

DETERMINACIÓN DE ZONAS INUNDADAS MEDIANTE IMÁGENES RADAR E IMÁGENES MULTIESPECTRALES

DETERMINATION OF FLOODED AREAS THROUGH RADAR IMAGES AND MULTISPECTRAL IMAGES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D. HÉCTOR NOVILLO PRAENA

Dirigido por:

D. ALEJANDRO DONATO MORALES (Tutor)

Dr. D. FRANCISCO CARREÑO CONDE (Co-tutor Académico)

Alcalá de Henares, a 2 de julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a todos y cada uno de los/las profesores/as que nos han impartido clase en el máster de Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos, así como a las universidades Alcalá de Henares (UAH) y Rey Juan Carlos (URJC), y a las demás empresas e instituciones que colaboran con el máster.

En segundo lugar, a mis tutores, Francisco Carreño Conde y Alejandro Donato Morales, por su apoyo, consejos, orientación, ayuda y tiempo dedicado, para la realización de este trabajo. Además de a José Luis Lorenzo y Enrique Giménez, de Land Water and Dams.

Por último, pero no menos importante, dar las gracias a toda mi familia, especialmente a mis padres por su apoyo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Teledetección	3
1.2 Espectro Electromagnético.....	4
1.3 Programa Copernicus	4
1.4 Sentinel 1.....	5
1.5 Sentinel 2.....	6
1.6 Radar de Apertura Sintética (SAR).....	7
2. OBJETIVOS.....	11
3. METODOLOGÍA	12
3.1 Zona de estudio	12
3.2 Imágenes RADAR y ÓPTICAS	13
3.3 Preprocesamiento de imágenes RADAR	14
3.4 Procesamiento de las imágenes RADAR	17
3.5 Procesamiento de las imágenes RADAR en QGIS	18
3.6 Procesamiento de las imágenes ÓPTICAS	19
3.7 Procesamiento de las imágenes ÓPTICAS en QGIS	20
3.8 Índices de agua.....	21
3.9 Matriz de confusión.....	22
4. RESULTADOS.....	26
4.1 Determinación de los umbrales de calibración	26
4.2 Puntos de muestreo.....	27
4.3 Incertidumbre detectada	28
4.4 Matrices de confusión	28
5. DISCUSIÓN.....	33

6. CONCLUSIONES	39
7. BIBLIOGRAFÍA.....	41
8. ANEXOS.....	44
Anexo 1. Modelo de tabla empleado (Tabla 30), para este estudio. Los datos presentes, son los obtenidos para el filtro IDAN.	44
Anexo 2: Modelo de umbral de calibración.	47
Anexo 3. Ortofotografía del 14 de abril de 2018 con los 350 puntos de muestreo. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.	48
Anexo 4. Zona inundada para el filtro IDAN – 13 de abril de 2018 (con la ortofotografía del PNOA de fondo). Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.....	49
Anexo 5. Zona inundada para el índice de agua NDWI – 14 de abril de 2018 (con la ortofotografía del PNOA de fondo). Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rango del Espectro Electromagnético. Fundamentos de Teledetección Aplicada (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).....	4
Figura 2. Modificado de Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).	8
Figura 3. Situación de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (izquierda, situación con respecto a las Comunidades autónomas). Imagen de la derecha, Cuenca Hidrográfica del Ebro y zona de estudio. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.	12
Figura 4. Situación de la zona de estudio. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N. La ortofotografía de fondo, es la del PNOA de máxima actualidad.....	13
Figura 5. Flujo de trabajo empleado.....	15
Figura 6. Imágenes con polarización VH. Detalle de una sección de la zona estudiada a 13/04/2018. Cada imagen se corresponde a un filtro. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N.....	16
Figura 7. A la izquierda, polarización VV y a la de la derecha, polarización VH. Pertenecen al filtro IDAN. Sistema de coordenadas ETRS89 – UTM 30N. (Detalle de una sección).....	17
Figura 8. Pasos seguidos para el procesamiento de las imágenes RADAR.	17
Figura 9. Máscaras de agua (IDAN). La izquierda, se corresponde con el 6/04/2018, y la derecha, con el 13/04/2018. Sistema de coordenadas es ETRS89 - UTM 30N. En blanco, zonas con agua y en negro, sin ella. (Detalle de una sección).	18
Figura 10. Índice NDWI para el 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). Las zonas brillantes, se corresponden con zonas de agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).....	19
Figura 11. Índice MNDWI para el 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). Las zonas brillantes, se corresponden con zonas de agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).....	19
Figura 12. Máscara de agua para el índice NDWI del 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). En blanco, zonas con agua, y en negro, zonas sin agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).	20
Figura 13. Máscara de agua para el índice MNDWI del 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). En blanco, zonas con agua, y en negro, zonas sin agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).	20
Figura 14. Detalle de una sección de las zonas inundadas resultantes de aplicar el procesamiento de las imágenes ópticas en QGIS. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N.	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos de las Misiones Sentinel. (Sentinel.esa.int)	5
Tabla 2. Bandas de Sentinel 2. (Spatial Resolution – Sentinel-2 User Handbook. ESA).....	6
Tabla 3. Frecuencias y longitudes de onda de las diferentes bandas. Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).	9
Tabla 4. Valores de retrodispersión (σ). Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).	10
Tabla 5. Características de las imágenes RADAR.....	13
Tabla 6. Características de las imágenes Ópticas.	14
Tabla 7: Filtros empleados, con la amplitud de la ventana y el número de looks (number of looks). En los filtros en los que no hay información de la amplitud de la ventana o del number of look, se ha puesto el siguiente símbolo (-).	15
Tabla 8. Modelo empleado de matriz de confusión.	23
Tabla 9. Índice Kappa y Grado de acuerdo (Abraira, 2001).	25
Tabla 10. Umbrales definidos para cada filtro	26
Tabla 11. Número de identificaciones de agua (1) y ausencia de agua (0).	27
Tabla 12. Matriz de confusión para el filtro Boxcar 5 x 5.	29
Tabla 13. Matriz de confusión para el filtro Frost 3 x 3.....	29
Tabla 14. Matriz de confusión para el filtro Frost 7 x 7.....	29
Tabla 15. Matriz de confusión para el filtro Gamma map 9 x 9.	29
Tabla 16. Matriz de confusión para el filtro IDAN.....	30
Tabla 17. Matriz de confusión para el filtro Lee 7 x 7.....	30
Tabla 18. Matriz de confusión para el filtro Lee 11 x 11, con un umbral de -20,5 dB.....	30
Tabla 19. Matriz de confusión para el filtro Lee 11 x 11, con un umbral de -21 dB.....	31
Tabla 20. Matriz de confusión para el filtro Lee sigma 5 x 5.	31
Tabla 21. Matriz de confusión para el filtro Lee sigma 13 x 13.	31
Tabla 22. Matriz de confusión para el filtro Median 5 x 5.....	31
Tabla 23. Matriz de confusión para el filtro Refined Lee.	32
Tabla 24. Matriz de confusión para el índice NDWI.	32
Tabla 25. Matriz de confusión para el índice MNDWI.....	32
Tabla 26. Resultados de los puntos de muestreo para cada índice, sin tener en cuenta los puntos reclasificados.....	33

Tabla 27. Resultados globales de la precisión, sensibilidad, especificidad e índice Kappa, de los filtros e índices.	34
Tabla 28. Resultados de los puntos de muestreo para cada filtro e índice, teniendo en cuenta los puntos reclasificados.	35
Tabla 29. Resultados globales de la precisión, sensibilidad, especificidad e índice Kappa, de los filtros e índices reclasificados.	36
Tabla 30. Modelo de tabla empleado para el estudio.	44
Tabla 31. Valores para los 350 puntos de muestreo.	46

TABLAS DE ABREVIATURAS

BOA: Bottom of the Atmosphere

CE: Comisión Europea

CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro

CNIG: Centro Nacional de Información Geográfica

DHE: Demarcación Hidrográfica del Ebro

DOUE: Diario Oficial de la Unión Europea

ESA: European Space Agency

ETRS89: European Terrestrial Reference System 1989

EW: Extra Wide Swath

GEMES: Global Monitoring for Environment and Security

GRD: Ground Range Detected

HR: High Resolution

IDAN: Intensity Driven Adaptive Neighborhood

IGN: Instituto Geográfico Nacional

IW: Interferometric Wide Swath

MSI: MultiSpectral Instrument

MNDWI: Modification of Normalized Difference Water Index

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDWI: Normalized Difference Water Index

NIR: Near Infrared

OCN: Ocean

PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

RADAR: Radio Detection And Ranging

RAR: Real Aperture Radar

SAR: Synthetic Aperture Radar

SLC: Single Look Complex

SM: Strip map

SNAP: Sentinel Application Platform

SWIR: Short Wave Infrared

TOA: Top of the Atmosphere

TIR: Thermal Infrared

UE: Unión Europea

UTM: Universal Transversal de Mercator

WGS84: World Geodetic System 1984

WV: Modo de onda o Wave

RESUMEN

En primer lugar, ¿qué entendemos por inundación?, pues según lo dispuesto en el artículo 2 de la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, es lo siguiente:

“Anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua. Incluye las inundaciones ocasionadas por ríos, torrentes de montaña, corrientes de agua intermitentes del Mediterráneo y las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras, y puede excluir las inundaciones de las redes de alcantarillado”.

En el caso que nos ocupará en este trabajo, será la inundación producida en la primera quincena de abril de 2018, en la provincia de Zaragoza (Comunidad Autónoma de Aragón), concretamente, entre las poblaciones de Gallur y Alagón, debido a la crecida del río Ebro.

Para el estudio, se han empleado técnicas de teledetección, con imágenes proporcionadas por satélites (Sentinel 1 y Sentinel 2) y ortofotografías por vuelo aéreo.

Se han probado una serie de filtros, con distintas amplitudes de ventanas, y también, índices de agua, con el objeto de obtener las áreas inundadas, que detectan los mismos. Para ello, se han empleado las técnicas de los umbrales de calibración, para la creación de las máscaras de agua, así también, el empleo de índices de agua.

Los resultados obtenidos, se han comparado entre sí, mediante las matrices de confusión resultantes. Obteniendo de esta manera, el filtro e índice de agua más idóneos, IDAN y Ndwí respectivamente.

ABSTRACT

First of all, what do we understand by a flood? According with the provisions of Article 2 of the Directive 2007/60/EC of the European Parliament and the council of 23 October 2007, on the assessment and management of flood risks, it is the following:

“The temporary covering by water of land not normally covered by water. This shall include floods from rivers, mountain torrents, Mediterranean ephemeral water courses, and floods from the sea in coastal areas, and may exclude floods from sewerage systems”.

In the case we are going to study in this work, will be the flood produced in the first fortnight of April 2018, in Zaragoza (Autonomous Community of Aragon), specifically between the villages of Gallur and Alagon, because of the flood of the river Ebro.

Remote sensing techniques, have been used for the study, with images provided by satellites (Sentinel 1 and Sentinel 2) and aerial orthophotographs.

The filters have been tested, with different windows size, and also, water index, with the purpose of obtain the flooded areas. Techniques of calibration thresholds, have been used to create the water masks. Also, water indexes have been used to decide the flooded areas.

The results have been compared between them, using the results of contingency tables. The best filter and water index are IDAN and NdwI, respectively.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Teledetección

La teledetección consiste en la observación remota de la superficie de la Tierra, a través de sensores instalados en plataformas espaciales, y mediante la radiación que puede ser o no emitida por el propio sensor (Chuvieco, 1990). Otra definición sería la técnica que toma, trata y analiza las imágenes captadas por satélites artificiales, dicha técnica se inició con fines militares (Pérez y Muñoz, 2006).

En definitiva, son el conjunto de técnicas que, mediante una radiación emitida a través de la propagación de ondas electromagnéticas fundamentalmente, estudian las repuestas de las ondas (su cantidad) una vez se han relacionado con la superficie, ya sea terrestre o con otros objetos.

Dependiendo del emisor de la energía, podemos clasificar los sensores en activos y en pasivos. Los activos, son los que tienen su propia fuente de energía, emitiendo radiación hacia la superficie, y registrando la señal reflejada por la misma. Un tipo de sensor activo, es el RADAR (Radio Detection And Ranging). Y los pasivos son los que reciben la señal reflejada por una superficie, a partir de la energía emitida por otro cuerpo como puede ser el Sol.

En este trabajo, se emplearán los dos tipos de sensores, ya que Sentinel 1 lleva instalado un Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés, Synthetic Aperture Radar) de banda C, que emite su propia señal, gracias a lo cual es capaz de tomar imágenes bajo cualquier situación, como se comentará a continuación. Mientras tanto, Sentinel 2, lleva instalado un Instrumento Multiespectral (MSI, por sus siglas en inglés, MultiSpectral Instrument) capaz de medir la radiación reflejada por la Tierra. (esa.int).

Como resultado, con los sensores activos, obtendremos imágenes RADAR y con los sensores pasivos, obtendremos imágenes ÓPTICAS.

1.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético, es el conjunto de las frecuencias que causan una radiación electromagnética. En la Figura 1, podemos ver la distribución del campo electromagnético, y la zona del mismo de interés para los sensores de teledetección.

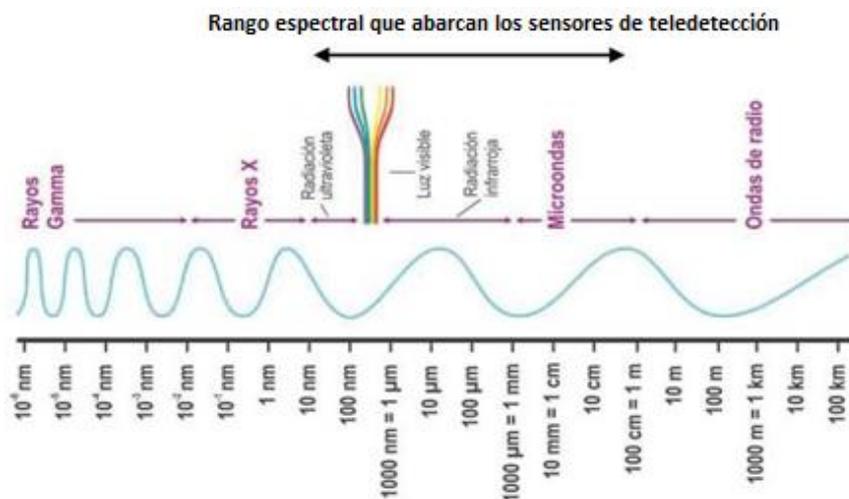


Figura 1. Rango del Espectro Electromagnético. Fundamentos de Teledetección Aplicada (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).

1.3 Programa Copernicus

La Comisión Europea, en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA, sus siglas en inglés, European Space Agency), la Agencia Europea de Medio Ambiente y los Estados miembros de la Unión, han desarrollado el Programa Copernicus. Dicho programa está formado por una serie de misiones, denominadas Sentinel, que tienen como finalidad la observación de la Tierra.

Copernicus, fue aprobado a través del Reglamento (UE) n° 377/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de abril de 2014, por el que se establece el Programa Copernicus y deroga el Reglamento (UE) n° 911/210.

El antecedente del Programa Copernicus, fue el programa de Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad (GMES, por sus siglas en inglés, Global Monitoring for Environment and Security), creado en mayo de 1998.

El Programa tiene 6 líneas de trabajo; vigilancia atmosférica, marina y terrestre, cambio climático, seguridad y emergencias.

Cada una de las misiones que componen el programa, tienen un objetivo distinto (Tabla 1):

Tabla 1. Objetivos de las Misiones Sentinel. (Sentinel.esa.int)

Misión	Objetivo
Sentinel 1	Monitoreo terrestre y oceánico
Sentinel 2	Monitoreo terrestre
Sentinel 3	Monitoreo de temperaturas y topografías
Sentinel 4	Monitoreo atmosférico
Sentinel 5	Monitoreo atmosférico
Sentinel 5P	Mediciones atmosféricas. Precursor de Sentinel 4 y Sentinel 5
Sentinel 6	Monitoreo oceánico

El presente trabajo, va a emplear las imágenes proporcionadas por las misiones Sentinel 1 y Sentinel 2, cuyas características principales son las siguientes:

1.4 Sentinel 1

Misión de la ESA formada por una constelación de dos satélites. Dotados de un Radar de Apertura Sintética (SAR).

- Sentinel 1A (3 de marzo de 2014) y,
- Sentinel 1B (25 de abril de 2016).

Orbitan entre ellos a 180 grados y se encuentran a una altitud de 693 kilómetros. Gracias al SAR que llevan instalado, son capaces de captar imágenes de la Tierra en condiciones tanto diurnas como nocturnas, así como con distintas climatologías. Presentan un tiempo de revisita de 6 días, reduciéndose en el Ártico a 1 día (esa.int).

Podemos distinguir entre tres tipos de niveles de procesado, Nivel - 0 (datos en bruto), Nivel -1 (presenta dos tipos de productos, Single Look Complex (SLC) y Ground Range Detected (GRD)) y el último nivel, el Nivel - 2 Ocean (OCN), productos empleados para corrientes marinas y vientos.

Para este trabajo se emplearán los productos GRD, que usan el sistema geodésico de coordenadas World Geodetic System 1984 (WGS84).

Además, puede operar en cuatro modos de adquisición. Modo de franja de cobertura interferométrica o Interferometric Wide Swath (IW), Modo de franja extra ancha o Extra Wide Swath (EW), Modo de onda o Wave (WV) y Modo de franja o Strip map (SM).

1.5 Sentinel 2

También forma una constelación de dos satélites de la ESA. Dotados de una cámara multispectral (MSI) de 13 bandas espectrales (Tabla 2).

- Sentinel 2A (23 de junio de 2015) y,
- Sentinel 2B (7 de marzo de 2017).

Presentan un campo de visión de 290 kilómetros de amplitud y un tiempo de revisita de 5 días (esa.int).

Tabla 2. Bandas de Sentinel 2. (Spatial Resolution – Sentinel-2 User Handbook. ESA).

Banda	Longitud de onda central (nm)	Resolución (m)
B1 - Aerosol	443	60
B2 - Azul	490	10
B3 - Verde	560	10
B4 - Rojo	665	10
B5 - Vegetation Red Edge	705	20
B6 - Vegetation Red Edge	740	20
B7 - Vegetation Red Edge	783	20
B8 - Infrarrojo cercano (NIR) 1	842	10
B8A - Infrarrojo cercano (NIR) 2	865	20
B9 - Vapor de Agua	940	60
B10 - Cirrus	1375	60
B11 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1610	20
B12 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2190	20

A diferencia de Sentinel 1, que era capaz de tomar imágenes tanto de día y de noche, y bajo cualquier situación climática, Sentinel 2, se ve limitado por dichos factores.

A la hora de descargar las imágenes, el proveedor nos permite seleccionar entre dos niveles de imágenes. Estos niveles son el 1C y 2A. La diferencia entre ambos, es que el nivel 1C, se corresponderá con un nivel de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés, Top of the Atmosphere) mientras que las 2A, son aquellas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera (BOA, por sus siglas en inglés, Bottom of the Atmosphere). Ambos niveles proveen imágenes ortorectificadas.

Es decir, el nivel 1C, son imágenes corregidas radiométrica y geométricamente. Mientras que las imágenes del nivel 2A, son aquellas corregidas atmosféricamente.

Aunque el operador solo nos deja seleccionar los dos niveles descritos anteriormente, siendo los dos tipos disponibles para los usuarios, también genera otros tres niveles adicionales, Nivel 0, 1A y 1B.

En este trabajo, se ha optado por seleccionar aquellas imágenes Sentinel 2, del nivel 2A, es decir, imágenes corregidas atmosféricamente.

La información ha sido tomada a partir de las páginas oficiales de la Agencia Espacial Europea (esa.int) y la del Programa Copernicus (Copernicus.eu).

1.6 Radar de Apertura Sintética (SAR)

Radar activo, que emite su propia señal y mide la reflectividad de la misma, o retrodispersión (Rodríguez et al., 2015). Forma una imagen a partir de la combinación de las señales recibidas durante su movimiento, se caracterizan por proporcionar información similar a los Radar de apertura real (RAR, por sus siglas en inglés, Real Aperture Radar), pero presentando una mayor resolución espacial (Rodríguez et al., 2015). El modo de adquisición de las imágenes por parte de los sistemas RADAR es lateralmente (Rodríguez et al., 2015).

La retrodispersión (o señal que vuelve al radar después de ser reflejada por una superficie), es muy sensible a la constante dieléctrica del medio (Gorrah et al., 2015; Bhagat, 2017). También se verá condicionada por las características de la propia superficie, como lo es su rugosidad, topografía o por el tipo de vegetación presente (Bhagat, 2017). Por último, también se verá condicionada por las propias características del sensor activo (RADAR), como lo es la polarización, el ángulo de incidencia o el tipo de banda (que estará en función de la longitud de onda y de la frecuencia).

La retrodispersión, se expresa en la diferente literatura como coeficiente de retrodispersión (σ^0).

El coeficiente de retrodispersión se mide en decibelios (dB), a mayor coeficiente, mayor será la reflectividad captada por el radar.

A continuación, se expondrán de forma detallada cada uno de los elementos que condicionarán cómo será la señal recibida por el sensor:

Constante dieléctrica

La constante dieléctrica de la superficie, estará condicionada a su vez por las constantes dieléctricas de los elementos que lo constituyen (elementos sólidos como los minerales de las rocas, agua y aire), siendo el elemento dominante, y que la condiciona el agua (Salgado et al., 2012). Es decir, la constante dieléctrica estará muy influida por el grado de humedad.

Rugosidad

Cuanto mayor es la rugosidad de la superficie, mayor será la retrodispersión producida, y como consecuencia, las imágenes radar resultantes serán más brillantes. Esta rugosidad estará condicionada tanto por la topografía, así como por la presencia de vegetación.

En la Figura 2, se puede observar cómo en las superficies lisas, la señal es reflejada fuera del alcance del sensor, por lo tanto, tendremos unos valores bajos de retrodispersión (típico de zonas con agua, por ejemplo), o no tendremos retorno de señal. Mientras que en los otros dos casos (en los que hay rugosidad en la superficie), habrá una parte de la señal que volverá al sensor, obteniendo de esa manera, una imagen más brillante.

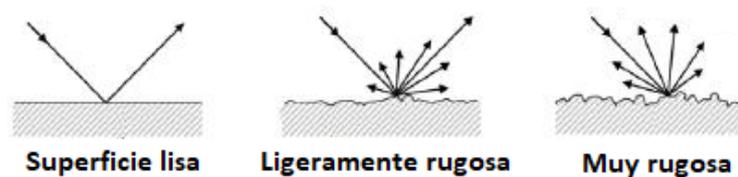


Figura 2. Modificado de Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).

Ángulo de incidencia de la señal radar

Descrito por el ángulo formado entre la dirección de la señal del radar y la vertical del terreno. Dependerá tanto de la altura del objeto como de la geometría del área a captar.

El retorno de la señal, una vez haya incidido sobre la superficie, será la dispersión. Podremos distinguir entre distintos tipos de dispersión:

- Por volumen
- Doble rebote
- Por tipo de superficie (es decir, en función de la rugosidad de la superficie).

El ángulo de incidencia, es uno de los factores que más afecta a la retrodispersión (Bhagat, 2017).

Longitud de onda

El tipo de banda condicionará que la señal penetre más o menos en el terreno, que dependerá de la longitud de onda. Sentinel 1 trabaja en la banda C (Tabla 3), que presenta una capacidad de penetración en el terreno de 5 cm de media (National Aeronautics and Space Administration, NASA).

A mayor longitud de onda, más penetrará en el medio la radiación electromagnética. La penetración, además de estar en función de la longitud de onda, también estará condicionada por la polarización. Siendo mayor, en polarizaciones en la misma dirección, HH/VV, que con polarizaciones cruzadas VH/HV (mitma.gob).

Tabla 3. Frecuencias y longitudes de onda de las diferentes bandas. Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)
P	0,5 – 0,25	60 – 120
L	1 – 2	15 – 30
S	2 – 3,75	8 – 15
C	3,75 – 7,5	4 – 8
X	7,5 – 12	2,5 – 4
Ku	12 – 17,6	1,7 – 2,5
K	18 – 25	1,2 – 1,67
Ka	25 – 40	0,75 – 1,2

Polarización

Se refiere a la dirección a la cual el sensor radia el máximo de potencia (Anguera y Pérez, 2008).

Indica cómo se envía la señal y cómo se recibe. Hay distintas configuraciones de polarización:

- HH: Transmitida y recibida horizontalmente.
- HV: Transmitida horizontalmente y recibida verticalmente.
- VH: Transmitida verticalmente y recibida horizontalmente.

- VV: Transmitida y recibida verticalmente.

Sentinel 1 puede obtener imágenes en cuatro tipos de polarización (HH, VV, VV+VH y HH+HV).

Los coeficientes de retrodispersión típicos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de retrodispersión (σ). Fundamentos de Teledetección Radar (El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, mitma.gob).

Valores de retrodispersión (σ)	Superficies
Muy alto (mayores a -5 dB)	Superficies urbanas. Superficies muy rugosas.
Alto (de -10 dB a 0 dB)	Zonas de vegetación densa. Superficies rugosas.
Moderado (de -20 dB a -10 dB)	Zonas de cultivos. Superficies lisas.
Bajo (inferiores a -20 dB)	Aguas en calma. Carreteras. Suelos muy secos

En este trabajo, los valores de retrodispersión que nos interesarán, estarán entorno a los valores de -20 dB, si bien este valor, se determinará con las imágenes RADAR, a partir de las zonas inundadas.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo, son la identificación del filtro e índice de agua más idóneo, para mapear una inundación.

Esto se hará mediante el empleo de matrices de confusión, imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2, una ortofotografía, y la identificación de un número determinado de puntos de muestreo, que se compararán con la realidad.

Esta realidad, se fijará a través del análisis de la ortofotografía de la zona, tomada durante la inundación.

Tanto la zona de estudio y parte de la metodología, estará basada en el trabajo de Carreño y de Mata (2019) titulado; Flood Monitoring Based on the Study of Sentinel-1 SAR Images: The Ebro River Case Stud. En dicho estudio, los autores estudiaron una inundación del río Ebro de 2018, y obtuvieron las zonas inundadas a partir del empleo del filtro Lee 7 x 7. Sus resultados fueron comparados con diferentes periodos de retorno, así como también por una ortofotografía de la inundación.

Los programas que se emplearán son SNAP, QGIS y Excel.

SNAP (Sentinel Application Platform), es un programa gratuito de la ESA, desarrollado por Brockmann Consult, Skywatch, Sensor and C-S. La versión empleada es la 8.0.0 (19.10.2020 15:00 UTC), y la página de descarga es <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. QGIS, es un Sistema de Información Geográfica. Dicho programa, también es gratuito, y se puede acceder a la descarga a través de <https://qgis.org/downloads/>. La versión empleada en este trabajo, es la 3.8.3 (Zanzibar). Y el último programa empleado, es Excel. Desarrollado por Microsoft, nos permite realizar hojas de cálculo. A diferencia de los programas anteriores que eran libres, Excel es de pago, y podemos acceder a su compra a través del siguiente enlace <https://www.microsoft.com/es-ES/microsoft-365/buy/compare-all-microsoft-365-products>. La versión de Excel empleada, es la del 2016.

3. METODOLOGÍA

3.1 Zona de estudio

La zona elegida para este estudio, ha sido la utilizada por Carreño y de Mata (2019). Dicha zona, se corresponde con un tramo del río Ebro a su paso por la provincia de Zaragoza (Aragón).

El Ebro, es el principal río de la cuenca que recibe el mismo nombre, y presenta con periodicidad crecidas, que de media ocurren 1,2 veces al año (Ollero et al., 2004).

Se estudiará una crecida del río Ebro, concretamente la ocurrida en abril de 2018.

Las características que definen la Demarcación Hidrográfica del Ebro (DHE), son las siguientes:

La DHE (Figura 3) se encuentra situada al noreste de la Península Ibérica, abarcando una extensión de 85.660,14 km² (distribuyéndose en nueve comunidades autónomas). Además, hay una parte situada en territorio francés y otra en andorrano (CHE). La zona de interés para este trabajo se encuentra en la Comunidad Autónoma de Aragón, concretamente en la provincia de Zaragoza.

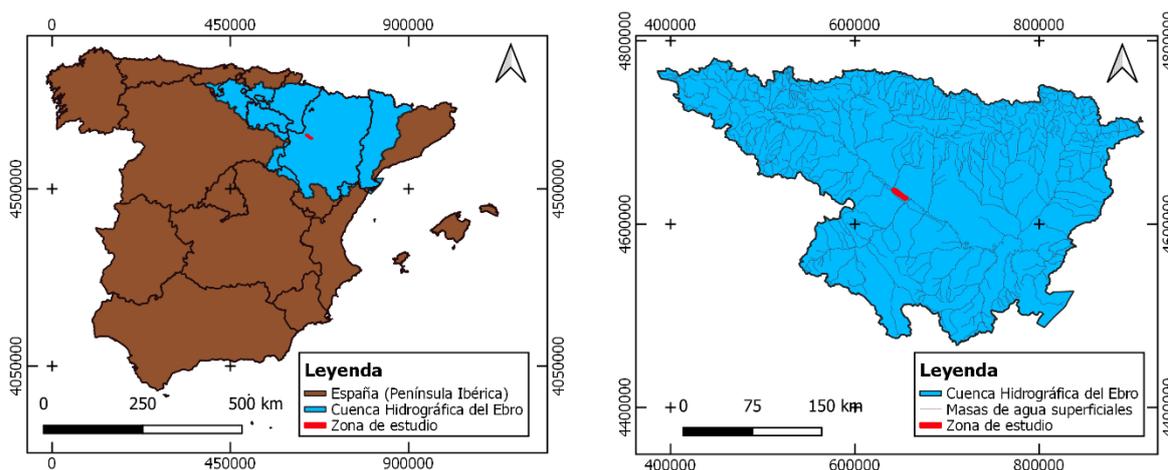


Figura 3. Situación de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (izquierda, situación con respecto a las Comunidades autónomas). Imagen de la derecha, Cuenca Hidrográfica del Ebro y zona de estudio. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.

En particular, para este estudio (Figura 4), se ha decidido tomar el área comprendida entre las localidades de Gallur (situada aguas arriba del río Ebro) y Alagón. La longitud del tramo del río estudiado es de 37,23 kilómetros.

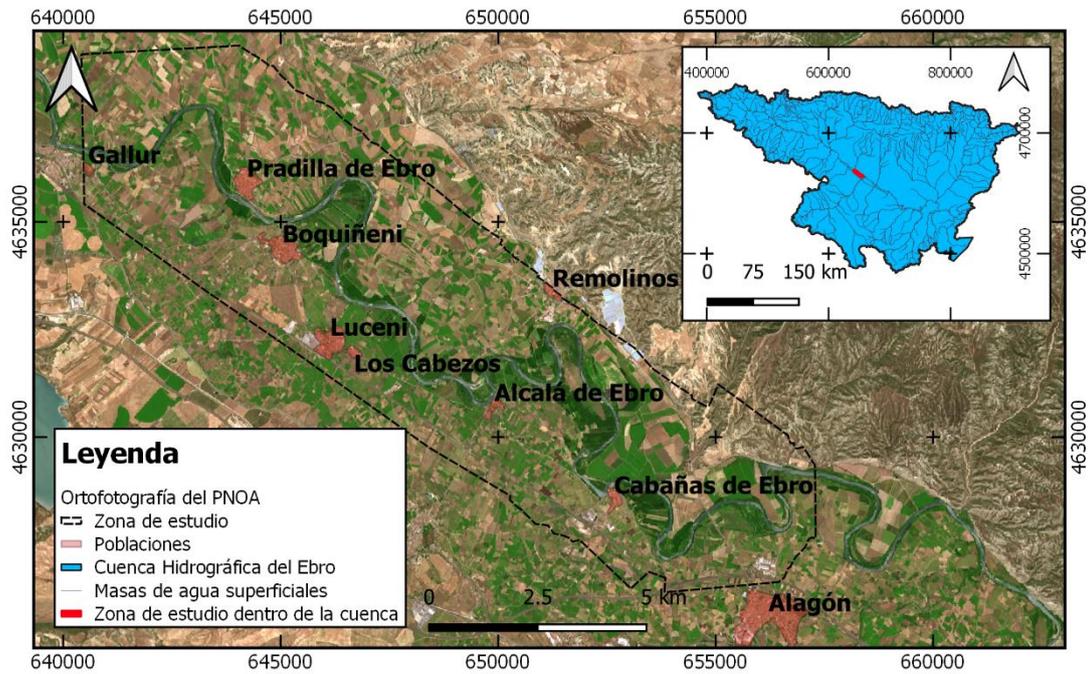


Figura 4. Situación de la zona de estudio. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N. La ortofotografía de fondo, es la del PNOA de máxima actualidad.

El área de estudio, con mayor precisión, y junto con los puntos de muestreo, se encuentra en el Anexo 3.

3.2 Imágenes RADAR y ÓPTICAS

Para los tratamientos de las imágenes (tanto el preprocesamiento como el procesamiento), se ha empleado el programa SNAP de la ESA. Las imágenes a su vez, se han descargado a través del proveedor *The Copernicus Open Access Hub*.

Las imágenes y la información asociada a las mismas, se muestran en las siguientes tablas (Tabla 5 y Tabla 6).

Tabla 5. Características de las imágenes RADAR

Misión	Modo de adquisición	Tipo de producto	Fecha de captura	Hora de captura
Sentinel - 1A	IW	GRD	6 - Abr - 2018	18:03:03
Sentinel - 1B	IW	GRD	13 - Abr - 2018	17:55:16

Las imágenes para el tipo de producto GRD, presentan diferentes tipos de resolución (media, alta y completa), en este caso, la resolución de las imágenes es alta (HR, por sus siglas en inglés, High Resolution).

Tabla 6. Características de las imágenes Ópticas.

Misión	Tipo de órbita	Nivel de procesado	Fecha de captura	Hora de captura
Sentinel - 2B	Descendente	2A	30 – Mar – 2018	10:56:19
Sentinel - 2A	Descendente	2A	14 – Abr – 2018	10:56:51

3.3 Preprocesamiento de imágenes RADAR

El preprocesamiento de las imágenes RADAR, constará de los siguientes pasos (Figura 5) que se describirán de forma sintetizada a continuación:

1º - Descarga de las imágenes, previo registro en la plataforma The Copernicus Open Access Hub.

2º - Carga de la información de las imágenes en el programa SNAP.

3º - Lectura de la imagen.

4º - Aplicar una corrección orbital. Con ello, se conseguirá aumentar la precisión geométrica, pues los datos proporcionados por la plataforma, pueden tener una precisión inferior a la deseada. Mediante el operador Apply Orbit file, se corregirá.

5º - Calibración radiométrica. Con este paso, se corregirán las distorsiones radiométricas, además de “convertir los valores de los niveles digitales a valores de retrodispersión” (mitma.gob).

6º - Corrección de Speckle. Consiste en aplicar un filtro. En consecuencia, se buscará una reducción del ruido (Speckle, moteado o efecto sal y pimienta) presente en la imagen. Este ruido es a consecuencia de las interferencias de las ondas reflejadas al satélite desde las diferentes superficies. En este trabajo, se emplearán distintos filtros para realizar el estudio.

7º - Corrección geométrica. Busca la corrección de las imágenes, es decir, la corrección de las distorsiones presentes en las imágenes, a consecuencia del modo en que las toma el satélite.

8º - Transformar las imágenes a decibelios (dB). Para ello, habrá que convertir las bandas a decibelios. Por tanto, obtendremos los valores de retrodispersión en dB.

Para la realización del preprocesado de las imágenes, se ha seguido el modelo expuesto en el informe llamado “El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial”, concretamente al capítulo titulado “Interpretación de imágenes

Sentinel 1”, del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Y también, se ha empleado el Programa de Capacitación de Teledetección Aplicada de la NASA (Applied Remote Sensing Training Program, ARSET), concretamente el titulado “SAR para el Mapeo de Inundaciones, Sesión 2/4”.



Figura 5. Flujo de trabajo empleado.

Las imágenes RADAR, han sido procesadas mediante la herramienta de SNAP “*Graph Builder*”. Esta herramienta, nos permite realizar todos los pasos de una vez, evitando realizar cada paso de forma independiente.

En el presente estudio, se ha trabajado con los siguientes filtros (Tabla 7):

Tabla 7: Filtros empleados, con la amplitud de la ventana y el número de looks (*number of looks*).

En los filtros en los que no hay información de la amplitud de la ventana o del *number of look*, se ha puesto el siguiente símbolo (-).

Filtro	Amplitud de la ventana	<i>Number of Looks</i>
Boxcar	5 x 5	-
Frost	3 x 3, 7 x 7	-
Gamma map	9 x 9	1
IDAN	-	1
Lee	7 x 7, 11 x 11	1
Lee Sigma	5 x 5, 13 x 13	1
Median	5 x 5	-
Refined Lee	-	-

En total, se han probado 8 filtros (Figura 6), alguno de ellos se ha empleado dos veces, pero variando la amplitud de la ventana.

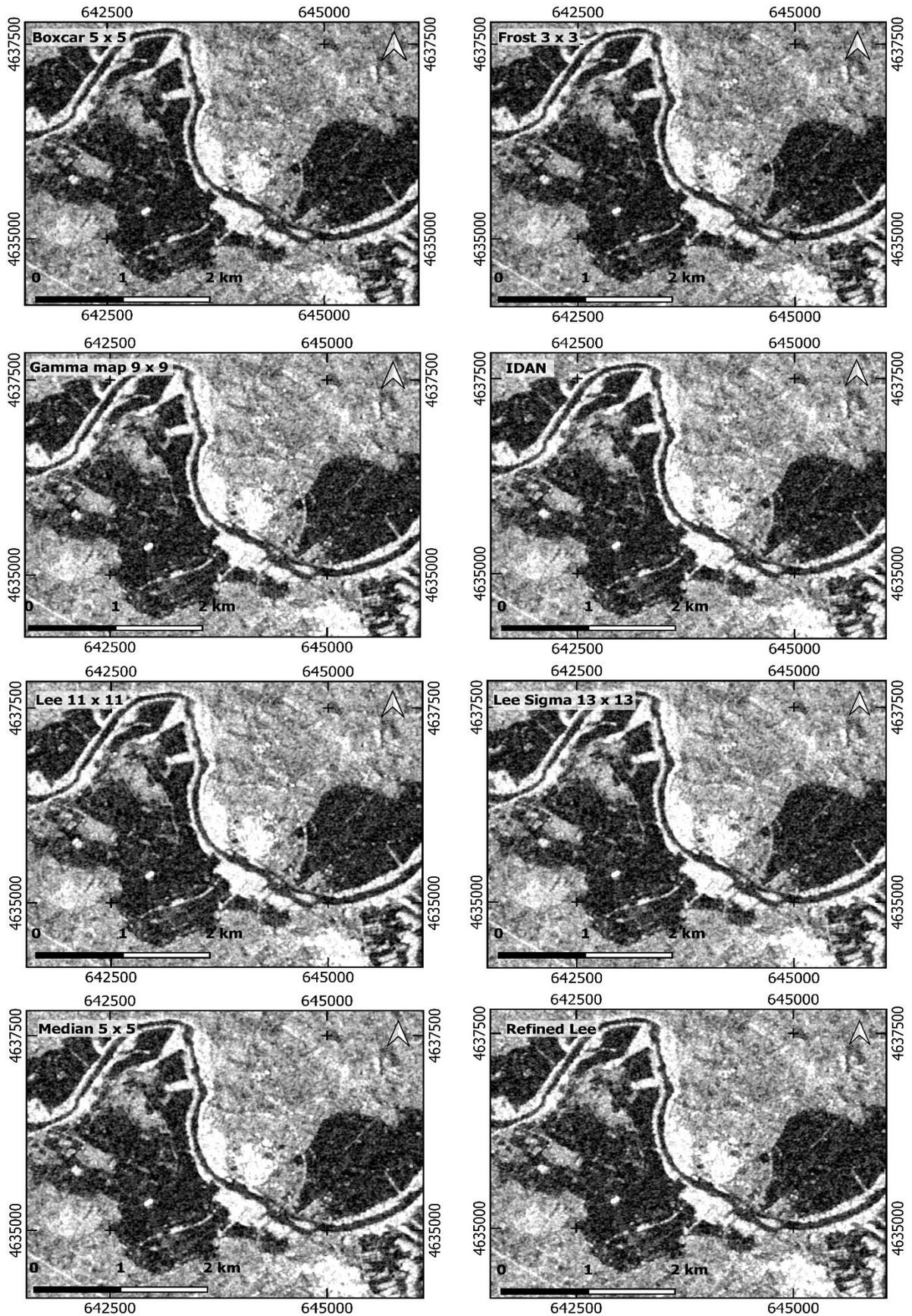


Figura 6. Imágenes con polarización VH. Detalle de una sección de la zona estudiada a 13/04/2018. Cada imagen se corresponde a un filtro. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N.

Mediante el análisis de los histogramas para las distintas polarizaciones, VH y VV (Figura 7), se ha determinado que la polarización más adecuada es la VH. Pues esta polarización, permite una mejor definición del umbral del agua, y de este modo, crear las máscaras de agua. Esto se corresponderá con la metodología aplicada por Carreño y de Mata (2019).

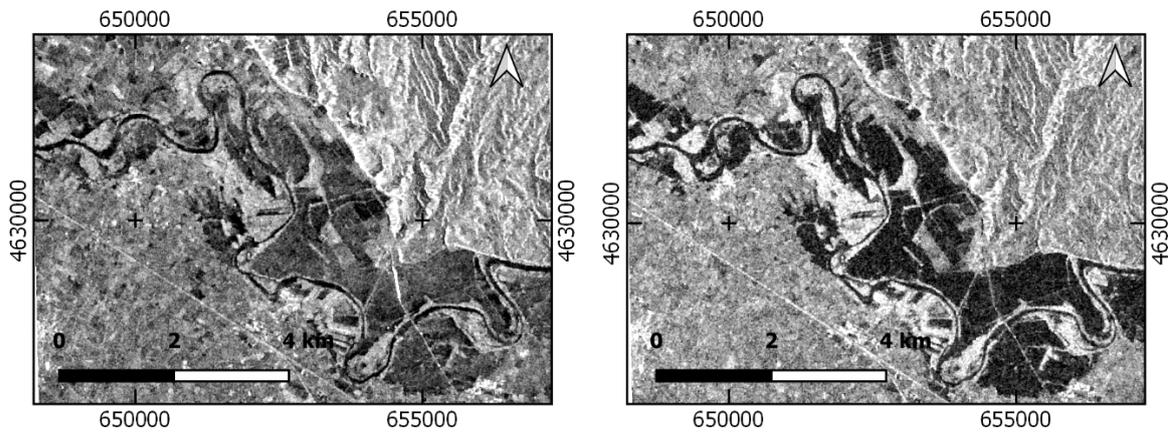


Figura 7. A la izquierda, polarización VV y a la de la derecha, polarización VH. Pertenecen al filtro IDAN. Sistema de coordenadas ETRS89 – UTM 30N. (Detalle de una sección).

3.4 Procesamiento de las imágenes RADAR

Una vez elegido el filtro, se ha procedido al procesamiento de las imágenes de antes y durante el evento de la siguiente manera (Figura 8). Al igual que el preprocesamiento, el programa empleado ha sido SNAP.

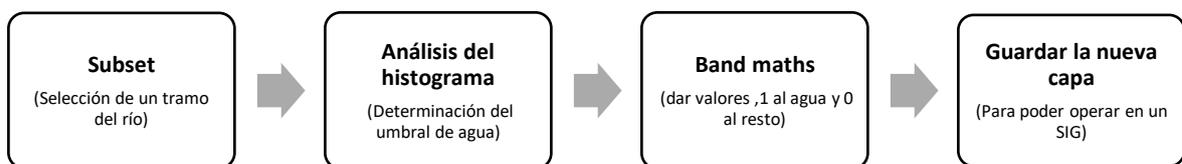


Figura 8. Pasos seguidos para el procesamiento de las imágenes RADAR.

Con ello, obtendremos unas imágenes recortadas conforme a la zona de estudio que queremos emplear.

A través del operador *Band maths*, se ha creado una máscara de agua (Figura 9), a través de la siguiente expresión:

- If $\text{Sigma0_VH_db} \leq \text{umbral}$ then 1 else 0. De esta manera, se ha creado una máscara de agua con valores 1, para los píxeles con valores iguales o menores al umbral previamente establecido, y 0 al resto.

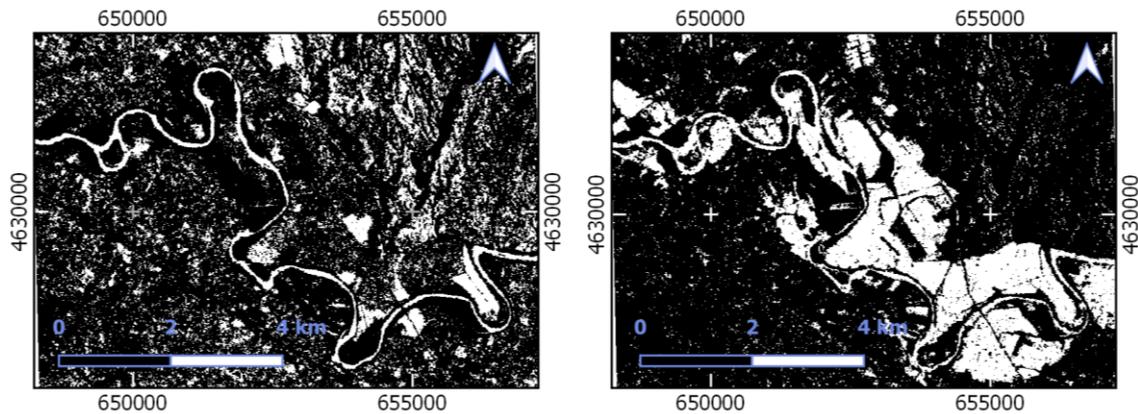


Figura 9. Máscaras de agua (IDAN). La izquierda, se corresponde con el 6/04/2018, y la derecha, con el 13/04/2018. Sistema de coordenadas es ETRS89 - UTM 30N. En blanco, zonas con agua y en negro, sin ella. (Detalle de una sección).

3.5 Procesamiento de las imágenes RADAR en QGIS

Una vez creadas las máscaras de agua con SNAP, se ha procedido a trabajar con las mismas con el software libre QGIS. En particular la versión QGIS 3.8.3. Con la finalidad de obtener las áreas puramente inundadas, obtenidas a partir de los distintos tipos de filtrado.

Los pasos seguidos para la obtención de un área inundada, han sido los siguientes:

- 1º - Cargar la capa ráster calculada con SNAP.
- 2º - Poligonizar el ráster (consiste en transformar de ráster a vectorial).
- 3º - Modificar la capa vectorial formada por 1 (agua) y 0 (sin agua). Eliminando todos los valores 0, para quedarnos únicamente con las zonas de agua.
- 4º - Como resultado, se han obtenido dos capas, que se corresponden con dos estados distintos de situación. En la del día 6, se obtiene el cauce del río, es decir, la zona que normalmente lleva agua, además de otros sectores que también están clasificados con agua. Y en la del día 13, correspondiente con el momento de la inundación, además de incluir las áreas que normalmente tienen agua.

Puesto que lo interesante en el presente estudio, es la zona inundada, a la capa del día 13 de abril se le ha procedido a eliminar la del 6 de abril, para obtener una única capa con las áreas inundadas.

Una vez obtenidas las capas finales, se ha procedido a realizar una limpieza más exhaustiva, centrándose en la zona delimitada por la ortofotografía (CHE, 14 de abril de 2018).

3.6 Procesamiento de las imágenes ÓPTICAS

Debido a que, las imágenes empleadas presentan un nivel 2A, no será necesario realizar ningún procesado adicional con SNAP. En el caso de trabajar con imágenes con un nivel 1C, sería necesario hacer un procesamiento adicional para transformarlas al nivel 2A.

Al igual que las imágenes RADAR, para cada índice de agua (Figura 10 y 11), se realizará una máscara de agua (Figuras 12 y 13). En este caso, en vez de obtener los umbrales a partir del estudio de los histogramas de las zonas inundadas, el umbral será el determinado por los autores de los índices de agua elegidos. En ambos índices, se tomarán los valores superiores a 0.

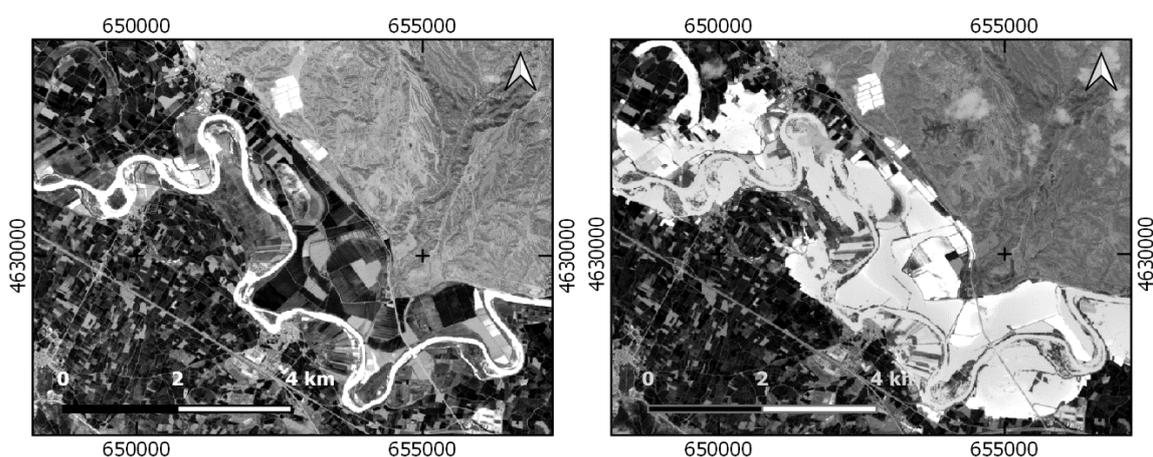


Figura 10. Índice NDWI para el 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). Las zonas brillantes, se corresponden con zonas de agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).

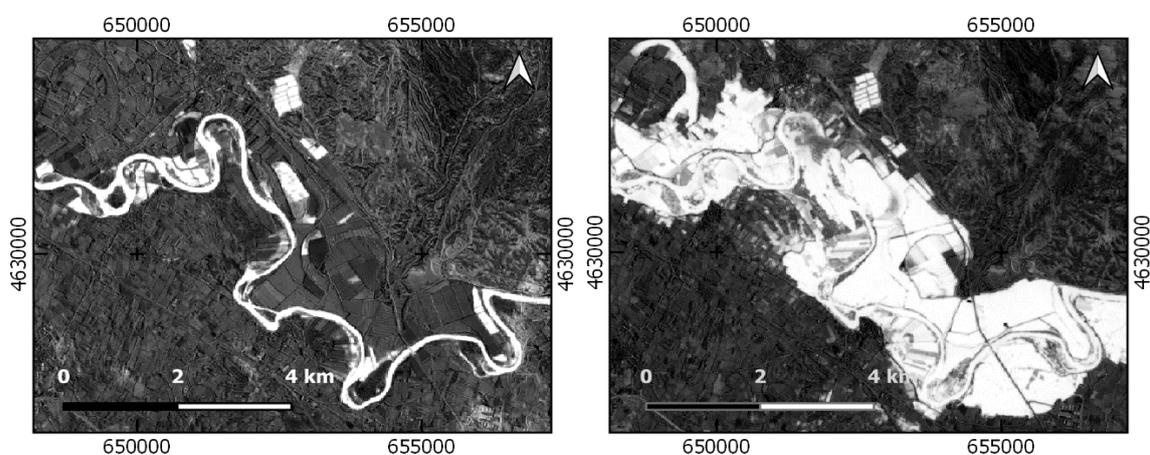


Figura 11. Índice MNDWI para el 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). Las zonas brillantes, se corresponden con zonas de agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).

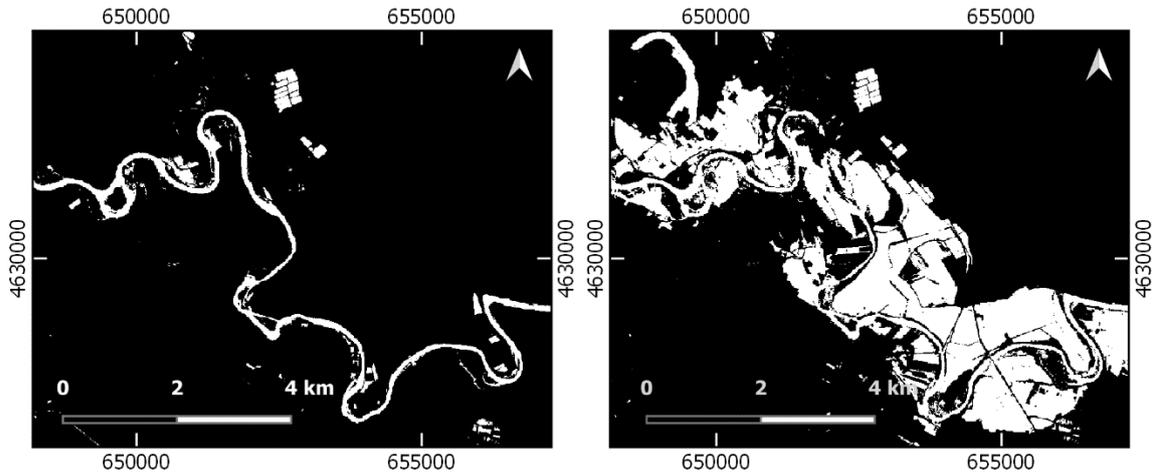


Figura 12. Máscara de agua para el índice NDWI del 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). En blanco, zonas con agua, y en negro, zonas sin agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).

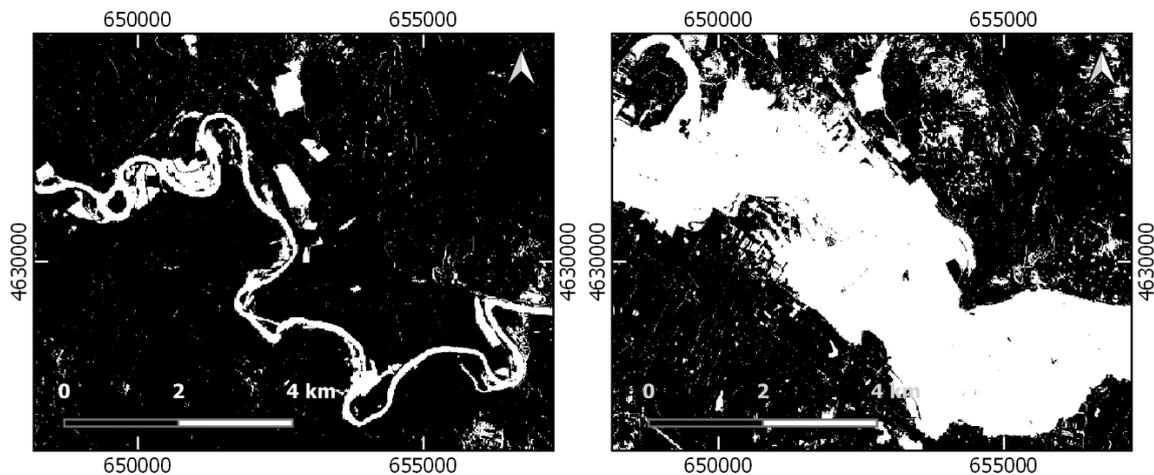


Figura 13. Máscara de agua para el índice MNDWI del 30/03/2018 (izquierda) y 14/04/2018 (derecha). En blanco, zonas con agua, y en negro, zonas sin agua. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N. (Detalle de una sección).

3.7 Procesamiento de las imágenes ÓPTICAS en QGIS

El procesamiento empleado será el mismo que para las imágenes RADAR, descrito en el apartado anterior número 3.5 (Procesamiento de las imágenes RADAR en QGIS).

Obteniendo de esta manera, las zonas inundadas para los dos índices propuestos, NDWI y MNDWI (Figura 14).

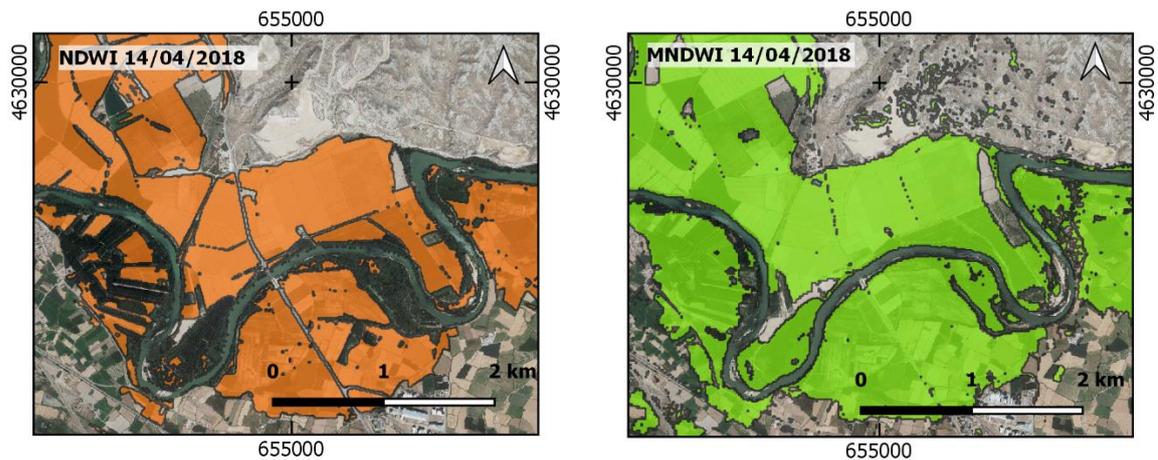


Figura 14. Detalle de una sección de las zonas inundadas resultantes de aplicar el procesamiento de las imágenes ópticas en QGIS. Sistema de coordenadas ETRS89 - UTM 30N.

3.8 Índices de agua

El programa SNAP, nos permite emplear diferentes índices para procesar las imágenes, desde los centrados en el agua, a los centrados en la vegetación.

En este trabajo, nos vamos a centrar en los índices de agua, concretamente, en los definidos en SNAP con los nombres NDWI2 y MNDWI.

El **Índice Diferencial de Agua Normalizado** (NDWI, por sus siglas en inglés, Normalized Difference Water Index), se emplea para analizar el contenido de humedad presente en las plantas y en el suelo. Para su cálculo, podemos emplear diferente metodología, en función de las bandas empleadas. SNAP, nos da la posibilidad de calcularlo mediante McFeeters (1996) o Gao (1996). La expresión para su cálculo es la siguiente:

- $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$ Método de McFeeters (1996).
- $NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$ Método de Gao (1996).

Para este trabajo, el índice elegido, es mediante la metodología de McFeeters (1996). En dicho índice, el autor, indica que hay que establecer el umbral del agua, entre el -1 y el +1, que es el intervalo del NDWI. McFeeters (1996), establecerá que los valores superiores a 0, serán clasificados como superficies con agua.

El **Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado** (MNDWI, por sus siglas en inglés, Modified Normalized Difference Water Index) fue propuesto por Xu en 2006. Se

caracteriza por ser un índice semejante al propuesto por McFeeters. La expresión empleada para su cálculo, es la siguientes:

$$- \text{MNDWI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR})$$

Es decir, en este método, se emplea el infrarrojo de onda corta (SWIR). Al igual que el índice anterior, los valores van desde el -1 hasta el + 1. Y el autor, determina, que los valores superiores a 0 (es decir, los positivos), nos indicarán la presencia de agua.

3.9 Matriz de confusión

También llamada matriz de error o tabla de contingencia (Sánchez, 2016).

Con la matriz de confusión, buscamos comparar los resultados obtenidos mediante los distintos filtros, con respecto a la realidad. Para ello se emplearán dos tipos de clases, a las que se les asignará un valor numérico, siendo 0 ausencia de agua y 1 presencia de ella. Para poder completar la matriz de confusión, se ha procedido a la selección de 350 puntos aleatorios contenidos en la zona definida. A estos 350 puntos se les ha asignado para cada filtro, la clase correspondiente.

La razón del número de puntos elegidos, ha sido el poder garantizar una buena distribución de los mismos en toda el área de estudio.

Estos 350 puntos (Anexo 3) han sido establecidos de forma aleatoria por el programa QGIS mediante el uso de la herramienta de puntos aleatorios. Sánchez (2016), indica que, a la hora de hacer el muestreo, es necesario emplear un mínimo de 50 puntos por clase. En este trabajo, se ha optado por los 350 puntos anteriormente enunciados, para tener una mayor seguridad en los resultados.

Como resultado obtenido, se expondrá la matriz resultante para cada filtro, siguiendo la configuración del modelo que se muestra a continuación en la Tabla 8, y los resultados se han obtenido a partir del estudio individualizado de cada punto, con la realidad.

La realidad ha sido establecida a partir de la interpretación de cada punto de muestro, con la ortofotografía (Anexo 3) tomada por la CHE, con fecha de 14 de abril de 2018.

Tabla 8. Modelo empleado de matriz de confusión.

		Predicción	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativo (FN)
	Negativo	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

En este trabajo, se cuenta con dos tipos de clases, ausencia (0) y presencia (1) que, a su vez, los podemos catalogar como:

- Verdaderos positivos (VP). Cuando la realidad coincide con la predicción del modelo, es decir, ambos coinciden en señalar la presencia de agua.
- Verdaderos negativos (VN). Cuando en la realidad no hay presencia de agua y la predicción del modelo dice lo mismo.
- Falsos Negativos (FN). Cuando la realidad dice que hay presencia de agua, pero el modelo no la detecta.
- Falsos Positivos (FP). La realidad indica ausencia de agua, pero el modelo nos indica que si la hay.

Una buena clasificación, será aquella, donde los puntos se concentren en la diagonal formada por los Verdaderos Positivos y los Verdaderos Negativos. Pues, esto nos indicará que la realidad coincide con lo determinado con la predicción del modelo.

Los valores que no estén contenidos en la diagonal anteriormente descrita, serán catalogados como errores, estos errores pueden ser de dos tipos distintos (Sánchez, 2016):

- Errores de comisión: aquellos producidos por elementos que aparecen en una clase, aunque no pertenezcan a ella. Un ejemplo, decir que en un punto hay presencia de agua cuando no es correcto.
- Errores de omisión: serán los producidos por aquellos elementos pertenecientes a una clase, pero no aparecen definidos en ella. Serán aquellos puntos en los cuales el modelo no ha indicado correctamente la presencia, cuando de verdad la hay o la ausencia cuando de verdad no la hay.

A través de la matriz de confusión, además de ver visualmente la distribución de los puntos en VP, VN, FP y FN, también podemos extraer una serie de información a través de

operaciones estadísticas. Podemos obtener la precisión global, la sensibilidad, la especificidad y el índice Kappa.

Precisión global (*Overall accuracy*). Probabilidad de que los puntos sean clasificados correctamente por los filtros e índices. Lo calcularemos a través de la siguiente expresión:

$$- \quad \Sigma \text{ verdaderos positivos} + \Sigma \text{ verdaderos negativos} / n^{\circ} \text{ total de puntos de muestreo.}$$

Sensibilidad (*Sensitivity*). Probabilidad de que un punto con agua, de positivo (es decir, sea identificado por el filtro o índice, de forma correcta en forma de agua). La sensibilidad se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$- \quad \Sigma \text{ verdaderos positivos} / \Sigma \text{ verdaderos positivos} + \Sigma \text{ falsos positivos}$$

Especificidad (*Specificity*). Probabilidad de que un punto sin agua, de negativo (es decir, que el filtro/índice, identifique correctamente la ausencia de agua). La especificidad, se obtiene mediante lo siguiente:

$$- \quad \Sigma \text{ verdaderos negativos} / \Sigma \text{ verdaderos negativos} + \Sigma \text{ falsos negativos}$$

Para calcular la Precisión global, Sensibilidad y Especificidad, se ha seguido la metodología descrita por la publicación de Alberg et al., 2004.

Índice Kappa. Empleado para evaluar la concordancia de los datos de la matriz. En este caso, se buscará la concordancia entre los datos obtenidos a través del empleo de distintos filtros e índices, y los datos obtenidos por el observador, para la realidad.

La metodología empleada para el cálculo del índice Kappa, es la descrita por Abaira (2000), en su trabajo, *El Índice Kappa*.

La expresión matemática empleada para su cálculo, es la siguiente:

$$- \quad K = P_0 - P_e / 1 - P_e$$

Los términos P_0 y P_e , hacen referencia a:

$$- \quad P_0 = (VP+VN) / N$$

$$- \quad P_e = ((VP+FN) \times (VP+FP)) + ((FP+VN) \times (FN+VN)) / N^2$$

$$- \quad N = \text{número total de puntos de muestreo.}$$

Según el índice Kappa, los resultados se pueden clasificar atendiendo al grado de concordancia de la siguiente manera (Tabla 9):

Tabla 9. Índice Kappa y Grado de acuerdo (Abraira, 2001).

Kappa	Grado de acuerdo	Kappa	Grado de acuerdo
<0,00	Sin acuerdo	0,41 – 0,60	Moderado
0,00 – 0,20	Insignificante	0,61 – 0,80	Sustancial
0,21 – 0,40	Mediano	0,81 – 1,00	Casi perfecto

Nota

Para la realización de los mapas, se ha empleado la información geográfica de referencia, en formato shapefile (.shp), proporcionada por el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

4. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos aplicando la metodología anteriormente expuesta.

4.1 Determinación de los umbrales de calibración

Para la determinación de los umbrales de calibración, se han seleccionado una media de dos sectores, correspondientes con áreas inundadas. Esto se ha realizado con la finalidad de poder determinar con exactitud, mediante el análisis de esos dos histogramas, el límite a partir del cual, podemos decir que se corresponde con el agua. Ya que, mediante el estudio de un único histograma, podríamos perder la precisión buscada. A modo de ejemplo, en el Anexo 2 (Modelo de umbral de calibración), se propondrá la explicación de forma detallada, del modelo propuesto para los filtros.

Los umbrales propuestos para cada filtro han sido los siguientes (Tabla 10).

Tabla 10. Umbrales definidos para cada filtro

Filtro	Límite a partir del cual es agua (dB)
Lee 7 x 7	-21
Lee 11 x 11	-20,5
Lee 11 x 11 *	- 21
Frost 3 x 3	-19
Frost 7 x 7	-20
IDAN	-20
Boxcar 5 x 5	-20
Median 5 x 5	-20
Gamma map 9 x 9	-20,5
Lee Sigma 5x5	-21
Lee Sigma 13 x13	-21
Refined Lee	-20

* Para el filtro Lee 11 x 11, no se ha podido determinar con precisión el límite, por lo que se ha optado por el empleo del filtro con ambos valores. Así de esta forma, podremos comparar el mismo filtro, y ver cómo le afecta el empleo de umbrales distintos.

4.2 Puntos de muestreo

Una vez analizados los 350 puntos aleatorios de muestreo, se han clasificado cada uno de los filtros, en función de las clases anteriormente definidas, 1 para el agua y 0 para los puntos con ausencia de la misma. Los resultados obtenidos para cada filtro se mostrarán a continuación (Tabla 11). Además, también se incluirán los resultados obtenidos por los dos tipos de índices de agua empleados (NDWI y MNDWI).

Tabla 11. Número de identificaciones de agua (1) y ausencia de agua (0).

Filtro	1 (Agua)	0 (Ausencia de agua)
Boxcar 5 x 5	78	272
Frost 3 x 3	67	283
Frost 7 x 7	82	268
Gamma map 9 x 9	79	271
IDAN	78	272
Lee 7 x 7	74	276
Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	79	271
Lee 11 x 11 (-21 dB)	73	277
Lee Sigma 5 x 5	80	270
Lee Sigma 13 x 13	81	269
Median 5 x 5	81	269
Refined Lee	81	269
Índice de agua	1 (agua)	0 (Ausencia de agua)
NDWI	100	250
MNDWI	157	193

Los 350 puntos aleatorios han arrojado los siguientes datos para la imagen tomada como realidad, que será la guía, a partir de la cual se compararán el resto.

- Sin agua se han determinado 199 puntos de muestreo.
- El agua, se ha podido identificar en 134 puntos.
- En 17 puntos de muestreo, se ha identificado el cauce del río, a continuación, se explicará cómo se han tenido en cuenta estos puntos.

De acuerdo con este trabajo, a la imagen con la inundación, se le ha eliminado todas las zonas que normalmente llevan agua, como es en el caso del cauce del río, todos los puntos

de muestreo que hayan resultado en el cauce del río, se tomarán como zonas sin agua, pues deberán aparecer como zonas sin agua.

De esta forma, nos quedarán los puntos del muestreo repartidos de la siguiente forma:

- Con agua, se contará con 134 puntos.
- Sin agua, se tendrán los 216 puntos restantes.

4.3 Incertidumbre detectada

A la hora de analizar los puntos de muestreo que estaban presentes en zonas susceptibles de ser inundadas, se ha observado una serie de limitaciones que se han tenido en cuenta:

Puesto que el RADAR, tiene una capacidad de penetración en el terreno de unos 5 centímetros, se ha observado en las capas obtenidas en QGIS, en diferentes puntos, el filtro debería haber detectado agua, pero no lo ha hecho, debido a la vegetación presente.

Por lo que se ha optado en el presente trabajo, por reclasificar aquellos puntos, que deberían indicar claramente la presencia de agua, pero que el filtro no ha sido capaz de detectar.

Las zonas afectadas se corresponden con zonas de cultivos, de arbustos y árboles.

Para poder garantizar una homogeneidad entre los filtros, se ha decidido contar con un número constante de puntos reclasificados, con el fin de garantizar la igualdad entre los filtros, evitando favorecer unos frente a otros.

Para ello se han reclasificado un total de 28 puntos.

Con el fin de garantizar la igualdad entre los resultados de los filtros y los índices, se han tenido en cuenta los puntos reclasificados también para los índices.

4.4 Matrices de confusión

A continuación, se mostrarán las matrices (Tablas 12 a 25) resultantes para los filtros y los índices de agua. Los resultados serán una vez reclasificados los puntos de muestreo, estando entre paréntesis, los resultados originales.

Además, se proporcionará una interpretación de las mismas.

Tabla 12. Matriz de confusión para el filtro Boxcar 5 x 5.

		Predicción filtro Boxcar 5 x 5	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	93 (67)	41 (67)
	Negativo	11 (11)	205 (205)

El filtro Boxcar 5x5, falla a la hora de detectar agua en 11 ocasiones, de ellas, 3 identifica el cauce del río. De los 28 puntos posibles de reclasificación, este filtro, ha necesitado reclasificar 26 de ellos, elevando los puntos detectados correctamente como agua de 67 a 93.

Tabla 13. Matriz de confusión para el filtro Frost 3 x 3.

		Predicción filtro Frost 3 x 3	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	79 (54)	55 (80)
	Negativo	13 (13)	203 (203)

El filtro Frost 3 x 3, falla a la hora de detectar agua en 13 ocasiones, de las cuales, 3 identifica el cauce del río. Este filtro, ha necesitado de 25 de los 28 puntos posibles para reclasificar, o lo que es lo mismo, de los 28 puntos problemáticos, ha logrado detectar agua en 3 de ellos.

Tabla 14. Matriz de confusión para el filtro Frost 7 x 7.

		Predicción filtro Frost 7 x 7	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	96 (70)	38 (64)
	Negativo	12 (12)	204 (204)

El filtro Frost 7 x 7, falla a la hora de detectar agua en 12 ocasiones (falsos positivos), de las cuales, 4 de ellas, identifica el cauce del río. Mientras que, en 13 ocasiones, acierta al no detectar el río. Para este filtro, ha sido necesario reclasificar 26 de los 28 puntos posibles.

Tabla 15. Matriz de confusión para el filtro Gamma map 9 x 9.

		Predicción filtro Gamma map 9 x 9	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	93 (67)	41 (67)
	Negativo	12 (12)	204 (204)

El filtro Gamma map 9 x 9, falla a la hora de detectar agua en 12 ocasiones, de las cuales, 3 identifica el cauce del río. Además, ha precisado reclasificar 26 de los puntos previstos.

Tabla 16. Matriz de confusión para el filtro IDAN.

		Predicción filtro IDAN	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	95 (69)	39 (65)
	Negativo	9 (9)	207 (207)

El filtro IDAN, falla a la hora de detectar agua en 9 ocasiones, a diferencia de los anteriores, este filtro, acierta al no identificar ningún punto de muestro incluido en el cauce del río, como agua. Además, requiere de reclasificar 26 puntos.

Tabla 17. Matriz de confusión para el filtro Lee 7 x 7.

		Predicción filtro Lee 7 x 7	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	88 (62)	46 (72)
	Negativo	12 (12)	204 (204)

El filtro Lee 7 x 7, falla a la hora de detectar agua en 11 ocasiones, de las cuales, 3 identifica el cauce del río, acertando en las 14 veces restantes que no lo detecta. Los puntos reclasificados para este filtro, han sido 26.

Tabla 18. Matriz de confusión para el filtro Lee 11 x 11, con un umbral de -20,5 dB.

		Predicción filtro Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	93 (68)	41 (66)
	Negativo	11 (11)	205 (205)

El filtro Lee 11 x 11, con un umbral de -20,5 dB, falla a la hora de detectar 2 veces el cauce del río. Ha precisado de 25 de los 28 puntos para reclasificar posibles.

Tabla 19. Matriz de confusión para el filtro Lee 11 x 11, con un umbral de -21 dB.

		Predicción filtro Lee 11 x 11 (-21 dB)	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	88 (62)	46 (72)
	Negativo	11 (11)	205 (205)

El filtro con -21 dB, ha identificado 5 puntos menos como agua que el de -20,5 dB. Ambos fallan 2 veces al detectar el cauce del río, tienen el mismo número de fallos al detectar agua cuando no la hay. Aunque se corresponden en número, no en los mismos puntos. Además, el filtro con umbral -21 dB, ha requerido de un punto de reclasificación adicional.

Tabla 20. Matriz de confusión para el filtro Lee sigma 5 x 5.

		Predicción filtro Lee sigma 5 x 5	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	94 (69)	40 (65)
	Negativo	11 (11)	205 (205)

El filtro Lee sigma 5 x 5, falla a la hora de detectar agua en 11 ocasiones, de las cuales, 3 identifica el cauce del río. Requiere de 25 puntos para su reclasificación.

Tabla 21. Matriz de confusión para el filtro Lee sigma 13 x 13.

		Predicción filtro Lee sigma 13 x 13	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	93 (68)	41 (66)
	Negativo	13 (13)	203 (203)

El filtro, falla a la hora de detectar agua en 12 ocasiones, de las cuales, 3 identifica el cauce del río. Los puntos de muestreo reclasificados, han sido 25.

Tabla 22. Matriz de confusión para el filtro Median 5 x 5.

		Predicción filtro Median 5 x 5	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	94 (69)	40 (65)
	Negativo	12 (12)	204 (204)

El filtro Median 5 x 5, de las 12 ocasiones que falla al detectar agua, 3 de ellas, se corresponden con el cauce del río. Se han reclasificado 25 puntos.

Tabla 23. Matriz de confusión para el filtro Refined Lee.

		Predicción filtro Refined Lee	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	93 (67)	41 (67)
	Negativo	14 (14)	202 (202)

El filtro Refined Lee, falla a la hora de detectar agua en 14 ocasiones, siendo 4 de ellas, el cauce del río. Ha requerido la reclasificación de 26 puntos adicionales.

Tabla 24. Matriz de confusión para el índice NDWI.

		Predicción índice NDWI	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	113 (90)	21 (44)
	Negativo	10 (10)	206 (206)

El índice NDWI, ha cometido 10 errores al detectar agua, en el que se incluyen 2 veces el cauce del río. Al igual que los filtros, este índice ha requerido de reclasificar 23 puntos.

Tabla 25. Matriz de confusión para el índice MNDWI.

		Predicción índice MNDWI	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	114 (121)	20 (13)
	Negativo	43 (43)	173 (173)

Este índice, ha sido entre todos los filtros e índices analizados, el que menos puntos reclasificados ha necesitado, siendo un total de 7 los puntos reclasificados. De las 43 veces que comete el error de detectar agua, 4 se corresponden con el cauce del río.

5. DISCUSIÓN

A continuación, en primer lugar, se mostrarán los resultados para los filtros y los índices, sin tener en cuenta los puntos reclasificados.

Podemos comprobar en la siguiente tabla (Tabla 26), que el filtro que mayor número de identificaciones exitosas a la hora de determinar la presencia de agua, es Frost 7 x 7, con 70. Y el índice Mndwi, con 114 identificaciones positivas.

Tabla 26. Resultados de los puntos de muestreo para cada índice, sin tener en cuenta los puntos reclasificados.

Filtro	Positivos en agua		Negativos en agua	
	Verdaderos Positivos	Falsos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Negativos
Boxcar 5 x 5	67	11	205	67
Frost 3 x 3	54	13	203	80
Frost 7 x 7	70	12	204	64
Gamma map 9 x 9	67	12	204	67
IDAN	69	9	207	65
Lee 7 x 7	62	12	204	72
Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	68	11	205	66
Lee 11 x 11 (-21 dB)	62	11	205	72
Lee sigma 5 x 5	69	11	205	65
Lee sigma 13 x 13	68	13	203	66
Median 5 x 5	69	12	204	65
Refined Lee	67	14	202	67
Índice				
Ndwi	90	10	206	44
Mndwi	114	43	173	20

El filtro que comete menos errores a la hora de identificar agua cuando en realidad no la hay (falso positivo), es el filtro IDAN, con 9. Mientras que el que comete más errores, por parte de los filtros es Refined Lee con 14, y por parte de los índices, el Mndwi con 43.

El rango entre los verdaderos negativos, oscila entre el mínimo de 203 a el máximo de 207 (para los filtros). Mientras, en el caso de los índices, el rango es mucho mayor, oscilando entre los 173 del Mndwi a los 206 del Ndwi.

A continuación, se mostrará una tabla con los resultados para la **precisión global** (*Overall accuracy*), **sensibilidad** (*Sensitivity*), **especificidad** (*Specificity*) e **Índice Kappa**, de las matrices de confusión, a través de la Tabla 27.

Tabla 27. Resultados globales de la precisión, sensibilidad, especificidad e índice Kappa, de los filtros e índices.

Filtro	Precisión Global	Sensibilidad	Especificidad	Índice Kappa
Boxcar 5 x 5	77,71 %	85,90 %	75,37 %	48,78 %
Frost 3 x 3	73,43 %	80,60 %	71,73 %	37,87 %
Frost 7 x 7	78,29 %	85,37 %	76,12 %	50,39 %
Gamma map 9 x 9	77,43 %	84,81 %	75,28 %	48,20 %
IDAN	78,86 %	88,46 %	76,10 %	51,40 %
Lee 7 x 7	76,00 %	83,78 %	73,91 %	44,49 %
Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	78,00 %	86,08 %	75,65 %	49,51 %
Lee 11 x 11 (-21 dB)	76,29 %	84,93 %	74,01 %	45,07 %
Lee Sigma 5 x 5	78,29 %	86,25 %	75,93 %	50,24 %
Lee Sigma 13 x 13	77,43 %	83,95 %	75,46 %	48,36 %
Median 5 x 5	78,00%	85,18 %	75,84 %	49,67 %
Refined Lee	76,87 %	82,72 %	75,10 %	47,05 %
Índice				
Ndwi	84,57 %	90,00 %	82,40 %	65,70 %
Mndwi	82,00 %	72,61 %	89,64 %	63,11 %

Podemos observar una media de precisión global para los filtros del 77,22 %, quedando por debajo, los filtros Frost 3 x 3, Lee 7 x 7, Lee 11 x 11 (-21 dB) y Refined Lee.

Con reclasificación:

Añadiendo a los resultados los puntos reclasificados para cada filtro e índice, obtendremos los siguientes resultados:

En la Tabla 28, podemos observar la relación de Positivos en agua y Negativos, dependiendo de si son correctas o incorrectas identificaciones.

Tabla 28. Resultados de los puntos de muestreo para cada filtro e índice, teniendo en cuenta los puntos reclasificados.

Filtro	Positivos en agua		Negativos en agua	
	Verdaderos Positivos	Falsos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Negativos
Boxcar 5 x 5	93 (+26)	11	205	41 (-26)
Frost 3 x 3	79 (+26)	13	203	55 (-26)
Frost 7 x 7	96 (+26)	12	204	38 (-26)
Gamma map 9 x 9	93 (+26)	12	204	41 (-26)
IDAN	95 (+26)	9	207	39 (-26)
Lee 7 x 7	88 (+26)	12	204	46 (-26)
Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	93 (+25)	11	205	41 (-25)
Lee 11 x 11 (-21 dB)	88 (+26)	11	205	46 (-26)
Lee sigma 5 x 5	94 (+25)	11	205	40 (-25)
Lee sigma 13 x 13	93 (+25)	13	203	41 (-25)
Median 5 x 5	94 (+25)	12	204	40 (-25)
Refined Lee	93 (+26)	14	202	41 (-26)
Índice				
Ndwi	113 (+23)	10	206	21 (-23)
Mndwi	121 (+7)	43	173	13 (-7)

Entre paréntesis, se ha puesto la variación entre los resultados originales, y los resultados con la reclasificación.

Se puede observar que los puntos reclasificados en los filtros oscilan entre los 25 y los 26, mientras que, en los índices de agua, la horquilla es más amplia, siendo Mndwi el que menor número de puntos reclasificados requiere, 7, y Ndwi necesita de 23.

Los resultados finales para la **precisión global** (*Overall accuracy*), **sensibilidad** (*Sensitivity*), **especificidad** (*Specificity*) e **Índice Kappa**, de las matrices de confusión, teniendo en cuenta los puntos reclasificados se mostrarán en la Tabla 29.

Tabla 29. Resultados globales de la precisión, sensibilidad, especificidad e índice Kappa, de los filtros e índices reclasificados.

Filtro	Precisión Global	Sensibilidad	Especificidad	Índice Kappa
Boxcar 5 x 5	85,14 %	89,42 %	83,33 %	67,16 %
Frost 3 x 3	80,57 %	85,87 %	78,68 %	56,28 %
Frost 7 x 7	85,71 %	88,89 %	84,30 %	68,61 %
Gamma map 9 x 9	84,86 %	88,57 %	83,26 %	66,58 %
IDAN	86,29 %	91,35 %	84,15 %	69,69 %
Lee 7 x 7	83,43 %	88,00 %	81,60 %	63,16 %
Lee 11 x 11 (-20,5 dB)	85,14 %	89,42 %	83,33 %	67,16 %
Lee 11 x 11 (-21 dB)	83,71 %	88,89 %	81,67 %	63,74 %
Lee Sigma 5 x 5	85,43 %	89,52 %	83,67 %	67,84 %
Lee Sigma 13 x 13	84,57 %	87,74 %	83,20 %	66,00 %
Median 5 x 5	85,14 %	88,68 %	83,61 %	67,26 %
Refined Lee	84,29 %	86,92 %	83,13 %	65,42 %
Índice				
Ndwi	91,12 %	91,87 %	90,71 %	80,93 %
Mndwi	84,00 %	73,78 %	93,01 %	67,52 %

Podemos observar los efectos producidos por la reclasificación para los distintos filtros e índices propuestos. Gracias a ello, han aumentado la precisión global, sensibilidad, especificidad e índice Kappa.

En el caso de la precisión global media de los filtros, ha aumentado del 77,22 % sin reclasificar a un 84,52 %, estando la horquilla de variación de los valores entre los 7,14 puntos a los 7,43, para los que más han incrementado dicho valor.

La sensibilidad media, se ha incrementado desde un 84,84 % al 88,61 %, estando el menor incremento en el filtro IDAN, sólo ha incrementado su porcentaje en 2,89 puntos, por el contrario, el que más lo ha incrementado, es el filtro Frost 3 x 3, cuya variación es de 5,27 puntos.

Pero hay un término, cuyas variaciones han sido muy altas, este es el índice Kappa. Pasando de una media global de los filtros del 47,59 % al 65,74 %. Permitiéndole pasar de una media del grado de acuerdo de Moderado a Sustancial. Esto nos hará mejorar la concordancia entre los datos tomados por el observador y lo dispuesto por los filtros. En el caso de los índices,

la media de Kappa, ha variado del valor inicial del 64,41 %, al reclasificado de 74,23 %, en este caso, a diferencia de los filtros que sí variaban el grado de acuerdo, en el caso de los índices, sufrirán un incremento, pero se seguirán clasificando de la misma manera, en el grado de acuerdo Sustancial.

Como se ha podido comprobar en el apartado 4 (**Resultados**), casi todos los filtros, a excepción del filtro IDAN, detectan agua en algún punto del cauce del río. Por lo que todos los filtros, a excepción del anteriormente comentado, fallan a la hora de identificar con claridad el cauce del río. Deberían haberse obtenido todas las identificaciones del cauce del río como ausencia de agua.

A la hora de identificar los puntos coincidentes con el cauce del río, se ha tenido en cuenta su ubicación, pues un punto coincidente con una zona próxima al margen, podría corresponderse con una zona que solo llevaría agua en las crecidas. En el caso de este estudio, los puntos coincidentes con el cauce del río, se identifican en zonas centrales, o próximas a ella, por lo que con inundación y sin ella, se han interpretado de forma que siempre llevan agua.

También, a partir del análisis de los resultados, podemos extraer las siguientes conclusiones en cuando a lo siguiente:

Los puntos obtenidos en los falsos positivos, aquellos que el filtro toma como agua, pueden también ser interpretados de forma distinta. Ya que las imágenes Sentinel – 1, son tomadas por un SAR de Banda C, y como se ha comentado en el apartado de las características de las imágenes RADAR, la Banda C, tiene una capacidad de penetración de entre 4 a 8 centímetros. Pues podría ser que, aunque a través de la identificación visual de la ortofotografía, hayamos interpretado como ausencia de agua, el RADAR está identificando una concentración de humedad superior, produciendo así, que el filtro identifique esos puntos como agua.

Nota

El criterio de selección empleado para las imágenes utilizadas en este trabajo se ha basado en lo siguiente:

Para las imágenes Sentinel – 1, el criterio se basa en que son las imágenes empleadas por el trabajo enunciado con anterioridad, y por ello se emplean las tomadas el 6 de abril de 2018 y 13 de abril de 2018.

Para las imágenes Sentinel – 2, se ha buscado contar con la imagen más reciente al evento, en este caso la del 14 de abril de 2018, y para la imagen anterior, se ha empleado la del 30 de marzo de 2018. En este caso, no se ha podido contar con una más próxima a la fecha del 6 de abril, porque las imágenes disponibles en el servidor del 1 y 6 de abril de 2018, presentan una nubosidad importante, que hace que no sean aptas para la realización del estudio.

La ortofotografía empleada, fue tomada por la CHE el 14 de abril de 2018. Pues esto nos permitirá, que los resultados de los índices se correspondan con mayor exactitud a la realidad. Mientras que los resultados entre los filtros y la realidad, podrán no ser del todo exactos, debido al lapso de tiempo entre las imágenes empleadas.

6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con anterioridad, se puede determinar, que, para esta zona de campo concreta, el filtro e índice de agua más idóneos son los siguientes:

El filtro seleccionado, es el IDAN, cuyos resultados en forma de mapa, se podrán observar mediante el Anexo 4. Adicionalmente, en el Anexo 1, se puede ver el ejemplo de la tabla empleado y en el Anexo 2, el modelo de umbrales de calibración, cuyos datos se corresponden con los del filtro IDAN.

El filtro Intensity Driven Adaptive Neighborhood (IDAN, por sus siglas en inglés), es el que mejores resultados nos aporta. Obteniendo los mejores resultados en precisión global, sensibilidad e índice Kappa. El único valor en dónde no destaca, es en la especificidad. En ella, es sobrepasado por el filtro Frost 7 x 7.

Las especificaciones empleadas son; *Number of Looks* 1 y *Adaptive Neighbour Size* 50.

Por lo que si le damos más importancia a que el filtro identifique correctamente la ausencia de agua, es decir, que acierte con los verdaderos negativos, el filtro Frost 7 x 7 será un poco más preciso (84,30 % vs 84,15 %), con los valores reclasificados.

El umbral definido para crear la máscara de agua para este filtro, fijado en -20 dB, se ha visto idóneo, pues ha permitido entre otras cosas, una mejor definición del cauce del río. Como se ha comentado con anterioridad, IDAN, es el único que no llega a identificar agua en ninguno de los 17 puntos de muestreo que caen en el cauce del río Ebro.

El filtro IDAN, se caracteriza por reducir el ruido (Speckle) de forma importante en zonas homogéneas, sin afectar a las estructuras presentes, además de preservar de mejor manera el contorno en las imágenes, es decir, preserva mejor la resolución espacial (Vasile et al., 2006). La elección de este filtro, también es definida como “el mejor filtro en la definición de límites entre cuerpos de agua” por Valencia Mora, 2019.

La desventaja a la hora de emplear este filtro, es el elevado tiempo de procesado (Vasile et al., 2006; Mousavi et al., 2015). Este aspecto, se ha comprobado en la realización de este trabajo.

El índice seleccionado, es el Ndwí cuyas zonas inundadas se podrán observar a través del Anexo 5.

Siguiendo la nomenclatura de SNAP, al hablar del Ndwí, nos referimos a NDWI2.

Este índice, es el que presenta unos resultados globales mejores frente al otro índice estudiado (Mndwi). Presentando unos mejores resultados, tanto en la precisión global, sensibilidad, e índice Kappa.

El índice, se caracteriza porque, a pesar de que presenta menos identificaciones positivas de agua en comparación con Mndwi, este último, comete más fallos. Aunque, por el contrario, al identificar los puntos con ausencia de agua, el Ndwi comete más errores. Pero fijándonos en los porcentajes, en el caso de la sensibilidad, la variación es de 18,09 y en la especificidad (la ventaja en este caso es del Mndwi) es de 2,30 puntos de diferencia entre los porcentajes.

Comparación: Comparando los resultados obtenidos en este estudio, con el filtro determinado en el trabajo de Carreño y de Mata (2019), en el que se determinó como idóneo el filtro Lee 7 x 7, podemos extraer las siguientes conclusiones:

Las variaciones encontradas pueden deberse a que, aunque se ha intentado emplear una zona de estudio lo más similar posible, no llega a corresponderse en la totalidad. Por tanto, podrían encontrarse diferencias en los resultados determinados.

En el caso de proponer un segundo filtro, el filtro Lee 7 x 7, tampoco estaría definido para esta posición. Pues el filtro Frost 7 x 7, tiene los mejores resultados en cuanto a la precisión global, especificidad, e índice Kappa, después del filtro IDAN. El único valor con un resultado “peor” frente a otros filtros, sería en la sensibilidad, pues hasta 3 filtros distintos, más el IDAN, tendrían valores superiores al de Frost 7 x 7, aunque el valor de este último seguiría estando por encima del Lee 7 x 7.

También es cierto, que las variaciones encontradas entre los valores de los filtros, se podían enmarcar dentro de un margen de error, por ejemplo, en el caso de la precisión global, la diferencia entre el mejor y el peor, es de apenas 5 puntos.

Por todo esto, si lo que buscamos es tener una alta precisión, lo mejor sería emplear el filtro IDAN y el índice Ndwi (NDWI2 en SNAP).

Por el contrario, emplear cualquiera de los filtros restantes, implicaría perder algo de precisión, pero obtendríamos unos resultados que se asemejarían a lo más idóneo.

Excepción. Por sus resultados, el filtro Frost 3 x 3, sería desaconsejado emplear, pues es el que presenta peores resultados, siendo el único que, sin reclasificar, su grado de acuerdo entre los resultados es Mediano, aunque al reclasificarlo aumenta, seguiría estando por debajo de los otros 11 empleados.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alberg, A., Park, J., Hager, B. W., Brock, M. V., Diener-West, M. (2004). The Use of “Overall Accuracy” to Evaluate the Validity of Screening or Diagnostic Tests. *Journal of General Internal medicine*. 19. 460-5.
- Abraira, V. (2000). El índice Kappa. *Sociedad Española de Médicos de Atención Primaria (SEMERGEN)* 27: 247-249.
- Anguera, J., Pérez, A. (2008). *Teoría de las Antenas. Guía de Estudio*. Ingeniería La Salle. Universitat Ramon Llull. http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teorias_antenas.pdf
- Agencia Espacial Europea – European Space Agency (ESA). Acceso online: <http://www.esa.int/>
- Agencia Espacial Europea – European Space Agency (ESA). SENTINEL-2 User Handbook. ESA Standard Document. 2015. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). Programa de la NASA. Acceso online: <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>
- Bhagat, V. (2017). Space-borne Active Microwave Remote Sensing of Soil Moisture: A Review. *Remote Sensing of Land*. 1. 53-86.
- Carreño F., De Mata M. (2019). Flood Monitoring Based on the Study of Sentinel-1 SAR Images: The Ebro River Case Study. *Water*. 2019; 11(12):2454 <https://doi.org/10.3390/w11122454>
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (2ª ed.). Madrid. Ediciones Rialp, S.A.
- Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Acceso online: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE>
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Acceso online: <http://www.chebro.es/>
- Copernicus Open Access Hub. Plataforma de descarga de imágenes Sentinel 1, Sentinel 2 y Sentinel 3. Acceso online: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

- DOCE (2000). Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58: 257-266.
- Gorrab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Mougenot, B., Fanise, P., Chabaane, Z. L. (2015). Retrieval of Both Soil Moisture and Texture Using TerraSAR-X Images. *Remote Sensing*. 7(8):10098-10116
- 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.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea.
- Mousavi, M., Amini, J., Maghsoudi, Y., Arab, S. (2015). PolSAR Speckle Filtering Techniques and Their Effects on Classification. https://www.researchgate.net/publication/281494638_PoSAR_Speckle_Filtering_Techniques_and_Their_Effects_on_Classification
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Acceso online: <https://www.nasa.gov/>
- Ollero, A., Sánchez Fabre, M., Losada, J. A., Hernández, C. (2004). El comportamiento hídrico del río Ebro en su recorrido por Aragón. *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, Edited by: Peña, J. L., Longares, L. A. and Sánchez Fabre, M. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Pérez, C., Muñoz, A. (2006). *Teledetección Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca. 356 p. ISBN-10: 84-611- 1613-5.
- Programa Copernicus – Copernicus. Acceso online: <https://www.copernicus.eu/en>
- QGIS. Software libre versión 3.8.3. 2019. Acceso online para descarga: <https://qgis.org/downloads/>

- Rodríguez, D., Sánchez, N., Domínguez, J.A., Santa Marta, C. (2015). Cuestiones de Teledetección. Librerías UNED. Madrid.
- Sánchez, J. M. (2016). Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Pensamiento Matemático*, Vol. VI, 9-26.
- Salgado, H., Romay, C., Zabala, S. M., Génova, L. (2012). Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Agronomía de Buenos Aires.
<https://www.ina.gob.ar/cra/riego/fertirriego/pdf/Salgado.pdf>
- Sentinel Application Platform (SNAP). Software libre de la Agencia Espacial Europea versión 8.0. 2020. Acceso online para descarga:
<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- Valencia Mora, B. S. (2019). Seguimiento a la Inundación Ocurrida Durante la Ola Invernal en el Año 2010 sobre las Coberturas Vegetales Identificables en el Municipio de Santa Cruz de Mompós Utilizando Imágenes del Sensor Palsar Del Satélite Alos. Proyecto Curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Vasile, G., Trouvé, E., Lee, J. S., Buzuloiu, V. (2006). Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood Technique for Polarimetric and Interferometric SAR Parameters Estimation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 44. 1609 - 1621.
- 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.

8. ANEXOS

Anexo 1. Modelo de tabla empleado (Tabla 30), para este estudio. Los datos presentes, son los obtenidos para el filtro IDAN.

Tabla 30. Modelo de tabla empleado para el estudio.

Punto	Filtro	Realidad															
0	0	0	27	0	0	54	0	Río	81	1	1	108	0	0	135	0	0
1	0	1	28	0	0	55	0	0	82	1	1	109	0	1	136	0	0
2	1	0	29	0	0	56	0	0	83	0	0	110	0	0	137	0	0
3	0	0	30	0	0	57	1	1	84	0	0	111	0	Río	138	0	1
4	R	1	31	0	0	58	0	0	85	0	0	112	0	Río	139	0	0
5	0	1	32	0	0	59	R	1	86	1	1	113	0	0	140	0	1
6	1	1	33	0	0	60	0	0	87	0	0	114	0	0	141	0	1
7	0	0	34	0	0	61	0	0	88	1	1	115	0	0	142	0	0
8	0	0	35	1	1	62	1	0	89	1	1	116	1	1	143	0	1
9	0	1	36	1	1	63	R	1	90	0	0	117	0	0	144	0	1
10	R	1	37	1	1	64	1	1	91	0	0	118	1	1	145	0	0
11	0	0	38	R	1	65	1	1	92	0	1	119	0	0	146	1	1
12	1	1	39	0	0	66	1	1	93	1	1	120	0	0	147	0	0
13	1	1	40	1	1	67	1	0	94	0	0	121	0	0	148	R	1
14	0	0	41	0	1	68	0	0	95	1	1	122	0	0	149	0	0
15	0	0	42	0	1	69	0	0	96	0	0	123	0	0	150	0	0
16	0	1	43	1	1	70	R	1	97	0	0	124	0	0	151	0	0
17	0	0	44	R	1	71	0	1	98	0	0	125	0	1	152	0	0
18	R	1	45	0	Río	72	1	1	99	0	0	126	0	1	153	0	0
19	0	0	46	0	1	73	0	0	100	0	0	127	1	0	154	0	0
20	0	Río	47	0	Río	74	0	0	101	0	0	128	0	1	155	1	1
21	0	0	48	0	0	75	0	0	102	R	1	129	R	1	156	0	0
22	0	1	49	1	1	76	R	1	103	0	0	130	0	1	157	0	1
23	1	1	50	R	1	77	R	1	104	1	1	131	0	0	158	1	1
24	0	1	51	1	1	78	0	Río	105	1	1	132	0	0	159	1	1
25	0	0	52	R	1	79	0	0	106	0	0	133	0	0	160	0	0
26	1	1	53	1	0	80	0	0	107	0	0	134	0	1	161	1	1

Tabla 30 (Continuación)

Punto	Filtro	Realidad															
162	0	0	191	0	0	220	0	0	249	0	0	278	1	1	307	1	1
163	0	0	192	0	0	221	0	0	250	0	0	279	1	1	308	0	Río
164	R	1	193	1	1	222	0	0	251	0	0	280	0	0	309	0	0
165	0	0	194	0	0	223	0	0	252	1	1	281	0	0	310	0	0
166	0	0	195	0	0	224	0	0	253	1	0	282	0	0	311	0	0
167	0	0	196	R	1	225	0	0	254	0	0	283	0	1	312	0	0
168	0	1	197	1	1	226	0	0	255	0	0	284	0	0	313	0	0
169	0	0	198	0	0	227	0	0	256	R	1	285	0	0	314	0	0
170	0	1	199	0	0	228	0	0	257	1	1	286	0	0	315	0	0
171	0	0	200	0	0	229	1	1	258	0	0	287	0	0	316	0	0
172	1	1	201	0	Río	230	R	1	259	0	0	288	0	0	317	1	1
173	0	0	202	1	1	231	0	0	260	0	1	289	0	0	318	0	0
174	0	0	203	0	0	232	0	0	261	R	1	290	0	0	319	0	0
175	0	0	204	1	1	233	0	0	262	1	1	291	0	0	320	0	Río
176	0	0	205	R	1	234	0	0	263	0	0	292	1	1	321	1	1
177	0	Río	206	0	Río	235	1	1	264	0	0	293	R	1	322	0	0
178	0	1	207	0	0	236	0	0	265	0	Río	294	0	1	323	0	0
179	R	1	208	0	0	237	1	1	266	1	1	295	R	1	324	0	0
180	0	0	209	0	0	238	0	Río	267	1	1	296	0	0	325	1	1
181	0	0	210	0	1	239	0	0	268	0	0	297	0	0	326	R	1
182	1	1	211	0	1	240	1	1	269	0	0	298	0	0	327	R	1
183	0	0	212	0	1	241	0	0	270	0	0	299	0	0	328	0	Río
184	0	0	213	0	0	242	0	0	271	0	0	300	1	1	329	0	0
185	1	1	214	1	1	243	1	1	272	1	1	301	0	1	330	0	0
186	1	1	215	0	0	244	0	0	273	1	0	302	0	1	331	1	1
187	0	0	216	0	0	245	0	1	274	0	1	303	0	0	332	0	1
188	0	0	217	0	0	246	0	0	275	0	0	304	0	0	333	0	0
189	0	1	218	0	0	247	1	1	276	0	0	305	1	1	334	0	0
190	1	1	219	0	Río	248	0	0	277	1	0	306	1	1	335	0	0

Tabla 30 (Continuación)

Punto	Filtro	Realidad
336	0	0
337	0	1
338	0	0
339	0	0
340	0	0
341	0	0
342	0	0
343	1	1
344	1	1
345	0	0
346	0	Río
347	0	0
348	1	0
349	0	1

Este procedimiento se ha llevado a cabo para cada filtro (imágenes Sentinel – 1), así como también para cada índice de agua (imágenes Sentinel – 2) empleado.

Los valores presentes en la siguiente tabla (Tabla 31) indican lo siguiente:

Tabla 31. Valores para los 350 puntos de muestreo.

Valor	Significado
0	Ausencia de agua
1	Presencia de agua
R *	Punto reclasificado
Río	Detección del cauce del río

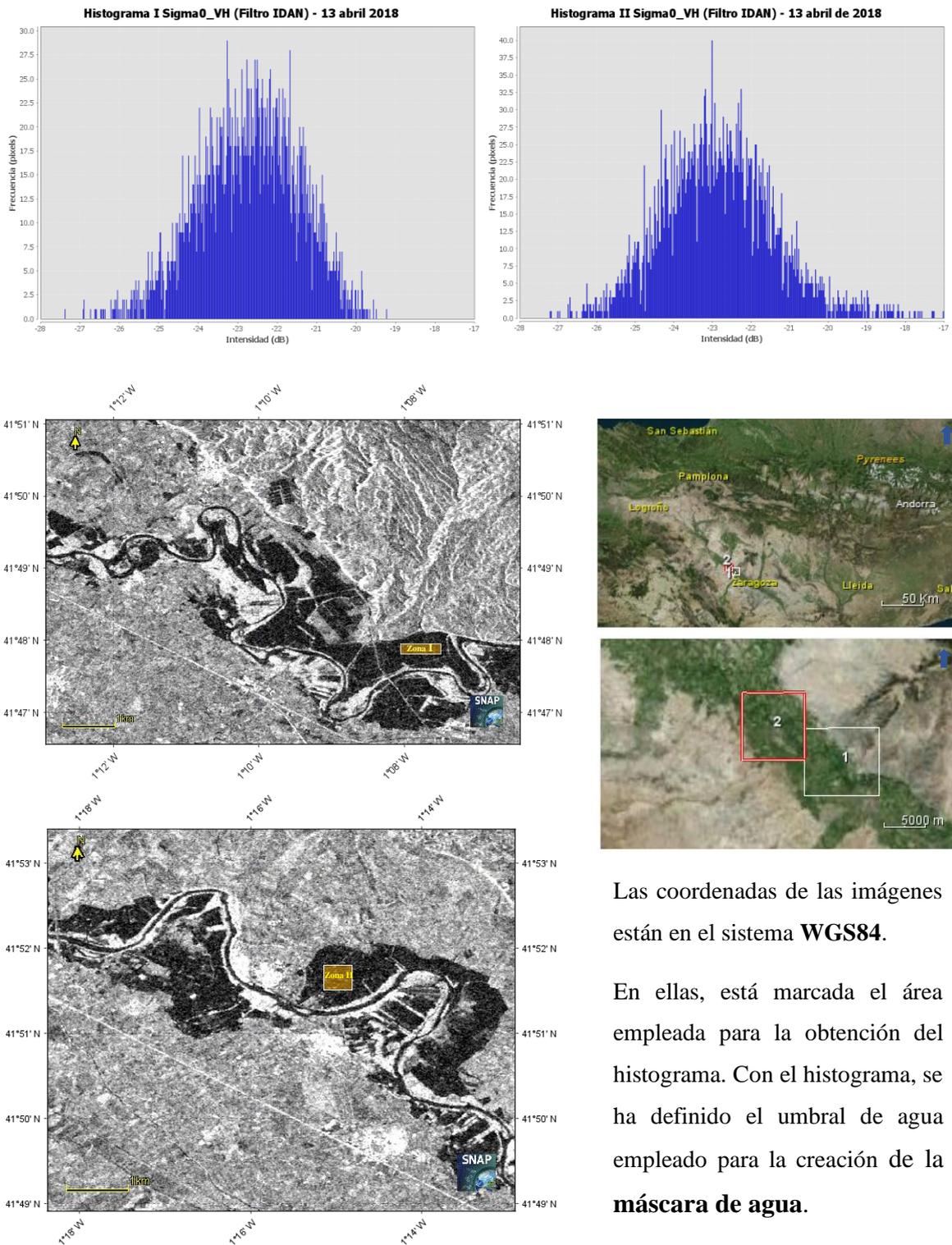
* Hace referencia a aquellos puntos, que inicialmente el filtro no indicaba la presencia de agua, pero que se han reclasificado, por ser puntos que deberían haberla indicado.

En “Filtro”, se han introducido los valores obtenidos para cada filtro.

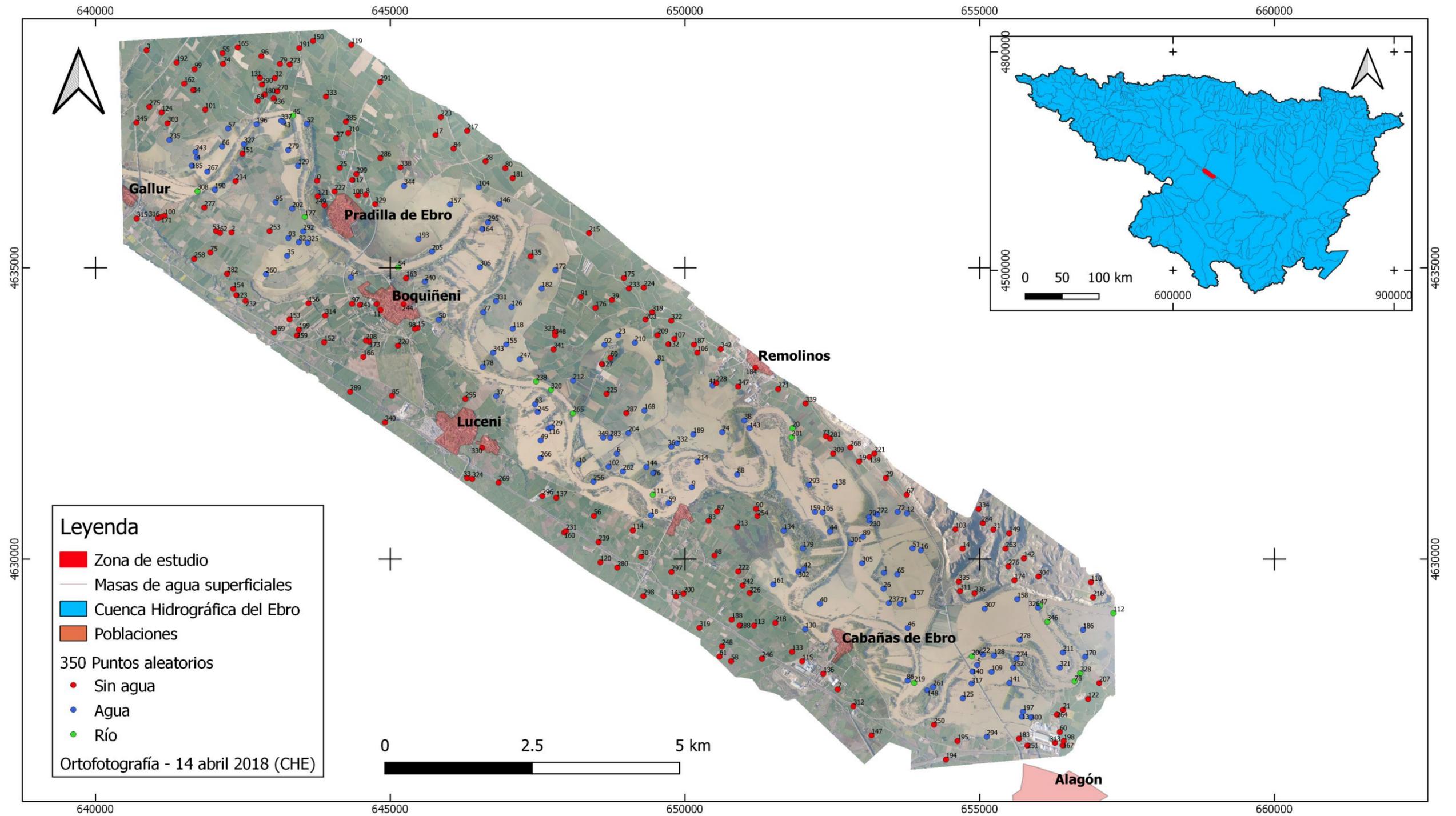
En “Realidad”, se han introducido los valores obtenidos a partir del análisis de la ortofotografía.

Anexo 2: Modelo de umbral de calibración.

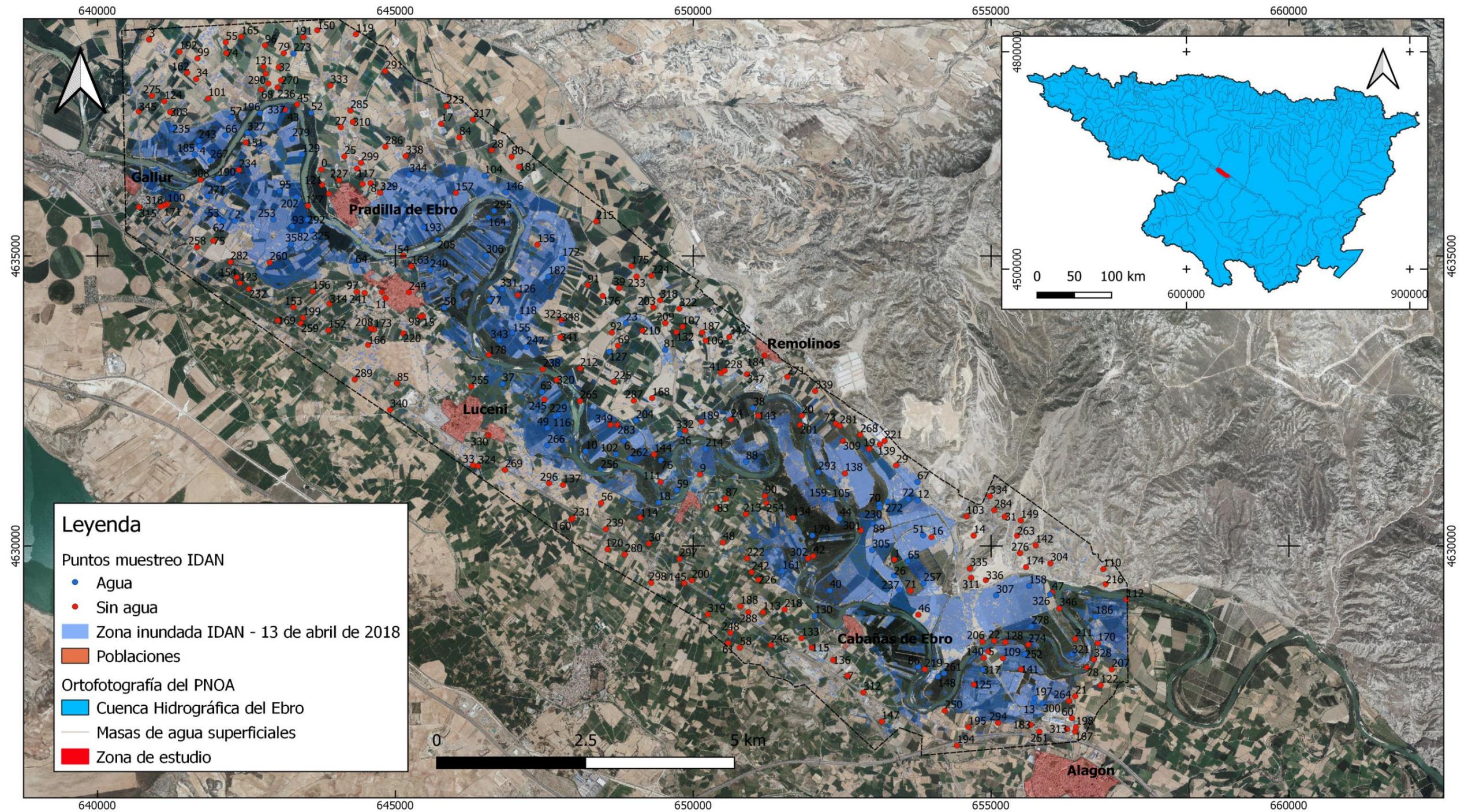
Para su definición, se ha tenido en cuenta la imagen RADAR del 13 de abril de 2018.



Anexo 3. Ortofotografía del 14 de abril de 2018 con los 350 puntos de muestreo. Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.



Anexo 4. Zona inundada para el filtro IDAN – 13 de abril de 2018 (con la ortofotografía del PNOA de fondo). Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.



Anexo 5. Zona inundada para el índice de agua NDWI – 14 de abril de 2018 (con la ortofotografía del PNOA de fondo). Sistema de Coordenadas ETRS89 - UTM 30N.

