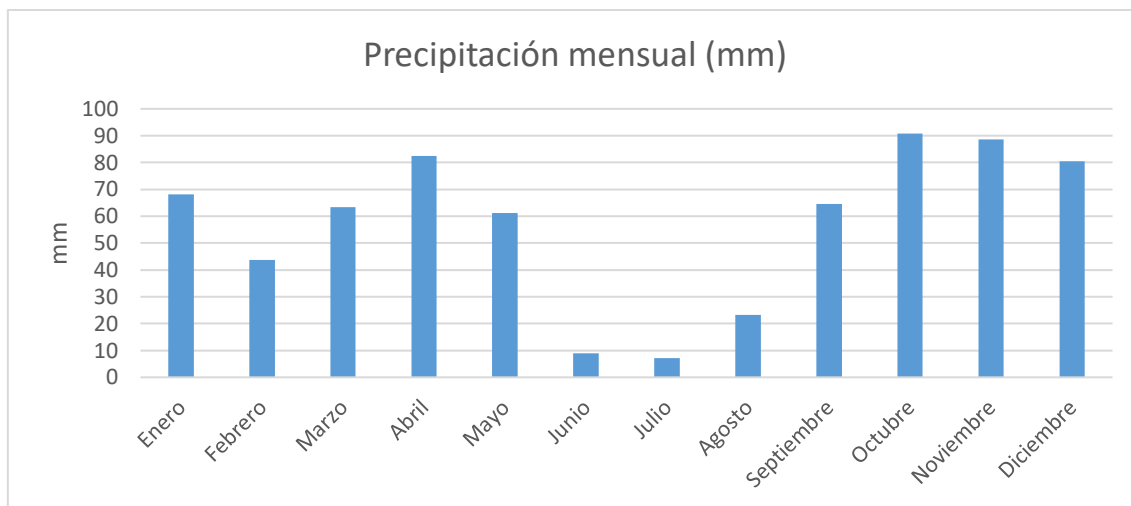


ILUSTRACIÓN 9 . PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DURANTE EL PERIODO 1981-2010. FUENTE: AEMET

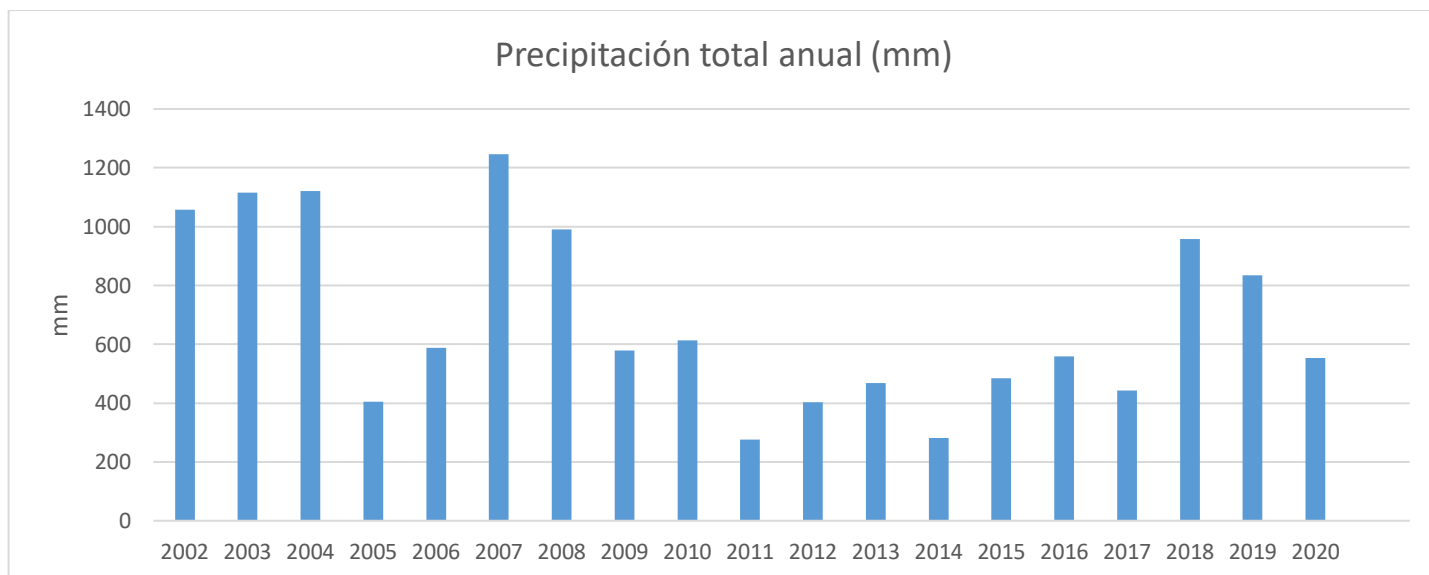
Como se puede observar en la Ilustración 9, las precipitaciones se caracterizan por ser principalmente en otoño, siendo éstas de carácter torrencial, llegando a producir inundaciones. Estas lluvias son provocadas principalmente por la orografía, debido a la orientación de la Sierra del Mondúver, que junto a los vientos de del Noreste y la altura del Mondúver, provocan una convección forzada. El aire húmedo, que en este caso es el viento supramediterráneo, al encontrarse con la orografía, este aire asciende a la tropopausa y se enfría hasta que llega al punto de saturación del vapor de agua, por lo que se genera lluvia. Además, estas lluvias suelen ser de carácter torrencial provocadas por las llamadas DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos). Estas depresiones de aire frío quedan atrapadas dentro de una masa de aire caliente provocando lo que se conoce como gota fría.

Para un análisis más exhaustivo del régimen de precipitaciones se presentan a continuación los datos en forma de gráficos, de las precipitaciones media mensual durante el periodo de 2002-2020.



GRÁFICA 3. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL. ESTACIÓN DE GANDDIA-MARXUQUERA. PERIODO 2002-2020. FUENTE: RED SIAR

Como se puede observar en la Gráfica 3, las precipitaciones se distribuyen principalmente en los meses de otoño y primavera, debido a los factores orográficos que se han comentado anteriormente. Otros datos a tener en cuenta para analizar las condiciones climáticas son los valores de precipitación anual acumulada, los cuales se presentan en el siguiente gráfico:



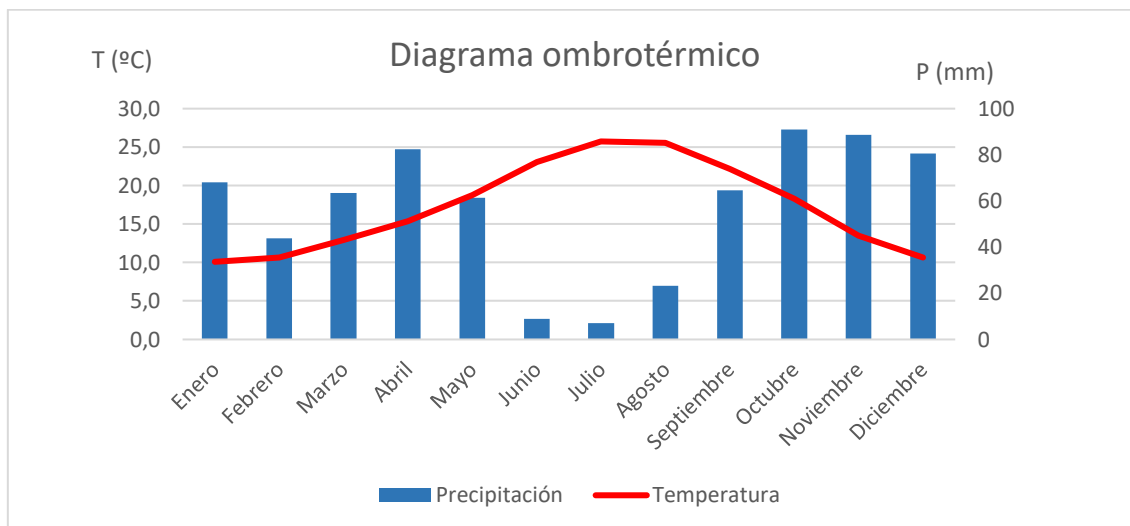
GRÁFICA 4. PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL. ESTACIÓN DE GANDIA-MARXUQUERA. PERIODO 2002-2020. FUENTE: RED SIAR

En cuanto al Gráfica 4 de precipitaciones anuales acumuladas, se observan periodos con unas precipitaciones más elevadas que otras más bajas, actualmente con una tendencia descendente, aunque habría que analizar periodos más largos para establecer causas más concretas. Hay que remarcar los años 2002, 2003, 2004 y 2007, donde las precipitaciones superan los 1000 mm, mientras que los años 2011 y 2014, donde las precipitaciones no llegan a los 300 mm.

Después de haber analizado la zona de estudio con gráficos, se puede afirmar que dicha zona está sometida a un régimen de precipitaciones torrencial, por lo que los humedales tienen una función de protección contra las inundaciones.

3.3.5. DIAGRAMA OMBROTÉRMICO

Con los datos de las temperaturas y las precipitaciones se puede elaborar un diagrama ombrotérmico de la zona de estudio. El diagrama muestra los periodos secos y húmedos de la serie de datos que sirve para caracterizar el tipo de clima de la zona. En este caso, debido a la falta de datos, debido a que, para determinar detenidamente el clima de una zona, es necesario al menos los datos relativos a 30 años, por lo que solo se pueden extraer tendencias coyunturales. El diagrama ombrotérmico se muestra en el siguiente gráfico:



GRÁFICA 5. DIAGRAMA OMBROTÉRMICO. ESTACIÓN DE GANDIA-MARXUQUERA. PERIODO 2002-2020. FUENTE: RED SIAR

El gráfico Gráfica 5 representa un diagrama ombrotérmico donde se pueden observar los periodos secos y húmedos de la zona. En cuanto al periodo seco, éste correspondería a los meses de verano donde las temperaturas son elevadas, mientras que las precipitaciones son escasas

En el diagrama ombrotérmico representado en el Gráfica 5 se pueden observar los periodos secos y húmedos de la zona. En cuanto al periodo seco correspondería a los meses de verano donde las temperaturas son elevadas con unas precipitaciones muy escasas. En cuanto al periodo húmedo, cabe destacar los meses de otoño debido al gran volumen de precipitaciones acumuladas. Esta tendencia va disminuyendo durante los meses de invierno donde no se acumulan los volúmenes de precipitación del otoño, pero sí se puede apreciar un descenso de las temperaturas medias. A continuación, en la primavera, se observa un aumento de las precipitaciones, aunque no tan elevadas como en el otoño, pero sí relevante para determinar las características climáticas de la zona, ya que estas precipitaciones también son de origen orográfico y caracterizan tanto climáticamente como geográficamente la zona de estudio.

Es importante conocer los aspectos climáticos más predominantes, como son las temperaturas y sobretodo las precipitaciones para zonas como los humedales, donde la evaporación de la lámina de agua es relevante, así como la disponibilidad de recursos hídricos

3.4. PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Para este trabajo se han utilizado el sensor satélite Worldview-3, el cual fue lanzado el 13 de agosto de 2014. La imagen fue procesada mediante el software ATCOR-2/3, versión 9 para obtener valores de reflectancia a nivel de suelo. Las imágenes obtenidas mediante este sensor pueden llegar a tener diferentes usos y aplicaciones, como por ejemplo en agricultura y medio ambiente, en la ingeniería, arquitectura y construcción, para su uso en instituciones educativas,

en gestión de recursos hídricos, o en el transporte e infraestructuras, etc. A continuación, se adjuntará una tabla con la ficha técnica de dicho sensor satélite:

Fecha de lanzamiento	13 de agosto de 2014
Órbita	Altitud: 617 Kilómetros
	Tipo: SunSync, 1:30 pm descendente
	Periodo de nodo: 97 minutos
Vida útil	Vida de la misión estimada: 7,25 años
	Vida útil estimada: De 10 a 12 años
Tamaño, masa y potencia de la astronave	Tamaño: 5,7 m de alto x 2,5 m de ancho, y 7,1 m de los paneles solares desplegados
	Masa: 2800 Kg
	Energía: panel solar de 3,1 kW, batería de 100 Ahr
Banda de sensores	Pancromático: 450 – 800 nm
	Multiespectral: (blue coastal, blue, Green, yellow, red, red edge, near-IR1, near-IR2) 400 nm - 1040 nm
	8 SWIR: 1195 nm - 2365 nm
	12 Bandas CAVIS: (desert clouds, aerosol-1, aerosol-2, aerosol-3, green, water-1, water-2, water-3, NDVI-SWIR, cirrus, snow) 405 nm - 2245 nm
Resolución del sensor	Nadir pancromático: 0,31 m, 0,34 m fuera del ángulo del nadir
	Nadir multispectral: 3,7 m, 4,10 m fuera del ángulo del nadir
	Nadir del CAVIS: 30 m
Capacidad	680.000 kilómetros cuadrados por día

TABLA 2. ESPECIFICACIONES DEL SATÉLITE. FUENTE: DIGITALGLOBE

El objetivo de este sensor satélite es recopilar las bandas Pancromáticas y Multiespectrales estándar, las bandas de longitud de onda en la región de infrarrojos de onda corta 8 bandas (SWIR) y 12 imágenes CAVIS. A continuación, se mostrarán todas las bandas de las que dispone el sensor satélite, y se remarcarán las bandas usadas para este trabajo (las que portan la celda de color verde):

Rango espectral	Nombre de la banda	Banda espectral	Nomenclatura
Banda pancromática	450 - 800 nm		B00
Banda Multiespectral en VNIR (Infrarrojo Cercano Visible:	Coastal Blue	400 - 450 nm	B01
	Blue	450 - 510 nm	B02
	Green	510 - 580 nm	B03
	Yellow	585 - 625 nm	B04
	Red	630 - 690 nm	B05
	Red Edge	705 - 745 nm	B06
	Near-IR1	770 - 895 nm	B07
	Near-IR2	860 - 1040 nm	B08
Multibanda en Rango espectral SWIR	SWIR-1	1195 - 1225 nm	B11
	SWIR-2	1550 - 1590 nm	B12
	SWIR-3	1640- 1680 nm	B13
	SWIR-4	1710 - 1750 nm	B14
	SWIR-5	2145 - 2185 nm	B15
	SWIR-6	2185 - 2225 nm	B16
	SWIR-7	2235 - 2285 nm	B17
	SWIR-8	2295 - 2365 nm	B18

TABLA 3. BANDAS UTILIZADAS POR EL SENSOR SATELITE WORLDVIEW-3. FUENTE: DIGITALGLOBE

Además de la imagen de satélite se han utilizado ortofotos del año 2020 obtenidas del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV)2020, CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat (resolución espacial de 0,25 m, <https://icv.gva.es/va/>), Google Earth ©, y una ortofoto obtenida a partir de un vuelo realizado con dron Phantom 4 con una cámara CMOS de 12 megapíxeles. Las fechas de estas imágenes son lo más cercanas a la obtención de las imágenes del sensor satélite Worldview-3.

Zona	Ortofoto ICV		Ortofoto del dron		Worldview-3
	Fecha	Resolución espacial	Fecha	Resolución espacial	Fecha
Marjal de Gandia	31/05/2020	0,25 m	17/02/2021	0,05 m	11/11/2020
	02/05/2020	0,25 m	17/02/2021	0,05 m	11/11/2020

TABLA 4. LISTA DE IMÁGENES UTILIZADAS PARA ESTE TRABAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para esta zona, se ha delimitado los polígonos de agua y de no agua. Los polígonos de agua más pequeños de aproximadamente 15 m², han sido excluidos, debido a la resolución de las imágenes SWIR del sensor del Worldview-3, menos en aquellos índices donde solo se utilicen imágenes multiespectrales, donde el tamaño del píxel es de dos metros, por lo que se excluirán en esos casos las masas de agua de 4 m². Los polígonos de agua y no agua han sido delimitados a través del examen visual usando como mapa base una imagen de alta resolución, todo esto realizado con el software de ArcGis 10.2 (ESRI 2007. ArcGIS Desktop: Release 10.2 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute).

La información espectral ha sido extraída de las imágenes del sensor satélite worldview-3 para calcular los 6 índices de firmas espectrales mostrados en la Tabla 5 para la zona de estudio. Estos índices clasifican como agua/no agua a un valor de umbral, pero diferentes autores proponen diferentes valores del umbral para un mismo índice. Por eso se pretende definir un único valor para el umbral, así como la proposición de otros índices para diferenciar las zonas de agua/no agua con óptimos resultados.

Para eso, se han probado todos los valores del umbral desde el -0,75 hasta el 0,75 en intervalos de 0,05, excepto para el índice AWEI(SH) (AutomatedWater Extraction Index, shadow), cuyos

valores del umbral serán de entre -50 hasta - 5000, en intervalos detallados en la sección de resultados.

ÍNDICE	ECUACIÓN	FUENTE	BANDAS WORLDVIEW- 3
NDWI	$[(\text{GREEN} - \text{NIR})/(\text{GREEN} + \text{NIR})]$	(McFeeters, 1996)	$[(\text{B03} - \text{B07})/(\text{B03} + \text{B07})]$
MNDWI	$[(\text{GREEN} - \text{SWIR})/(\text{GREEN} + \text{SWIR})]$	(Xu, 2006)	$[(\text{B03} - \text{B11})/(\text{B03} + \text{B11})]$
RE-NDWI	$[(\text{GREEN} - \text{RE})/(\text{GREEN} + \text{RE})]$	(Klemenjak et al., 2012)	$[(\text{B03} - \text{B06})/(\text{B03} + \text{B06})]$
AWEI(SH)	$\text{BLUE} + 2.5 - \text{GREEN} - 1.5 * (\text{NIR} + \text{SWIR}) - 0.25 * \text{SWIR}$	(Feyisa et al., 2014)	$[\text{B02} + 2.5 - \text{B03} - 1.5 * (\text{B08} + \text{B011}) - 0.25 * \text{B11}]$
SWIR_BLUE	$[(\text{BLUE} - \text{SWIR})/(\text{BLUE} + \text{SWIR})]$	Este trabajo	$[(\text{BLUE} - \text{SWIR})/(\text{BLUE} + \text{SWIR})]$
IR_RED	$(\text{RED} - \text{NIR})/(\text{RED} + \text{NIR})$	Este trabajo	$[(\text{B05} - \text{B07})/(\text{B05} + \text{B07})]$

TABLA 5. ÍNDICES ESPECTRALES CALCULADOS

Para la validación de los resultados obtenidos de las imágenes del sensor satélite Worldview-3, se ha realizado trabajo de campo, yendo directamente a la zona de estudio, desplazándonos por él y registrando aquellas zonas de agua, para que puedan diferenciarse mediante el sensor satélite Worldview-3, con un dispositivo GPS y marcándolas como waypoints, se registraron también masas de no agua cercanas a las masas de agua, para poder delimitar las zonas de agua y no agua y por consiguiente, calcular la eficacia de cada índice. Para este trabajo, al principio se registraron 74 puntos diferentes (38 de agua y 36 de no agua). Los puntos identificados como “agua” fueron desplazados a una parte más central de la masa de agua, debido a que como la toma de puntos se realizaba de forma manual, desplazándose a las masas de agua para tomar los puntos, con un dispositivo GPS con una precisión de dos a tres metros, podría ser que, a la hora de realizar los umbrales de los diferentes índices, al estar los puntos tomados tan cerca de la delimitación de las masas de agua, estos no pudieran coincidir con los resultados reales. Así pues, estos puntos tomados de manera manual fueron filtrados debido a que algunos puntos no tenían una gran superficie de agua, o cuyos valores de las bandas entre los puntos de agua y no agua, tanto multispectrales como multibanda SWIR, eran notablemente irregulares, por lo que finalmente se quedaron en 54 (23 de agua y 31 de no agua). Además de estos puntos, las imágenes obtenidas por el dron, permitieron añadir más puntos considerados como agua y no agua, ya que, al tener un tamaño del pixel de 0,05 metros, se podrán diferenciar fácilmente la clasificación de estos puntos. En total se definieron 66 puntos (32 de agua y 34 de no agua. Para todos estos puntos, se han comparado la clasificación de cada índice (6 índices en la Tabla 5) para cada uno de los umbrales con las ortofotos reales, para asegurarnos de una correcta clasificación. Para esta validación se ha utilizado el Índice de Fiabilidad Global, que consiste en dividir el número de píxeles correctamente clasificados entre el total de píxeles muestreados.



ILUSTRACIÓN 10. MAPA DE LA TOMA DE PUNTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.5. ÍNDICES

En esta parte del trabajo se va a realizar una descripción de los índices utilizados para este trabajo, así como la explicación de los cálculos que se van a realizar y cómo se va a realizar la validación.

3.5.1. NDWI

Para este índice se ha decidido utilizar el planteamiento del método McFeeters, en el que se usan la banda multiespectral verde, y el infrarrojo cercano. La selección de estas bandas se realiza aprovechando: (1) maximizar la reflectancia típica de las características del agua mediante el uso de longitudes de onda de luz verde; (2) minimizar la baja reflectancia de NIR debido a las características del agua; y (3) aprovechar la alta reflectancia de la vegetación terrestre y de las características del suelo (McFeeters, 1996). El método McFeeters aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} = \frac{B03 - B07}{B03 + B07} \quad \text{ecuación 1}$$

Cuando la ecuación se utiliza para procesar una imagen de satélite multiespectral que contiene la banda verde visible reflejada y una banda de infrarrojo cercano, las características del agua tendrán valores positivos, mientras que la vegetación y las características del suelo tendrán valores negativos o cercanos a cero, debido a que la reflectancia del infrarrojo cercano es superior a la reflectancia de la banda verde.

3.5.2. MNDWI

Este índice es una variación del índice NDWI (McFeeters, 1996) ,debido a que, en zonas modificadas por el hombre, la información extraída del agua a menudo se mezcla con el ruido de las zonas construidas por el hombre, esto significa que algunas construcciones hechas por el

hombre, pueden tener valores positivos en la imagen obtenida utilizando el NDWI. Por esto, para este índice, en vez de utilizar el infrarrojo cercano, se utilizarán las bandas SWIR (Short-Wave InfraRed), que son las bandas del infrarrojo de onda corta, que en algunos casos sus reflectancias suelen ser más elevadas que las reflectancias de la banda verde (Xu, 2006). De todas maneras, los valores de las zonas modificadas por el hombre, seguirán teniendo valores negativos. Así quedaría la ecuación del nuevo índice modificado:

$$\frac{GREEN-SWIR}{GREEN+SWIR} = \frac{B03 - B11}{B03 + B11} \quad \text{ecuación 2}$$

Al igual que en el caso del índice NDWI, los valores considerados como agua tendrán valores positivos, mientras que la vegetación y las características del suelo continuarán teniendo valores negativos, aunque también se pueden obtener buenos resultados con valores del umbral negativos.

3.5.3. RE-NDWI

Este índice tiene la misma finalidad que el índice MNDWI, que es el poder diferenciar las zonas de agua de las zonas construidas por el hombre, por eso se propuso el Red Edge Normalized Difference Water (RE-NDWI), que usa la banda B06 en vez de la B07, donde las zonas de agua se diferencian con las de la vegetación y el suelo, y a su vez, de las construcciones hechas por el hombre (Klemenjak et al., 2012). Al igual que en el resto de índices, los valores negativos o cercanos a 0 corresponderán a zonas de suelo, así como a las zonas hechas por el hombre, mientras que los valores positivos corresponderán a las zonas de agua. La ecuación de este índice quedaría tal que así:

$$\frac{GREEN-RED\ EDGE}{GREEN+RED\ EDGE} = \frac{B03 - B06}{B03 + B06} \quad \text{ecuación 3}$$

Al igual que en el resto de índices, los valores negativos o cercanos a 0 corresponderán a zonas de vegetación y de suelo, así como a las zonas hechas por el hombre, mientras que los valores positivos corresponderán a las zonas de agua, pudiendo darse valores negativos del umbral óptimos.

3.5.4. AWEI

Este índice forma parte del Automated Water Extraction Index (AWEI), el cual fue desarrollado para aumentar el contraste entre las zonas de agua y zonas de no agua, con el objetivo de diferenciar las zonas de agua y no agua añadiendo y aplicando diferentes coeficientes (Feyisa et al., 2014). De este índice se pueden sacar dos ecuaciones, en las cuales todos los coeficientes han sido seleccionados detalladamente mediante combinaciones aritméticas, dependiendo de las bandas elegidas por las propiedades reflectantes de diferentes tipos de cubiertas del suelo. Otro de los usos de este índice aparte de separar las superficies oscuras de las zonas de agua, es la de separar las construcciones hechas por el hombre respecto a las zonas de agua. Para estos índices hay que tener en cuenta que estos coeficientes también han sido seleccionados para ayudar a encontrar un valor del umbral general para todas las masas de agua, donde los puntos de agua se encontrarán por encima del 0 mientras que las zonas de no agua se encontrarán por debajo del 0, por lo que es recomendable a realizar intervalos del umbral a partir del umbral 0 hacia abajo, es decir, números negativos, hasta encontrar el umbral más óptimo.

3.5.4.1. AWEI(NSH)

Este es el primer índice que deriva del Automated Water Extraction Index, el cual ha sido formulado para eliminar efectivamente las zonas de no agua en áreas modificadas por el hombre, en aquellos casos en los que las sombras no sean un gran problema. La ecuación es tal que así:

$$AWEI_{nsh} = 4 * (GREEN - SWIR) - 0,25 * NIR + 2,75 * SWIR \quad \text{ecuación 4}$$

En esta ecuación se cuadruplica la diferencia entre la banda verde y el SWIR para conseguir números positivos elevados para las zonas de agua, y números negativos elevados para el caso de las zonas de no agua. Además, para eliminar las zonas de agua de otras que pueden tener reflectancias similares, se utilizan las bandas del NIR y del SWIR para hacer que las zonas de no agua tengan unos valores todavía más negativos, sin embargo, esto no supondrá ningún problema para las zonas de agua, ya que los valores de la reflectancia de las bandas del NIR y del SWIR son muy bajos, mientras que los de las zonas de no agua suelen ser bastante más elevados. Además de esto, en el caso de las sombras, estas suelen tener una baja reflectancia en la gran mayoría de bandas, sin embargo, esta puede cambiar dependiendo de las características de la superficie. Otro problema que puede tener esta ecuación es que puede haber valores de sombras, que al igual que las zonas de agua, estas pueden dar positivo. A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos mediante el índice $AWEI_{snh}$ con el índice de fiabilidad global:

3.5.4.2. AWEI(SH)

Este índice se suele utilizar para mejorar la eliminación de las zonas de sombra que el $AWEI_{snh}$ no ha sido capaz de eliminar, ya que este índice es el utilizado para aquellas zonas donde las sombras sean un gran problema y se quieran extraer las zonas de agua con la mayor precisión. Sin embargo, en aquellas zonas con una alta reflectancia como pueden ser las zonas de hielo, nieve o tejados de algunos edificios en zonas urbanas, probablemente estas zonas sean confundidas y clasificadas como zonas de agua. La ecuación es la siguiente:

$$AWEI_{sh} = BLUE + 2,5 * GREEN - 1,5 * (SWIR + NIR) - 0,25 * SWIR \quad \text{ecuación 5}$$

En esta ecuación se suman la banda azul y la verde multiplicada para que las zonas consideradas como agua, tengan un valor elevado, sin embargo, las reflectancias de las zonas consideradas como no agua también pueden dar valores similares al de las zonas consideradas como agua, así que para poder diferenciar las zonas de agua y no agua, se resta el valor de la banda del NIR más la del SWIR, debido a que los valores de la reflectancia en las zonas consideradas como no agua suelen ser muy elevados, por lo que las zonas de no agua tendrán valores negativos muy elevados, mientras que en las zonas consideradas como agua, suelen tener unos valores tan bajos de reflectancia, que apenas restan, con lo que el resultado seguirá teniendo un valor positivo elevado. Ahora se mostrarán los datos obtenidos con el índice de fiabilidad global:

3.5.5. SWIR_BLUE

Para este trabajo he propuesto dos índices diferentes para comprobar si es posible conseguir unos resultados óptimos e incluso mejores que los ya planteados anteriormente a la hora de extraer con precisión aquellas zonas de agua respecto a la superficie terrestre.

Primero he propuesto una variación del índice del MNDWI (Xu, 2006), en el que en vez de utilizar la banda B03 (Verde), he utilizado la banda B02 (Azul) para comprobar si se obtienen resultados

similares o mejores con dicha banda, ya que la banda azul suele presentar una mayor penetración en masas de agua (GISGeography, 2018), mientras que la verde, su máximo pico es con la vegetación terrestre en el rango visible. También hay que tener en cuenta que la banda azul se suele utilizar en aguas más profundas, como en mares y océanos, pero aun así podría servir para nuestra zona de estudio. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\frac{BLUE-SWIR}{BLUE+SWIR} = \frac{B02 - B11}{B02 + B11} \quad \text{ecuación 6}$$

En mi índice propuesto, al igual que el resto los valores considerados como agua tendrían valores positivos, mientras que los valores considerados como no agua serían negativos o cercanos a 0. Al igual que he hecho con el índice del MNDWI, he seleccionado 3 bandas del SWIR distintas para observar cómo se comporta el índice para cada longitud de onda. Para poder comparar más adelante, se han elegido las mismas longitudes de onda del SWIR que en el apartado del MNDWI.

3.5.6. IR_RED

Para el segundo de los índices he elegido las bandas B05 (roja) y la B07 (NIR), debido a la diferencia de reflectancia que hay entre las zonas consideradas como agua y no agua, tanto como para la banda B05 como la banda B07. La banda roja se suele utilizar para diferenciar tipos de suelo, así como para ayudar a diferenciar las construcciones hechas por el hombre (GISGeography, 2018). Se podría decir que tiene la misma finalidad de la banda RE-NDWI, que también utiliza la banda roja, pero en ese caso es la banda B06, y la que se va a utilizar es la banda B05. La ecuación sería la siguiente:

$$\frac{RED-NIR}{RED+NIR} = \frac{B06 - B07}{B06 + 07} \quad \text{ecuación 7}$$

Al igual que en el resto de índices, los valores considerados como agua tendrán un valor positivo, mientras que los valores considerados como no agua, tendrán unos valores negativos o cercanos al 0.

4. RESULTADOS

4.1. NDWI

	NDWI		NDWI
-0,75	0,48	0,00	0,91
-0,70	0,48	0,05	0,94
-0,65	0,48	0,10	0,95
-0,60	0,48	0,15	1,00
-0,55	0,48	0,20	1,00
-0,50	0,48	0,25	1,00
-0,45	0,48	0,30	1,00
-0,40	0,50	0,35	1,00
-0,35	0,52	0,40	1,00
-0,30	0,52	0,45	1,00
-0,25	0,53	0,50	1,00
-0,20	0,58	0,55	1,00
-0,15	0,64	0,60	1,00
-0,10	0,79	0,65	1,00
-0,05	0,86	0,70	0,95
		0,75	0,95

TABLA 6. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE NDWI CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede observar en la Tabla 6, los puntos de no agua tienen unos valores entre -0,75 y 0,15, cumpliéndose así la premisa de que los puntos considerados como no agua tienen valores negativos o cercanos a 0. Además, como se puede ver, el índice de fiabilidad global alcanza un valor de 1 entre los umbrales de 0,15 a 0,65. A partir de este último umbral, algunos de los valores de agua pasan a ser incorrectos. Hay también que tener en cuenta que al tener los puntos situados más al interior de las masas de agua, estos resultados pueden diferir en los bordes de dichas masas de agua. También hay que destacar que este índice puede detectar masas de agua con una extensión mínima de 4 m² ya que el tamaño del píxel es de 2 m. Todo esto se puede comprobar en la Ilustración 11.

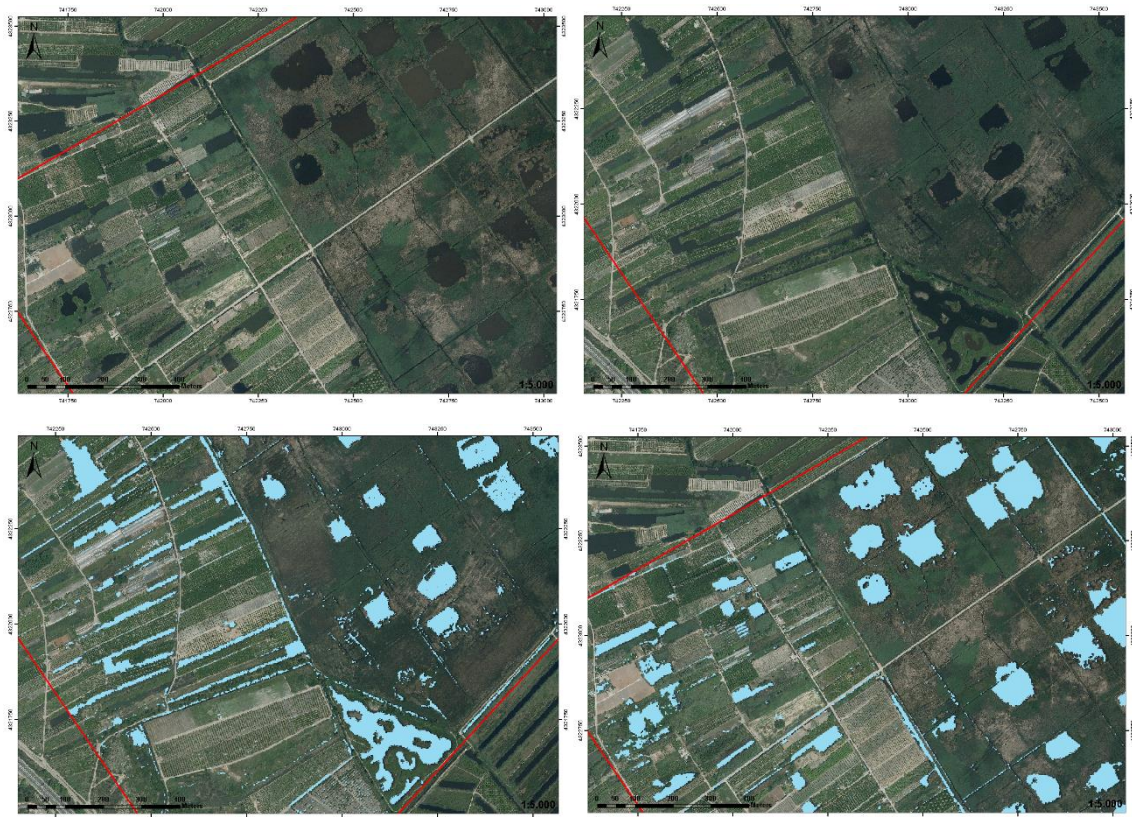


ILUSTRACIÓN 11. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE NDWI (UMBRAL 0,35)

4.2. MNDWI

	MNDWI_1	MNDWI_4	MNDWI_8
-0,75	0,48	0,48	0,48
-0,7	0,48	0,48	0,48
-0,65	0,48	0,48	0,48
-0,6	0,48	0,48	0,48
-0,55	0,48	0,48	0,48
-0,5	0,52	0,48	0,48
-0,45	0,53	0,48	0,48
-0,4	0,59	0,48	0,48
-0,35	0,64	0,48	0,48
-0,3	0,71	0,55	0,48
-0,25	0,77	0,64	0,48
-0,2	0,82	0,73	0,48
-0,15	0,86	0,74	0,48
-0,1	0,89	0,92	0,55
-0,05	0,95	0,98	0,58
0	1,00	0,98	0,61
0,05	1,00	0,98	0,65
0,1	1,00	1,00	0,71
0,15	1,00	1,00	0,80
0,2	1,00	1,00	0,85
0,25	1,00	1,00	0,88
0,3	1,00	1,00	0,94
0,35	0,85	1,00	1,00
0,4	0,77	1,00	1,00
0,45	0,67	1,00	1,00
0,5	0,67	1,00	1,00
0,55	0,52	0,94	1,00
0,6	0,52	0,85	1,00
0,65	0,52	0,64	1,00
0,7	0,52	0,58	0,92
0,75	0,52	0,53	0,76
PROMEDIO	0,72	0,76	0,7

TABLA 7. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE MNDWI PARA 3 BANDAS SWIR CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para este índice, se han seleccionado 3 bandas distintas del SWIR, eligiendo la banda B11, B14 y B18 con una longitud de onda de 1195 - 1225 nm, 1710 - 1750 nm, 2295 - 2365 nm respectivamente, para observar cómo se comporta el índice a diferentes longitudes de onda. Se puede observar que en la banda SWIR B11, todos los valores considerados como no agua tienen un valor máximo en el umbral de -0,05, mientras que a medida que se utiliza una banda SWIR con una longitud de onda mayor, este umbral va aumentando hasta 0,05 en la banda B14, y hasta 0,35 en la banda B18. También se comprueba que el índice de fiabilidad global alcanza el valor de 1 entre los umbrales de 0 a 0,3 en la banda B11, de 0,1 a 0,5 en la banda B14, y de 0,35 a 0,65 para la banda B18, siendo los intervalos del umbral de la banda B14, los que mayor rango

en los valores de los umbrales abarcaron el 100% del índice de fiabilidad global. Finalmente, para cada resultado del índice MNDWI con distinta banda SWIR, se ha realizado una media de todos los resultados obtenidos del índice de fiabilidad global, para cada una de las bandas SWIR (es decir, una media de todos los valores por cada columna de la Tabla 7, con el fin de averiguar cuál de las tres bandas SWIR utilizadas tiene un valor medio más elevado, que significará que hay mayor probabilidad de conseguir un índice de fiabilidad global más cercano a 1 para un único valor del umbral de cada uno de los índices MNDWI con una banda SWIR distinta. En este caso el índice con la banda SWIR que tiene un promedio mayor es el índice MNDWI correspondiente a la banda SWIR B14, que más adelante será utilizada para comparar los resultados obtenidos con el resto de los índices. Los resultados obtenidos pueden diferir en los bordes de las propias masas de agua ya que los puntos empleados se encuentran en las zonas interiores de las masas de agua. A diferencia del índice NDWI, al usar una banda SWIR con un tamaño de píxel de 3,7 metros, el área máxima que se puede extraer será de aproximadamente de 15 m².

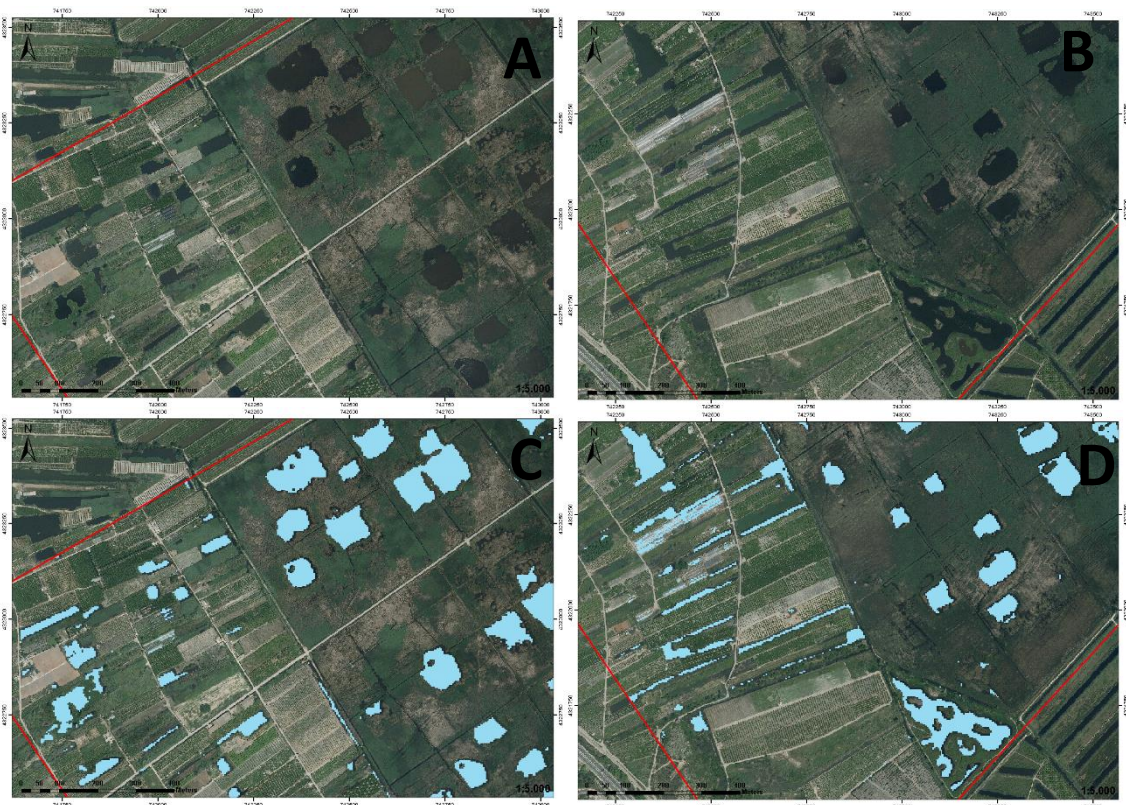


ILUSTRACIÓN 12. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE MNDWI (UMBRAL 0,35)

4.3. RE-NDWI

	RE-NDWI		RE-NDWI
-0,75	0,48	0	0,64
-0,7	0,48	0,05	0,76
-0,65	0,48	0,1	0,83
-0,6	0,48	0,15	0,91
-0,55	0,48	0,2	0,92
-0,5	0,48	0,25	0,95
-0,45	0,48	0,3	0,98
-0,4	0,48	0,35	0,98
-0,35	0,48	0,4	0,98
-0,3	0,48	0,45	0,98
-0,25	0,48	0,5	0,98
-0,2	0,48	0,55	1,00
-0,15	0,48	0,6	0,98
-0,1	0,50	0,65	0,98
-0,05	0,56	0,7	0,98
		0,75	0,95

TABLA 8. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE RE-NDWI CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede observar en la Tabla 8, a diferencia de en el resto de índices, en este caso solo se encuentra un único umbral en el que el índice de fiabilidad global alcanza el 1, que se encuentra en el umbral de 0,55, mientras que en los umbrales próximos casi alcanzan el valor máximo, lo que puede significar que, para uno o un par de puntos, este índice no será el más óptimo.

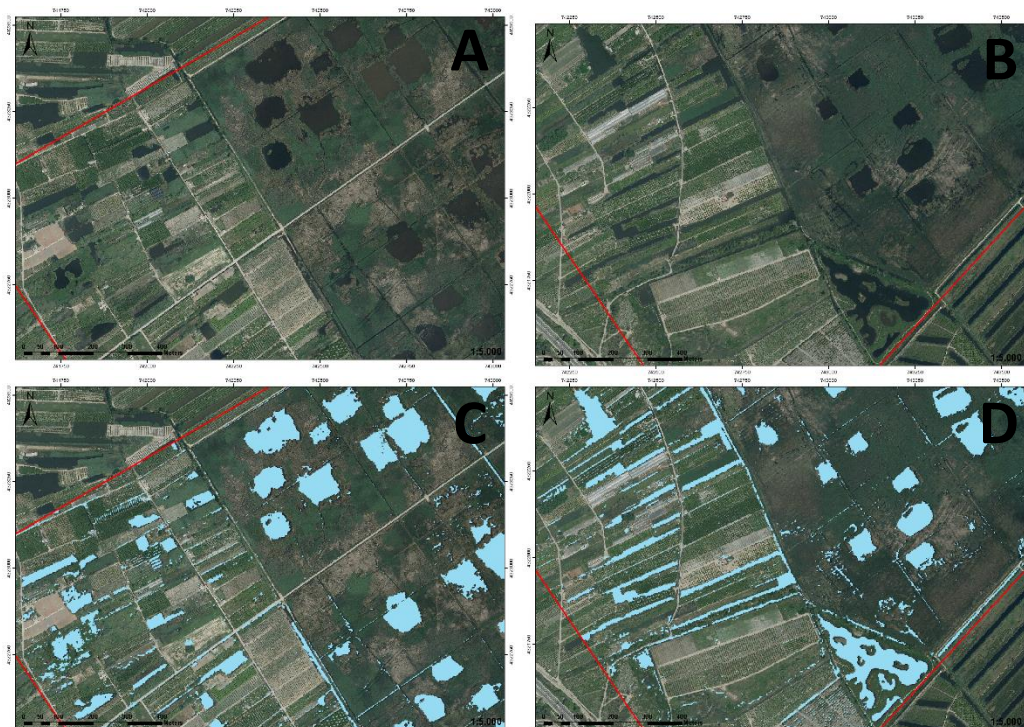


ILUSTRACIÓN 13. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE RE-NDWI (UMBRAL 0,55)

4.3.1. AWEI(SH)

	AWEI(SH)_1	AWEI(SH)_4	AWEI(SH)_8
0	0,98	0,92	0,68
-50	0,97	0,91	0,64
-100	0,97	0,89	0,64
-200	0,97	0,88	0,61
-300	0,97	0,86	0,59
-400	0,95	0,85	0,59
-500	0,94	0,85	0,59
-600	0,92	0,85	0,59
-700	0,92	0,85	0,58
-800	0,92	0,82	0,56
-900	0,89	0,82	0,55
-1000	0,82	0,82	0,55
-1500	0,77	0,71	0,52
-2000	0,70	0,61	0,50
-2500	0,64	0,58	0,50
-3000	0,56	0,53	0,50
-3500	0,50	0,52	0,48
-4000	0,50	0,50	0,48
-4500	0,50	0,50	0,48
-5000	0,50	0,50	0,48
	0,80	0,74	0,56

TABLA 9. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE AWEI(SH) CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para este índice, se han seleccionado 3 bandas distintas del SWIR, eligiendo la banda B11, B14 y B18 con una longitud de onda de 1195 - 1225 nm, 1710 - 1750 nm, 2295 - 2365 nm respectivamente, para observar cómo se comporta el índice a diferentes longitudes de onda. Se puede observar que donde se alcanza el mayor valor del índice de fiabilidad global es en el índice donde se utiliza la banda SWIR con una longitud de onda menor, es decir, la banda B11, sin embargo, ésta no alcanza a tener el valor máximo para el índice de fiabilidad global, y a medida que se utiliza una banda SWIR con una longitud de onda mayor, se obtienen peores resultados. Para la posterior comparación con el resto de índices se va a utilizar únicamente la banda que tenga un valor del índice de fiabilidad global más elevado, que en este caso será el índice AWEI(SH)_1.

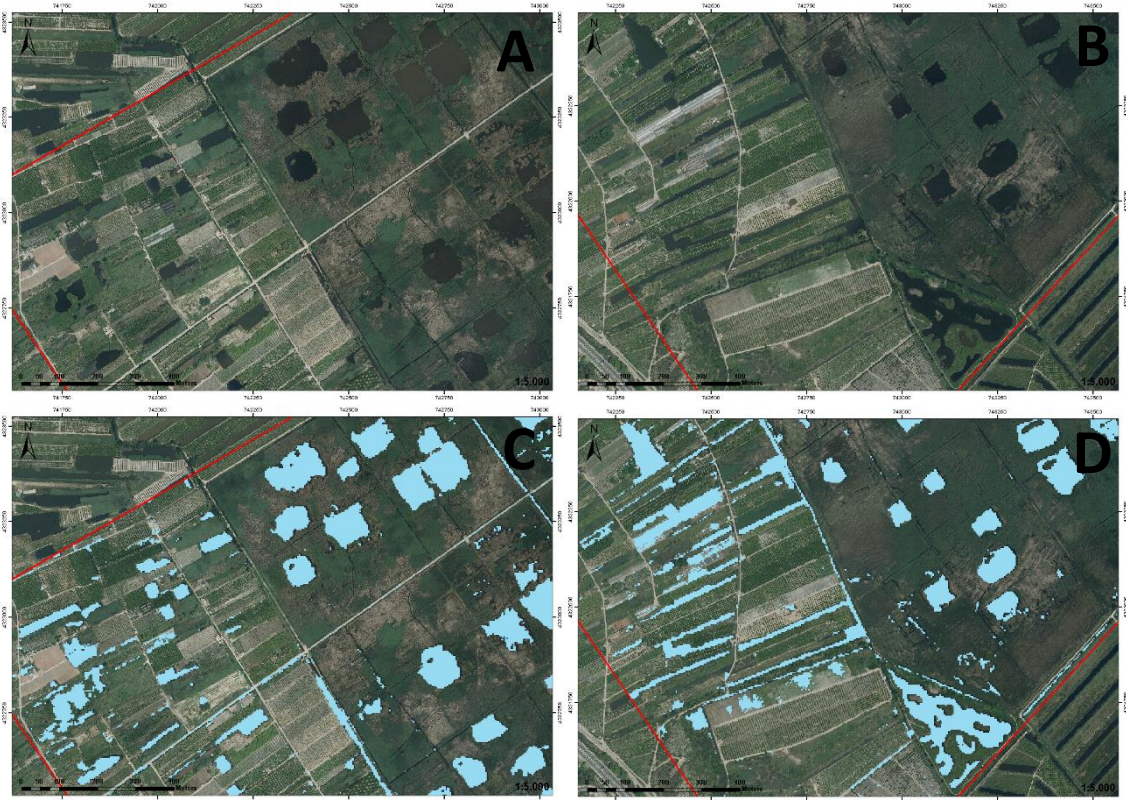


ILUSTRACIÓN 14. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE AWEI(SH) (UMBRAL 0)

4.4. ÍNDICES PROPUESTOS

4.4.1. SWIR_BLUE

	Índice 1_1	Índice 1_4	Índice 1_8
-0,75	0,48	0,48	0,48
-0,7	0,48	0,48	0,48
-0,65	0,48	0,48	0,48
-0,6	0,48	0,48	0,48
-0,55	0,48	0,48	0,48
-0,5	0,53	0,48	0,48
-0,45	0,61	0,48	0,48
-0,4	0,62	0,52	0,48
-0,35	0,73	0,59	0,48
-0,3	0,80	0,65	0,48
-0,25	0,86	0,70	0,48
-0,2	0,89	0,79	0,48
-0,15	0,95	0,86	0,50
-0,1	0,98	0,91	0,53
-0,05	1,00	0,97	0,58
0	1,00	1,00	0,59
0,05	1,00	1,00	0,64
0,1	1,00	1,00	0,65
0,15	1,00	1,00	0,80
0,2	1,00	1,00	0,83
0,25	1,00	1,00	0,86
0,3	0,97	1,00	0,91
0,35	0,85	1,00	0,97
0,4	0,71	1,00	1,00
0,45	0,58	1,00	1,00
0,5	0,52	0,95	1,00
0,55	0,52	0,91	1,00
0,6	0,52	0,77	1,00
0,65	0,52	0,61	1,00
0,7	0,52	0,53	0,98
0,75	0,52	0,52	0,89
	0,73	0,76	0,70

TABLA 10. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE SWIR_BLUE PARA 3 BANDAS SWIR CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Al igual que en el MNDWI, a medida que la longitud de onda del SWIR es mayor, se encontrará el mayor índice de fiabilidad en umbrales más elevados, siendo el de la banda SWIR B11 (la más corta) donde se encuentra un índice de fiabilidad global igual a 1 a partir del umbral de -0,05 hasta el umbral de 0,25, sin embargo, es la banda B14 la que consigue mantener un mayor rango de valores en los umbrales con un resultado de igual a 1, siendo este entre el umbral de 0 hasta el umbral de 0,45. Finalmente, al igual que en el índice del MNDWI, la banda correspondiente a la B18, es donde se alcanza un índice de fiabilidad global igual a 1. Al igual que se ha realizado en el índice del MNDWI, se ha calculado una media del índice de fiabilidad global para cada una

de las bandas SWIR, para saber cual tiene un mayor índice de fiabilidad global a lo largo de todos los umbrales realizados, y como resultado se obtiene que donde se consigue el resultado más alto vuelve a ser el índice con la banda SWIR intermedia, es decir, la banda B14, así que esta es la que se utilizó para comparar. Al igual que el índice MNDWI, este índice propuesto servirá para detectar masas de agua con una extensión mínima de 15 m².

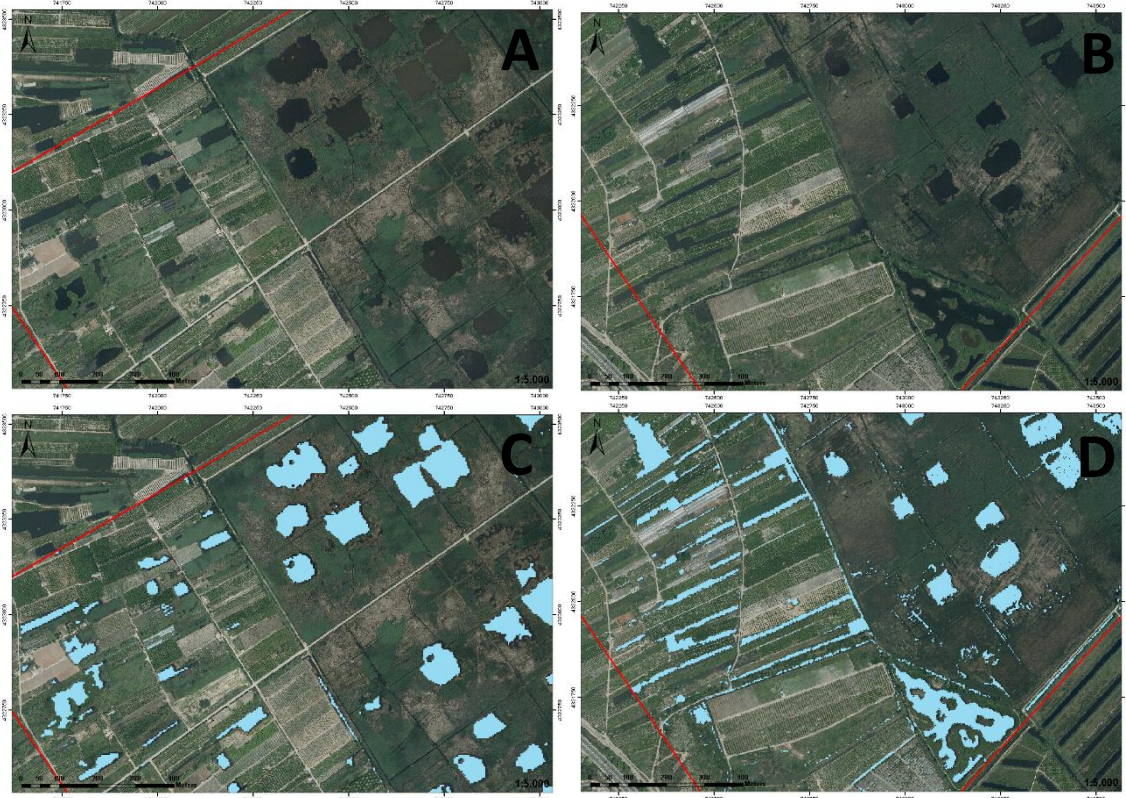


ILUSTRACIÓN 15. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE SWIR_BLUE (UMBRAL 0,35)

4.4.2. IR_RED

	ÍNDICE_2		ÍNDICE_2
-0,75	0,48	0	0,85
-0,7	0,48	0,05	0,91
-0,65	0,48	0,1	0,98
-0,6	0,48	0,15	1,00
-0,55	0,48	0,2	1,00
-0,5	0,48	0,25	1,00
-0,45	0,50	0,3	1,00
-0,4	0,50	0,35	1,00
-0,35	0,52	0,4	1,00
-0,3	0,53	0,45	1,00
-0,25	0,56	0,5	1,00
-0,2	0,58	0,55	1,00
-0,15	0,68	0,6	0,98
-0,1	0,68	0,65	0,97
-0,05	0,74	0,7	0,95
		0,75	0,82

TABLA 11. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA EL ÍNDICE IR_RED CON EL RANGO DE UMBRAL DE -0,75 A 0,75. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la tabla (insertar número de la tabla) se puede observar que a partir del umbral de 0,15 hasta el umbral 0,55, se consigue un índice de fiabilidad global igual a 1. Para este índice también se cumple con la premisa de que los puntos considerados como no agua tienen unos valores negativos o cercanos a 0, siendo el más alto en el intervalo de 0,1 a 0,15. Al igual que el índice NDWI, este índice puede ser utilizado para la detección de masas de agua con una extensión mínima de 4 m². Los resultados también pueden diferir en las zonas situadas más al borde de las masas de agua.

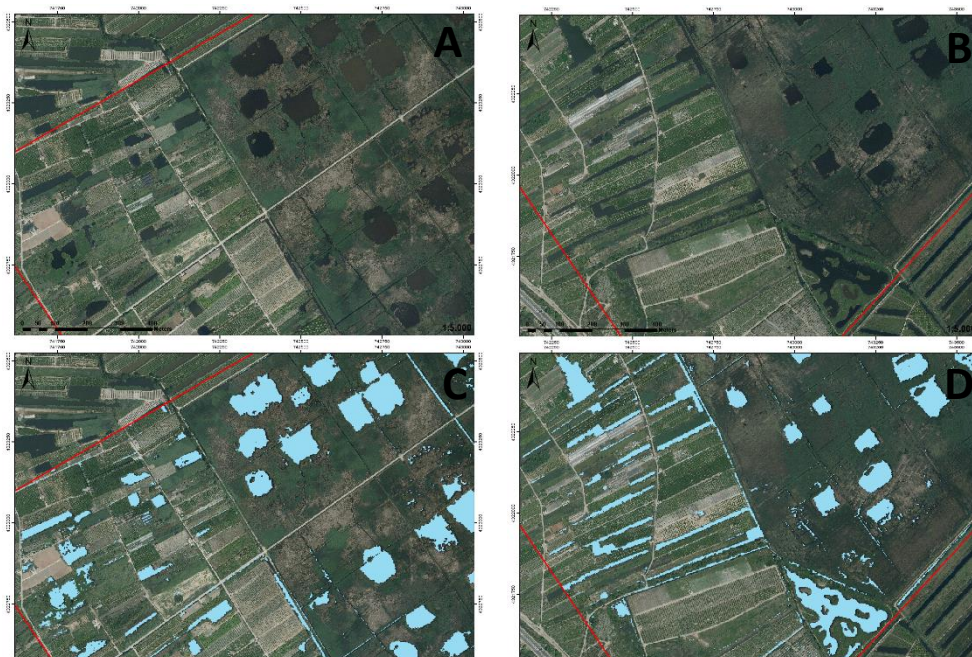


ILUSTRACIÓN 16. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A,B): ORTOFOTO, (C, D): ÍNDICE IR_RED (UMBRAL 0,35)

4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez se han obtenido los datos de todos los índices estudiados, así como sus valores de sus umbrales, entre los umbrales comprendidos entre -0,75 y +0,75, en intervalos de 0,05, ya se pueden comparar para comprobar cuál sería el índice a usar más óptimo para la cartografía de la Marjal de la Safor. Ahora se presentará una tabla con los umbrales de todos los índices que se han realizado durante este trabajo:

	NDWI	MNDWI_4	RE-NDWI	SWIR_BLUE	IR_RED	Promedio		AWEI(SH)_1
-0,75	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,7	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,65	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,6	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,55	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,5	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,4848		
-0,45	0,48	0,48	0,48	0,48	0,50	0,4879		
-0,4	0,50	0,48	0,48	0,52	0,50	0,4970		
-0,35	0,52	0,48	0,48	0,59	0,52	0,5182		
-0,3	0,52	0,55	0,48	0,65	0,53	0,5455		
-0,25	0,53	0,64	0,48	0,70	0,56	0,5818		
-0,2	0,58	0,73	0,48	0,79	0,58	0,6303	0	0,98
-0,15	0,64	0,74	0,48	0,86	0,68	0,6818	-50	0,97
-0,1	0,79	0,92	0,50	0,91	0,68	0,7606	-100	0,97
-0,05	0,86	0,98	0,56	0,97	0,74	0,8242	-200	0,97
0	0,91	0,98	0,64	1,00	0,85	0,8758	-300	0,97
0,05	0,94	0,98	0,76	1,00	0,91	0,9182	-400	0,95
0,1	0,95	1,00	0,83	1,00	0,98	0,9545	-500	0,94
0,15	1,00	1,00	0,91	1,00	1,00	0,9818	-600	0,92
0,2	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	0,9848	-700	0,92
0,25	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,9909	-800	0,92
0,3	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,9970	-900	0,89
0,35	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,9970	-1000	0,82
0,4	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,9970	-1500	0,77
0,45	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,9970	-2000	0,70
0,5	1,00	1,00	0,98	0,95	1,00	0,9879	-2500	0,64
0,55	1,00	0,94	1,00	0,91	1,00	0,9697	-3000	0,56
0,6	1,00	0,85	0,98	0,77	0,98	0,9182	-3500	0,50
0,65	1,00	0,64	0,98	0,61	0,97	0,8394	-4000	0,50
0,7	0,95	0,58	0,98	0,53	0,95	0,8000	-4500	0,50
0,75	0,95	0,53	0,95	0,52	0,82	0,7545	-5000	0,50
Promedio	0,78	0,76	0,72	0,76	0,76			0,80

TABLA 12. ÍNDICE DE FIABILIDAD GLOBAL PARA TODOS LOS ÍNDICES PARA EL RANGO DEL UMBRAL (-0,75 A 0,75)

Una vez observada toda la tabla (introducir número de tabla), se pueden sacar varias conclusiones: La primera es que con los puntos de muestreo realizados para este trabajo se han conseguido unos valores muy elevados para el índice de fiabilidad global, llegando a tener una fiabilidad del 100% en todos los índices utilizados, exceptuando al índice AWEI(SH)_1 y no

solamente eso, sino que también ha alcanzado el mayor índice de fiabilidad en más de un valor del umbral, menos en el caso del índice RE-NDWI, en el que se alcanza el máximo de fiabilidad en el umbral con valor de 0,55. También se observa que el índice que cumple mejor la premisa de que los valores considerados como agua tienen valores positivos, entre 0 y 1, mientras que las zonas consideradas como no agua tienen unos valores negativos, entre el -1 y el 0, es el índice propuesto SWIR_BLUE, ya que se alcanza la máxima fiabilidad en el umbral con valor de 0; seguido por el índice MNDWI, con un valor del umbral de 0,1; el índice NDWI y el índice propuesto número 1 con un valor de 0,15 cada uno; y finalmente el índice RE-NDWI, con un valor de 0,55. También se pueden comparar como actúan las bandas SWIR dependiendo para qué índice se apliquen, ya que para los índices como el MNDWI o el Índice SWIR_BLUE, se obtienen mejores resultados con bandas SWIR con longitudes de onda intermedias, mientras que en el caso del AWEI(SH)_1, se obtienen peores resultados a medida que se emplean bandas SWIR con longitudes de onda mayores. Para elegir el mejor índice de los calculados para este trabajo, se ha realizado un promedio de todos los valores obtenidos con el índice de fiabilidad global para cada uno de los umbrales, y se llega a la conclusión de que el más óptimo para realizar el cartografiado es el NDWI, con un valor de 0,78, a pesar de que el índice AWEI(SH)_1 tenga un valor promedio mayor, éste no alcanza en ningún rango del umbral un valor del índice de fiabilidad global igual a 1 por lo que para este trabajo, el índice AWEI(SH)_1 ya presenta errores; seguidos están los índices propuestos tanto el SWIR_BLUE como el IR_RED, con un valor de 0,76, seguido del MNDWI, con un valor de 0,76; y finalmente el índice RE-MNDWI, con un valor de 0,72. Además de este promedio se ha realizado otro para calcular cual es el mejor valor del umbral en que se puede tener una fiabilidad máxima, para ello se ha hecho una media de cada uno de los valores del umbral para cada índice, con el objetivo de unificar un único umbral, donde los valores más altos, corresponderán con el umbral con mayor fiabilidad para cualquier índice que tenga como premisa que valores considerados como agua tienen valores positivos, entre 0 y 1, mientras que las zonas consideradas como no agua tienen unos valores negativos, entre el -1 y el 0, y como resultado se obtiene que hay 3 valores del umbral distintos en los que la fiabilidad casi alcanza el 1, siendo estos los umbrales de 0,3; 0,35; 0,40; y 0,45.

En la Ilustración 17 se pueden diferenciar cuales son los índices que utilizan una banda SWIR y aquellos que no, ya que los índices que utilizan una banda SWIR, al tener un tamaño de pixel mayor, no pueden extraer la información de la superficie del agua de extensiones tan pequeñas como lo haría otro índice que utilice un tamaño de pixel menor, por eso los índices que extraen una mayor superficie de agua son el NDWI, el RE-NDWI, y el IR_RED, aunque también se ha comprobado que el índice AWEI(SH), a pesar de utilizar la banda SWIR, obtiene mejores resultados que otros índices que utilizan dicha banda.

Al igual que pasa en la Ilustración 17, en la Ilustración 18 se obtienen mejores resultados en aquellos índices que utilizan únicamente las bandas multispectrales, ya que tienen un tamaño de pixel menor, por lo que tendremos una mejor definición en los bordes.

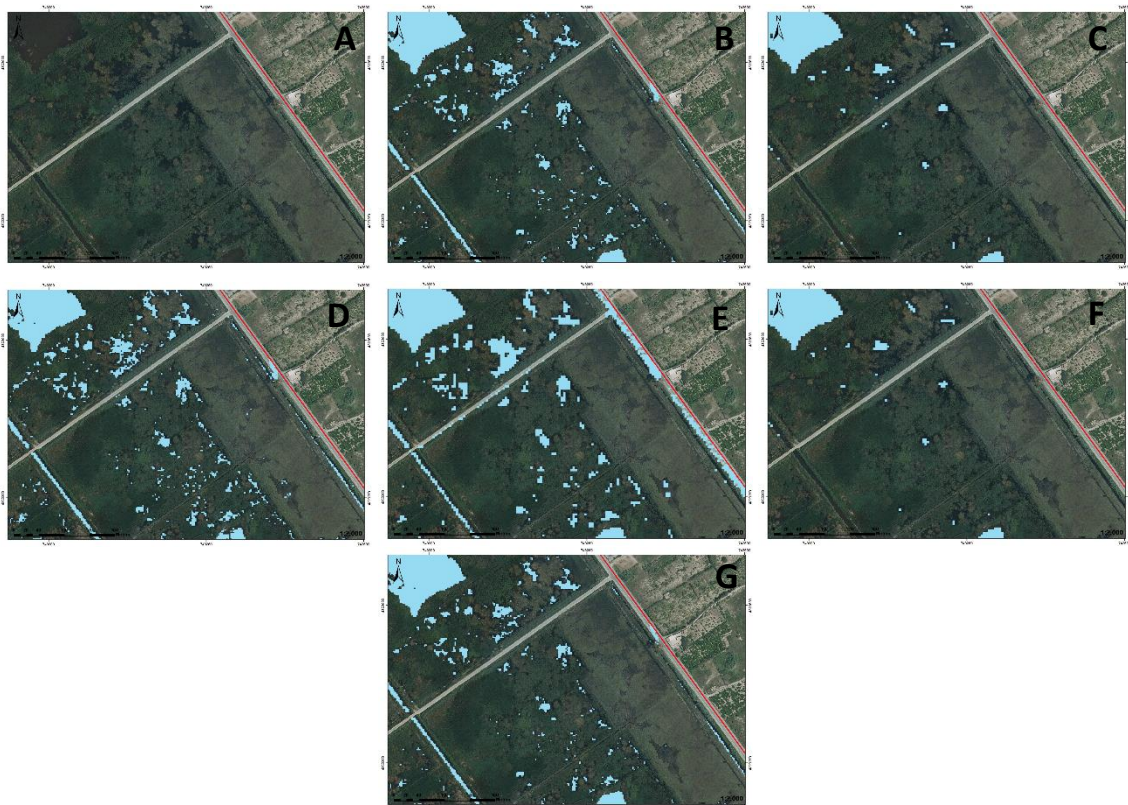


ILUSTRACIÓN 17. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A): ORTOFOTO, (B): ÍNDICE NDWI (UMBRAL 0,35), (C): ÍNDICE MNDWI (UMBRAL 0,35), (D): ÍNDICE RE-NDWI (UMBRAL 0,55), (E): ÍNDICE AWEI(SH) (UMBRAL 0), (F): ÍNDICE SWIR_BLUE (UMBRAL 0,35), (G) ÍNDICE IR_RED (UMBRAL 0,35)

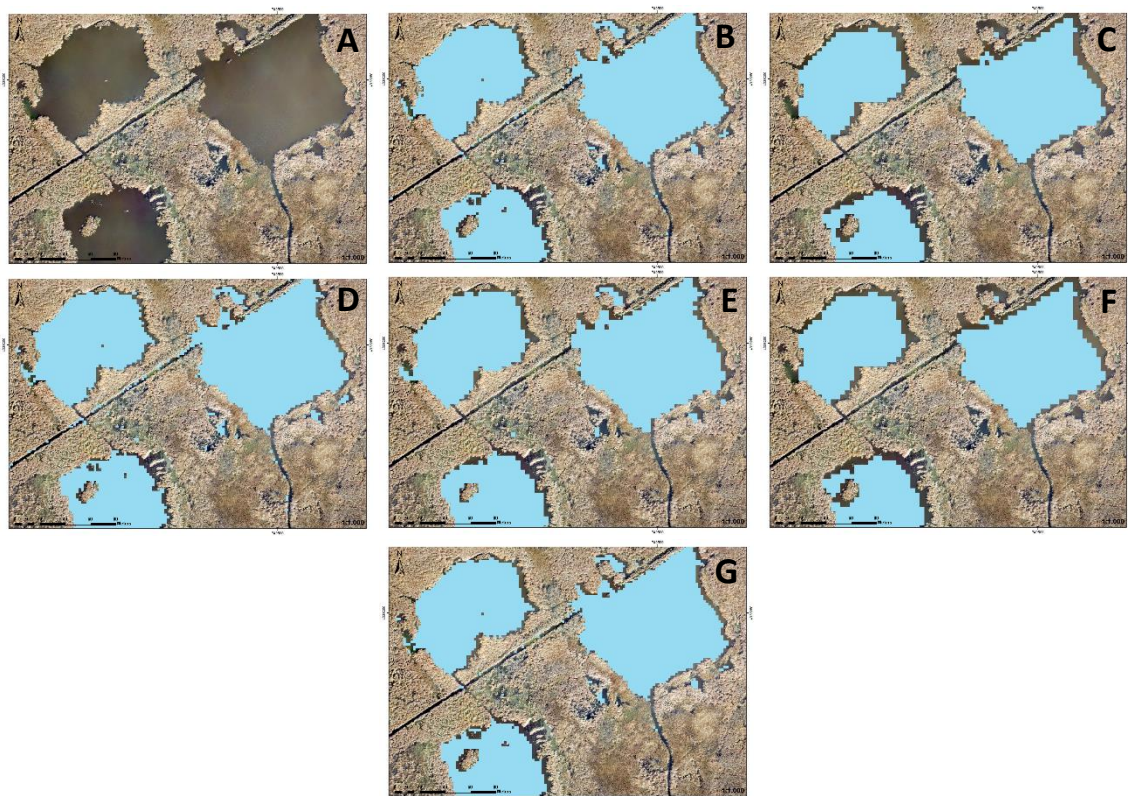


ILUSTRACIÓN 18. REPRESENTACIÓN DE LA MASA DE AGUA. (A): ORTOFOTO, (B): ÍNDICE NDWI (UMBRAL 0,35), (C): ÍNDICE MNDWI (UMBRAL 0,35), (D): ÍNDICE RE-NDWI (UMBRAL 0,55), (E): ÍNDICE AWEI(SH) (UMBRAL 0), (F): ÍNDICE SWIR_BLUE (UMBRAL 0,35), (G) ÍNDICE IR_RED (UMBRAL 0,35)

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que cualquiera de los índices propuestos durante este trabajo pueden ser válidos para la extracción de las masas de agua, todo ello gracias a la gran precisión del sensor satélite utilizado para este trabajo, el denominado Worldview-3, cuyo mayor tamaño de pixel para las bandas utilizadas para este trabajo es de 3,7 metros, siendo esta la banda correspondiente al SWIR, por lo que se podrán localizar masas de agua de superiores a 15 m², mientras que en otros trabajos publicados (Feyisa et al., 2014; Klemenjak et al., 2012; McFeeters, 1996; Pena-Regueiro et al., 2020; Xu, 2006) utilizaron otros tipos de sensores con imágenes de satélite de mayor tamaño del pixel, por lo que la precisión a la hora de realizar el cartografiado de las zonas es menor. También hay que tener en cuenta que las lluvias es una de las principales variables que determinan la extensión del área inundada en este tipo de humedales, y en el caso de este trabajo, a pesar de que 2020 fue uno de los años más lluviosos de los últimos 10 años, la cantidad de precipitaciones ha ido descendiendo desde 2008 (Gráfica 4) Pero si se ha de elegir uno de los índices propuestos, este sería el NDWI, ya que como se puede observar en la Tabla 12, este tiene el valor promedio más elevado con un valor del rango del umbral de entre 0,3 a 0,45. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este índice no es capaz de detectar aquellas zonas de agua con vegetación pantanosa. Finalmente hay que recalcar que los dos índices propuestos para este trabajo también presentaron unos resultados adecuados, los cuales también pueden ser usados para la extracción de las masas de agua. Finalmente, al haber obtenido unos resultados tan positivos, lo mejor sería tomar una cantidad de puntos mayor, para averiguar si se pueden reducir el número de índices aptos para cartografiar la Marjal de Gandia.

- Doña Monzó, C. (2016). *Monitoring water quality and hydrological patterns of wetlands using recent techniques in remote sensing*. November, 148.
<https://core.ac.uk/download/pdf/80524935.pdf><https://cloud1.iigeo.medyratis.org/s/N7sg2AyANTJeNAM>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- GISGeography. (2018). *Las firmas espectrales, conoce sus bandas espectrales en la Teledetección*. 2017. <https://acolita.com/las-firmas-espectrales-conoce-sus-bandas-espectrales-en-la-teledeteccion/>
- Glasgow, H. B., Burkholder, J. A. M., Reed, R. E., Lewitus, A. J., & Kleinman, J. E. (2004). Real-time remote monitoring of water quality: A review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 300(1–2), 409–448.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.02.022>
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors (Switzerland)*, 17(4), 1–36. <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- Huang, C., Peng, Y., Lang, M., Yeo, I. Y., & McCarty, G. (2014). Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 141, 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.020>
- Jin, H., Huang, C., Lang, M. W., Yeo, I. Y., & Stehman, S. V. (2017). Monitoring of wetland inundation dynamics in the Delmarva Peninsula using Landsat time-series imagery from 1985 to 2011. *Remote Sensing of Environment*, 190, 26–41.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.001>
- Klemenjak, S., Waske, B., Valero, S., & Chanussot, J. (2012). Unsupervised river detection in RapidEye data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 6860–6863. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352587>
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A. R., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small, Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Wetlands*, 35(5), 851–864. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0676-9>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Pena-Regueiro, J., Sebastián-Frasquet, M. T., Estornell, J., & Aguilar-Maldonado, J. A. (2020). Sentinel-2 application to the surface characterization of small water bodies in Wetlands. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051487>
- Rodrigo, M. A., Rojo, C., Armengol, X., & Mañá, M. (2001). Heterogeneidad espacio-temporal de la calidad del agua en un humedal costero: El Marjal de la Safor (Valencia). *Limnetica*, 20(2), 329–339.

- Royal, G., & Finlayson, M. (2018). Perspectiva Mundial Sobre los Humedales: Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas 2018. *Convección de Ramsar Sobre Los Humedales*, 88. https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_spanish_web.pdf
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., & Qin, Y. (2017). Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/w9040256>