

**METODOLOGÍA PARA ESTIMAR
PROFUNDIDADES DE INUNDACIÓN, EN UN
TRAMO DEL RÍO EBRO, BASADA EN LA
UTILIZACIÓN DE DATOS DE LANDSAT8,
SENTINEL-2, RADAR SAR (SENTIEL-1) Y
LIDAR.**

**FLOOD DEPTHS ESTIMATION METHODOLOGY, IN
ONE SECTION THE EBRO RIVER, BASED ON THE
USE OF DATA FROM LANDSAT 8, SENTINEL-2,
RADAR SAR (SENTIEL-1) AND LIDAR.**

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

Presentado por:

D^a Elena Chaves Chaves

Dirigido por:

Dr. D. Francisco Carreño Conde

Alcalá de Henares, a 20 de mayo de 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que de una u otra manera se vieron envueltas en este proceso y en especial:

A mi familia.

A Edson por su comprensión y apoyo a la distancia.

Al profesor Francisco Carreño por sus enseñanzas y observaciones.

Al Ing. Juan Antonio Picado, por su apoyo e impulso para llegar hasta aquí.

A Carmencita, por su apoyo a la distancia durante todo este tiempo.

A Saulo Richmond por su colaboración y quedarse cubriendo todas mis tareas en la UCR.

A Niebla, Romero y Ticho que sacrificaron a su humana por algún tiempo.

A Universidad de Costa Rica que me dio la oportunidad de viajar a España a cursar el Máster.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	METODOLOGÍA.....	10
2.1	Zona de estudio	10
2.2	Datos	12
2.2.1	Datos Hidrográficos: Caudales.....	12
2.2.2	Imágenes de satélite.....	12
2.2.3	Datos LIDAR.....	15
2.3	Procesamiento de datos	16
2.3.1	Hidrogramas de crecida	16
2.3.2	Imágenes RADAR.....	17
2.3.3	Imágenes Sentinel-2.....	20
2.3.4	Imágenes Landsat 8	21
2.3.5	Estimación de profundidades mediante combinación datos LIDAR con RADAR	22
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
3.1	Hidrogramas de crecida.....	25
3.2	Imágenes RADAR.	27
3.3	Imágenes Sentinel 2.....	31
3.4	Imágenes Landsat 8	32
3.4	Validación Cartografía Zonas Inundables.....	33
3.5	Estimación de Profundidad.....	37
4	CONCLUSIONES.....	42
5	BIBLIOGRAFÍA	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa ubicación zona de estudio.....	11
Figura 2. Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Fuente: SAIH, 2020.	12
Figura 3. Centro de descarga datos LIDAR del IGME. Fuente: IGME, 2020.	15
Figura 4. Ubicación estaciones de aforo en el entorno de la zona de estudio.	16
Figura 5. Secuencia procedimental.....	17
Figura 6. Reducción de número de observaciones por píxel (Multilooking).....	18
Figura 7. Calibración de la imagen RADAR.	18
Figura 8. Reducción del speckle.....	19
Figura 9. Combinación de bandas RGB.....	20
Figura 10. Índice NDWI aplicado a imagen Sentinel 2 del 14 de abril (izquierda) y Landsat 8 para el 19 de abril del 2018 (derecha).....	22
Figura 11. Trazado de las líneas perpendiculares al río equidistantes 1km para la estimación de las profundidades.	23
Figura 12. Tabla de atributos red de puntos equidistantes a 5 metros.	24
Figura 13. Ilustración interpolación vecino natural. Polígonos verdes representan los polígonos de Thiessen elaborados con la red de puntos dada. Polígono beige es el polígono de Thiessen creado alrededor del punto de interpolación (rojo). Fuente: ESRI (2016).....	24
Figura 14. Ubicación estaciones de aforo para validación de profundidades estimadas.	25
Figura 15. Hidrogramas de crecida en el mes de abril del 2018 en las estaciones A002, A004, A011 en el Ebro.....	26
Figura 16. Mapa composición RGB para las fechas 06 y 13 de abril del 2018, según polaridad: A) VV y B) VH.	28
Figura 17. Mapa composición RGB para las fechas 13 de abril y 05 de junio del 2018, según polaridad: A) VV y B) VH.....	29
Figura 18. Histograma de bandas día 13 de abril del 2018 en VH y VV.....	30
Figura 19. Visualización clasificación zonas inundadas en SNAP.....	30
Figura 20. Zona de Inundación a partir de las imágenes RADAR del día 13 de abril del 2018.	31
Figura 21. Zona de Inundación a partir de Sentinel 2 para el 14 de abril del 2018....	32
Figura 22. Zona de Inundación a partir de Landsat 8, del día 19 de abril del 2018. ...	32
Figura 23. Evolución áreas de inundación, en hectáreas, según tipo de imagen. Fecha RADAR 13 de abril del 2018. Fecha Sentinel-2: 14 de abril del 2018. Fecha Landsat 8: 19 de abril del 2018.	34

Figura 24. Área común de las zonas de inundación generadas a partir de cada imagen satelital con los datos oficiales de la CHE. Fecha RADAR: 13 de abril del 2018. Fecha Sentinel 2: 14 de abril del 2018. Fecha Landsat 8: 19 de abril del 2018.	36
Figura 25. Mapa de profundidades, tramo de estudio en el río Ebro.	38
Figura 26. Distribución de áreas, en hectáreas, según profundidad en el tramo de estudio del río Ebro.	39
Figura 27. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Novillas.	40
Figura 28. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Novillas.	41
Figura 29. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Alagón.	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Imágenes utilizadas como fuente de información.	13
Tabla 2. Resolución espacial imágenes Sentinel 2 según número de banda.	13
Tabla 3. Resolución espacial imágenes Landsat 8 según número de banda.	14
Tabla 4. Descripción de la información obtenida del IGME correspondiente al MDE. .	16
Tabla 5. Comparación entre niveles de estaciones de aforo y datos obtenidos a partir de las imágenes RADAR.	39

TABLA DE ABREVIATURAS

CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro

GDR: *Ground Range Detected*

IGME: Instituto Geográfico y Minero de España

LIDAR: *Light Detection and Ranging*

MDE: Modelo Digital del Elevación

NDWI: *Normalized Difference Water Index*

SAIH: Sistema Automático de Informativa Hidrológica

RESUMEN

Las inundaciones, en general, son acontecimientos de gran importancia debido a sus impactos mayormente negativos en la vida humana, economía, salud, infraestructura, entre otros, por lo que su análisis se hace necesario; situación de la que España no escapa. Existen diferentes metodologías ampliamente conocidas para realizar tales estudios, sin embargo, en la actualidad la incorporación de información proveniente de imágenes satelitales sirve como una herramienta complementaria, con la cual es posible no sólo observar la evolución del evento en el tiempo, sino también estudiar en tiempo real una o varias de las componentes involucradas en estos eventos, como la profundidad, la cual es objeto de esta investigación.

El objetivo principal de este estudio consistió en desarrollar una metodología para la estimación de profundidades de inundación a partir de la información extraída de las imágenes satelitales RADAR, Sentinel-2 y Landsat 8 en combinación con datos LIDAR. Por lo tanto, se definió una secuencia procedimental que permitiera el análisis de cada una de las imágenes y posteriormente el cálculo de profundidad a partir del modelo digital de elevación generado a con la información LIDAR. Se utilizó como caso de estudio el tramo medio de la cuenca del río Ebro y los programas computacionales SNAP y ArcGIS.

Como parte de la propuesta metodológica, se delimitaron las zonas de inundación correspondientes al tramo de estudio en el río Ebro para el evento extremo del día 13 de abril del 2018, en las diferentes imágenes satelitales. En el caso de las imágenes RADAR se llevó a cabo los ajustes y calibraciones necesarias para clasificar de los píxeles que tuviesen agua. Por su parte, se aplicó el índice conocido en inglés como *Normalized Difference Water Index* (NDWI) a las imágenes multiespectrales Sentinel-2 y Landsat 8. Una vez concluido lo anterior, se incorporó el modelo digital de elevación y se obtuvieron los valores de profundidad con su respectiva representación gráfica.

Los resultados obtenidos producto de esta investigación fueron contrarrestados con la información oficial, teniéndose resultados conforme a la precisión esperada, encontrándose así que predominan las profundidades que van desde los 0 a los 2m.

Palabras clave: RADAR, SENTINEL 2, LANDSAT 8, LIDAR, ZONA DE INUNDACIÓN, PROFUNDIDAD.

ABSTRACT

Floods are important events that have a negative impact on human life, economy, health, infrastructure, etc. For instance, flood analysis is necessary in many countries, like Spain. There are many flood analysis methodologies, nonetheless, satellite images are a powerful tool to help study the evolution of the event and provide real time information about some variables such as flood depth.

In this research, satellite images were used to develop one methodology that estimate flood depths from RADAR, Sentinel-2, Landsat 8, and LIDAR. Thus, it created procedural sequence for studying every image and calculating depth based on digital elevation model from LIDAR information. The Ebro river medium section was used as a study case as well as SNAP and ArcGIS software to process information.

As part of the proposed methodology, the flood zones corresponding to the section of study in the Ebro river were delimited, in the different satellite images. Particularly, RADAR images were adjusted and calibrated to extract water pixel. Also, Sentinel 2 and Landsat 8 images were processed with the Normalized Difference Water Index. When the image processing concluded, the digital elevation model was included to calculate flood depths. Lastly, the flood depths map was created.

Afterwards, the results were compared with the official information. The values were within the expected precision. In conclusion, flood depths were between 0-2m in the majority of the area.

Key words: RADAR, SENTINEL 2, LANDSAT 8, LIDAR, FLOOD AREA, DEPTH.

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son eventos de gran importancia debido a sus impactos mayormente negativos en la vida humana, economía, salud, infraestructura, entre otros. En el caso de Europa, son consideradas como una de las catástrofes naturales más frecuentes. De acuerdo con algunas estadísticas, desde 1980 hasta 2011, han muerto alrededor de 2500 personas mientras que 5.5 millones fueron afectadas producto de inundaciones, generando pérdidas económicas de hasta 90 billones de euros (European Environmental Agency, 2020).

Sumando a lo anterior, el cambio climático, en los últimos tiempos, ha variado la intensidad de las precipitaciones en Europa, y se prevé que serán más torrenciales o intensas, lo que incrementará el número de inundaciones inesperadas y/o graves. Asimismo, se espera que la precipitación invernal se dé con mayor frecuencia, pero en forma de lluvia debido al aumento de las temperaturas lo que formará un considerable incremento en la escorrentía inmediata y por lo tanto un riesgo de inundación más alto (European Environmental Agency, 2005).

En el caso concreto de España, las inundaciones son frecuentes y sus impactos socioeconómicos también teniéndose, de 1990 a 2010, un total de 312 fallecidos y contabilizándose unos 800 millones de euros al año por pérdidas materiales (Arango, 2012; Benito, 2006; Consorcio de Compensación de Seguros, 2018). Expertos mencionan que el riesgo de inundaciones para el país debido al cambio climático seguirá aumentando en el futuro por dos razones: la primera la intensificación de las precipitaciones torrenciales que provocan avenidas repentinas y la segunda el impacto antrópico en los cauces y zonas aledañas, es decir manipulación, cambios o reubicación de los ríos, impermeabilización de suelos producto del desarrollo inmobiliario, erosión de suelos por agricultura, entre otros que contribuyen a una mayor vulnerabilidad de los bienes y las personas a las inundaciones (Ecologistas en Acción, 2015; Schmidt y Greiving, 2010). De igual manera, se proyecta un mayor número de avenidas causadas como consecuencia del deshielo en cuencas como la del Duero, Ebro y las internas de Cataluña a finales de invierno y principio de la primavera a raíz del incremento en la temperatura (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

De acuerdo con todo lo anterior, es claro que las inundaciones tienen una alta incidencia en el desarrollo de una zona por lo que el análisis de su dinámica aporta información de utilidad para mitigación de riesgos y debe de ser un insumo en la

planificación hidrológica y del territorio. Para que dicho análisis sea eficaz deberá incluir los aspectos naturales de la zona como lo son las características climatológicas, hidrológicas, morfológicas y geológicas en conjunto con las actividades humanas, ya que, generalmente los problemas naturales sumados a los humanos aumentan el riesgo hidrológico (Hernández et al., 2017; Rebelo, 1997).

En un evento de inundación, la altura de la superficie de inundación con respecto al terreno es un parámetro fundamental a tener en cuenta en el control de avenidas, ya que determina el grado de inundabilidad del espacio (Ferrer, 2012). Calcular la altura o nivel que puede alcanzar la lámina de agua permite definir los espacios afectados por el evento y su control favorece la mitigación de emergencias, razón por la cual es un elemento valioso en el monitoreo de avenidas.

Existen diferentes metodologías para la realización del análisis y delimitación de inundaciones tomando como base series históricas de precipitación o caudales y las características naturales propias de la cuenca que en combinación con proyecciones estadísticas a diferentes intervalos de tiempo (periodos de retorno) que permiten visualizar escenarios de inundación estableciendo la altura y extensión mediante modelización matemática y herramientas computacionales para tal efecto. Sin embargo, la toma de datos y el estudio de la inundación en tiempo real, habitualmente se ve limitado por las condiciones meteorológicas que dificultan el acceso al lugar del evento. Es en este sentido, la implementación de nuevas técnicas como la teledetección, se convierte en una herramienta de fuente de información para identificar y delimitar las zonas afectadas que complementa las tareas de reconocimiento realizadas *in situ* y los estudios de la inundación.

La teledetección se define como una técnica con la que se adquieren imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, así como su posterior tratamiento dependiendo del contexto de aplicación. Aunque en la actualidad este concepto se aplica generalizado para insumos satelitales, el término proviene desde los años 60 aplicado a la fotografía aérea derivado del inglés *remote sensing* (Chuvienco, 1990). Según Bioresita et al., (2019), las técnicas de teledetección permiten la localización de superficies con agua en grandes terrenos, además de que registran su desarrollo con el tiempo y son una fuente de información oportuna para su análisis según su enfoque de aplicación.

En este Trabajo Fin de Máster, se plantea como objetivo general desarrollar una metodología basada en la utilización conjunta de datos obtenidos con satélites multiespectrales (Landsat8, Sentinel-2), Radar SAR (Sentinel-1), y datos LIDAR

para estimar las profundidades de inundación durante el evento extremo ocurrido del 13 al 16 de abril del 2018, en un tramo del río Ebro.

En consecuencia, con lo anterior, se plantean como objetivos específicos: 1) analizar los caudales registrados en el área de estudio por medio de hidrogramas, que permitan una interpretación de la evolución de la avenida; 2) procesar las imágenes satelitales RADAR, mediante el *software* SNAP para delimitar las zonas de inundación en el tramo de la zona de estudio; 3) delimitar las zonas de inundación, utilizando el índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI) en las imágenes multiespectrales (Sentinel 2 y Landsat 8) para analizar la evolución temporal del evento; 4) integrar la información obtenida de las imágenes satelitales con datos LIDAR por medio de un modelo digital del terreno para la estimación de las profundidades de la inundación; 5) validar los datos obtenidos contrarrestándolos con valores oficiales de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) para verificar la precisión del método.

2 METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio

El área de estudio correspondió al tramo medio de la cuenca del río Ebro, más concretamente la zona situada entre las localidades de Novillas y Alagón, aguas arriba de Zaragoza capital (Figura 1), que fue afectada por la inundación producida el 13 de abril del 2018 en el río Ebro, como consecuencia de las intensas precipitaciones caídas en la zona y el aumento de los caudales del río causadas por el deshielo de la nieve acumulada en la parte alta de la cuenca (Carreño y De Mata, 2019).

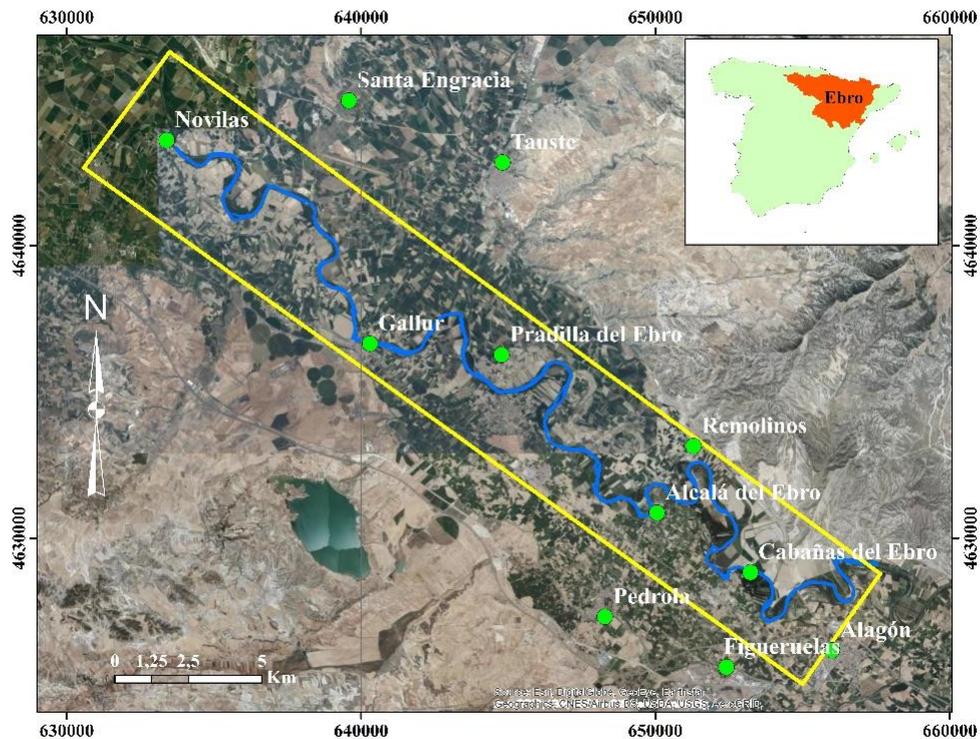


Figura 1. Mapa ubicación zona de estudio.

La cuenca del Ebro se localiza en el cuadrante noreste de la Península Ibérica, con una superficie total de 85.534 Km² siendo la más extensa de España cubriendo al menos un 17 % de su territorio. También es una de las principales cuencas mediterráneas europeas. Además es elemento importante en el desarrollo de la zona a su entorno y del país en general ya que según datos oficiales, gran parte de la industria se encuentra en sus centros de población, mientras que el 30% de la producción agraria, fruta dulce, forraje y viñedos, así como el 25% de la generación hidroeléctrica nacional y un 20% de la acuicultura continental se dan en este lugar, por lo cual los eventos de inundación pueden llegar a generar gran impacto a escala local, nacional y continental (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2009).

Con respecto a la morfología del Ebro, en general es meandriforme, es decir, su recorrido se lleva a cabo entre trazos curvos que se amplían hacia la llanura de inundación. El ancho promedio es de 3,2km, sin embargo, existen tramos con hasta 6km normalmente en la parte intermedia del río. Propiamente en la zona media el índice de sinuosidad es de 1,505, el cual es concluyente en su forma meandriforme y una pendiente media de 0,67 m/km muy baja (Ollero y Sánchez, 2015)

Por otro lado, desde el aspecto hidrológico las avenidas máximas en el río Ebro se han dado a lo largo de su historia. La cuenca posee un régimen pluvio-nival, con máximo en febrero y un estiaje estival bien acotado. También está influenciada por un sistema pluvial- oceánico que mantiene alto el caudal durante el invierno, una

de las épocas con mayor número de inundaciones. Asimismo, las lluvias primaverales y el deshielo de las cabeceras pirenaicas provocan crecidas en esta estación (Sánchez, et al., 2015).

2.2 Datos

2.2.1 Datos Hidrográficos: Caudales

Los datos de caudal y niveles correspondientes al evento de inundación se obtuvieron a través del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), disponibles en el siguiente enlace: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/autoservicio/inicio>. En la figura 2, se muestra el entorno gráfico del SAIH de donde se descargaron los datos de caudal y nivel máximo diario para el mes de abril del 2018 correspondiente a las estaciones: las estaciones de aforo A004 Arganda-Funes, A002 Ebro-Castejón y A011 Ebro- Zaragoza de las cuales se detallará su ubicación exacta más adelante.



Figura 2. Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Fuente: SAIH, 2020.

2.2.2 Imágenes de satélite

Para delimitar las zonas inundadas dentro del tramo de estudio en el río Ebro fueron procesadas imágenes RADAR SAR del satélite Sentinel 1; así como las imágenes multiespectrales de los sistemas Sentinel 2 y Landsat 8. En la Tabla 1 se describe la información general de las imágenes utilizadas en éste estudio.

Tabla 1. Imágenes utilizadas como fuente de información.

Satélite	Fecha	Tipo de Imagen	Portal de descarga
Sentinel 1	06/04/2018 13/04/2018 05/06/2018	RADAR	https://cophub.copernicus.eu/dhus/#/home
Sentinel 2	14/04/2018	Multiespectrales	https://cophub.copernicus.eu/dhus/#/home
Landsat 8	19/04/2018	Multiespectrales	https://earthexplorer.usgs.gov/

El satélite Sentinel 2, perteneciente al programa de observación de la Tierra Copernicus de la ESA (Agencia Espacial Europea, 2015), está equipado con una cámara multispectral de alta resolución con trece bandas que proporcionan gran calidad. En concreto, Sentinel 2 incluye sensores en las bandas del espectro visible, infrarrojo cercano y vapor de agua con resoluciones de 10m, 20m y 60m (Delegido *et al.*, 2016). En la tabla 2 se describe la resolución espacial de estas imágenes según el número de banda.

Tabla 2. Resolución espacial imágenes Sentinel 2 según número de banda.

Número de banda	Resolución espacial (m)
1	60
2	10
3	10
4	10
5	20
6	20
7	20
8	10
8a	20
9	60
10	60
11	20
12	20

Adaptado de Agencia Espacial Europea, 2015.

El acceso y descarga de estas imágenes se realizó desde el servidor de datos Copernicus Open Access Hub de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>).

Según Schroeder (2016) el sistema Landsat 8, perteneciente al programa de observación americano de la Tierra, está operado por el Servicio Geológico Americano (USGS), también adquiere imágenes multispectrales mediante dos sensores OLI (siglas en inglés de *Operational Land Imagen*) y el sensor TIRS (siglas en inglés de *Thermal Infrared Sensor*). La tabla 3 muestra la resolución espacial de las imágenes según sensor y número de banda.

Tabla 3. Resolución espacial imágenes Landsat 8 según número de banda.

Sensor	Número de Banda	Nombre de la banda	Resolución(m)
OLI	1	Costera	30
OLI	2	Azul	30
OLI	3	Verde	30
OLI	4	Roja	30
OLI	5	Infrarrojo Cercano (NIR)	30
OLI	6	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	30
OLI	7	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	30
OLI	8	Pancromática (Pan)	15
OLI	9	Cirros (Cirrus)	30
TIRS	10	Sensor Térmico Infrarrojo 1 (TIRS 1)	30 (100)
TIRS	11	Sensor Térmico Infrarrojo 2 (TIRS 2)	30 (100)

Adaptado de Sistema de observación de la Tierra (EOS en sus siglas en inglés), 2020.

El acceso y descarga de estas imágenes se realizó desde el servidor de datos Earth Explorer del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

En cuanto al satélite Sentinel 1, perteneciente también al programa de observación de la Tierra Copernicus de la ESA (Agencia Espacial Europea, 2015), es un sistema RADAR SAR que se fundamenta en el comportamiento de las ondas electromagnéticas RADAR que el propio satélite emite en forma de pulso microondas. Una vez que las microondas entran en contacto con algún objeto o superficie estas se dispersan de maneras distintas, según el material, lo cual es clave para la identificación de objetos. Parte de esa dispersión es la que es captada en su regreso a la antena del satélite. En otras palabras, se mide el retraso (amplitud) y fuerza (fase) de una parte de eco retrodispersado que varían según el material con el que entren en contacto, produciendo imágenes en las que cada píxel contiene la cantidad de energía reflejada de regreso al satélite (Agencia Espacial Europea, 2020; Fernández y Soria, 2015). Una ventaja de éste sistema es que las ondas son independiente de las condiciones de luminosidad y son transparentes a la cobertura nubosa, y por tanto, pueden operar de día y noche, y en condiciones de nubosidad, características de los días de precipitación causantes de los eventos de inundaciones (Agencia Espacial Europea, 2020). El acceso y

descarga de estas imágenes se efectuó desde el servidor de datos Copernicus Open Access Hub de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>).

2.2.3 Datos LIDAR

Los datos LIDAR, acrónimo correspondiente a *Light Detection and Ranging*, en la actualidad son muy utilizados debido a que permiten crear modelos digitales de elevación del terreno con facilidad y de alta resolución, lo que tiene gran variedad de aplicaciones en distintos ámbitos como por ejemplo en el caso del análisis de inundaciones en el que la topografía del lugar tiene gran incidencia (Fernández y Siabato, 2010).

El Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico y Minero de España (IGME) dispone de la información LIDAR para el país al cual se puede acceder mediante (<http://centrodedescargas.cnig.es/>). En concreto, se descargaron y procesaron los datos del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del terreno con una resolución de dos metros (figura 3).



The image shows a web interface for downloading terrain data. On the left is a vertical banner with a 3D terrain map and the text 'MDT02 2ª COBERTURA'. On the right, the title is 'Modelo Digital del Terreno - MDT02'. Below the title, there is a 'Descripción' section, an 'SGR' section detailing coordinate systems, an 'Ud. descarga' section, and a 'Formato' section. At the bottom right, there are navigation icons for search, list, and map, with the text 'Todos' and 'Por Por mapa listado'.

Modelo Digital del Terreno - MDT02

Descripción: modelo digital del terreno 2ª Cobertura (2015-Actualidad) con paso de malla de 2 m.

SGR: ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84). Proyección UTM en el huso correspondiente. Alturas ortométricas.

Ud. descarga: hojas del MTN25

Formato: ASCII matriz ESRI (.asc)

[Ver +](#)
Metadatos
Información auxiliar

🔍 ☰ 🔍
Todos Por Por mapa listado

Figura 3. Centro de descarga datos LIDAR del IGME. Fuente: IGME, 2020.

La tabla 4 contiene una descripción de los archivos descargados del portal del IGME que abarcan la zona de estudio en el río Ebro.

Tabla 4. Descripción de la información obtenida del IGME correspondiente al MDE.

Nombre	Formato	Tamaño (MB)	Fecha
MDT02-ETRS89-HU30-0321-1-COB2	ASC	253,00	2016
MDT02-ETRS89-HU30-0321-3-COB2	ASC	253,00	2016
MDT02-ETRS89-HU30-0321-4-COB2	ASC	252,31	2016
MDT02-ETRS89-HU30-0353-2-COB2	ASC	252,18	2016
MDT02-ETRS89-HU30-0354-1-COB2	ASC	253,93	2016

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Hidrogramas de crecida

Se elaboraron los hidrogramas de crecida con los caudales obtenidos de la CHE para todo el mes de abril, con el objetivo de analizar la curva de crecida del evento. Los datos utilizados fueron los correspondientes a las estaciones de aforo A004 Arganda-Funes, A002 Ebro-Castejón y A011 Ebro- Zaragoza, las cuales se encuentran en el entorno cercano a la zona de estudio lo que permiten observar de una manera general el comportamiento de la inundación (Figura 4).

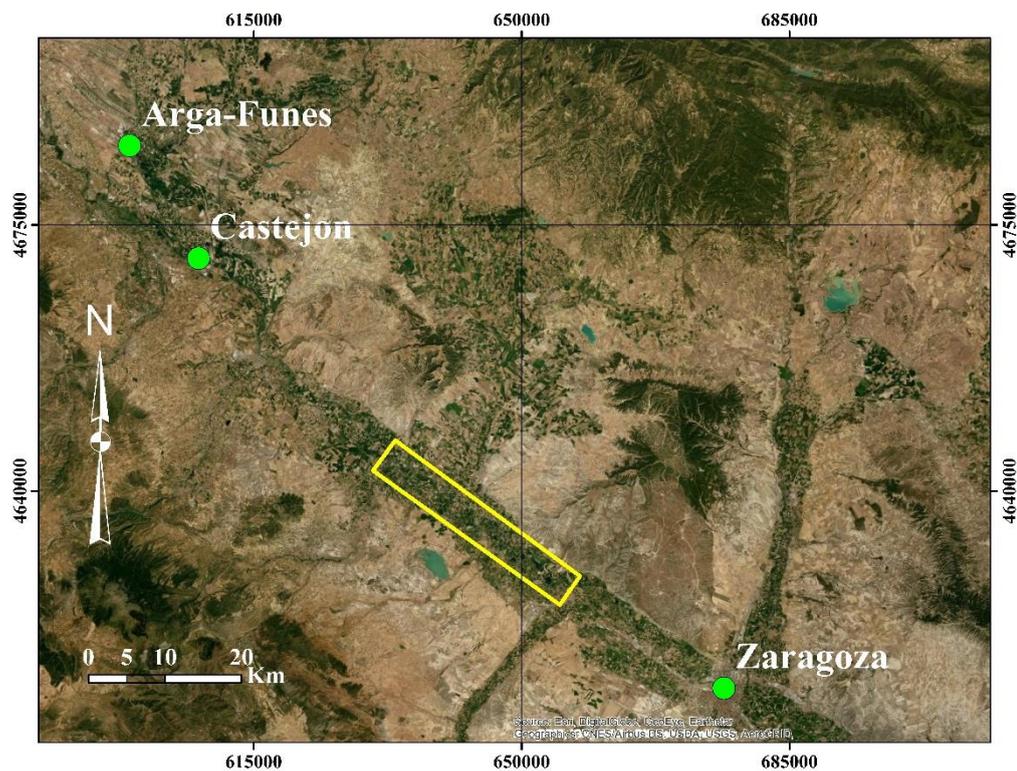


Figura 4. Ubicación estaciones de aforo en el entorno de la zona de estudio.

2.3.2 Imágenes RADAR

El procesamiento de las imágenes RADAR se llevó a cabo con el programa *SNAP* el cual fue creado por la Agencia Espacial Europea para el procesamiento de información satelital. Los criterios de búsqueda implementados fueron: 1) *Sensing date* (imagen al momento de la toma), 2) Fecha: según cuadro 1, 3) Misión: Sentinel-1 y 4) Tipo de producto: GRD. Con respecto a este último aspecto y para comprender la selección de producto utilizada, primeramente, es necesario aclarar dos conceptos clave: 1) Azimut: hace referencia a la dirección de movimiento en sentido de avance del satélite. 2) Rango que es la dirección en la que se emite la onda (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 2019). Ahora bien, el producto GRD procede del acrónimo que en inglés significa *Ground Range Detected* y se debe entender como imágenes proyectas a la superficie terrestre. Es decir, los datos crudos capturados por el satélite son convertidos al modelo elipsoidal WGS84, basado en la altura del terreno, manteniéndose el azimut y la información geográfica completa. Otro aspecto importante de las imágenes RADAR tipo GDR es que estas son *multi-look*, ósea que cada píxel representa varias observaciones (retrodispersiones) lo que mejora la resolución radiométrica, pero empeora la espacial (González, 2018). La secuencia del procesamiento de las imágenes RADAR se muestra en la figura 5.



Figura 5. Secuencia procedimental.

El primer paso consistió en aplicar el *Multilooking*, es decir, se redujo la cantidad de observaciones almacenadas en cada píxel lo que facilitó la visualización de la imagen. En este caso, se pasó de diez a siete observaciones, lo que significa que en cada píxel se tendrá el cuadrado de siete observaciones en rango y siete en azimut (Veci, 2019). En la figura 6, se puede observar la diferencia entre las imágenes con diez observaciones (recuadro superior) y siete, en donde se puede notar un poco menos de ruido en la imagen.

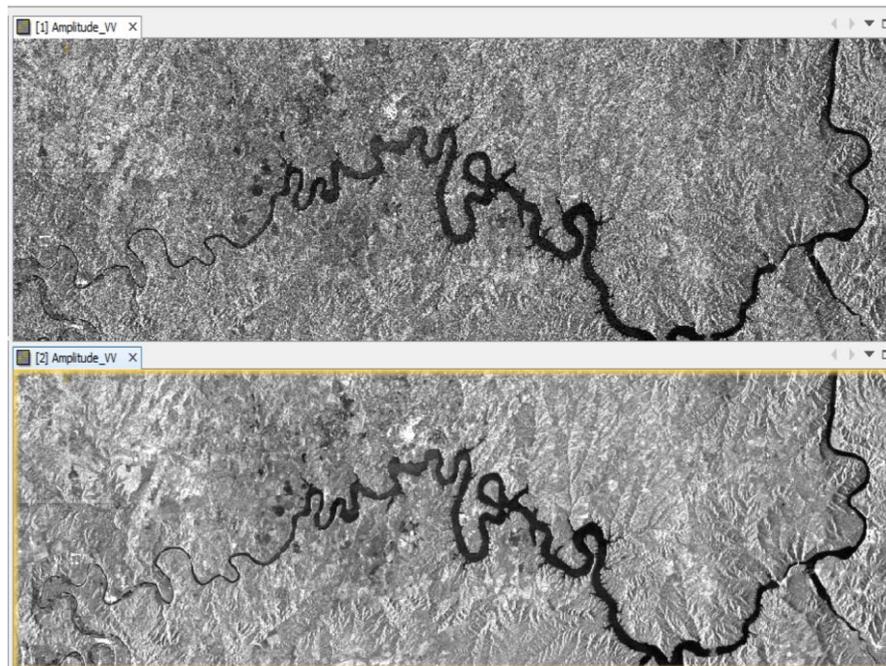


Figura 6. Reducción de número de observaciones por píxel (Multilooking).

A continuación, se aplicó la calibración radiométrica en la que cada píxel se correlaciona con el valor conocido como Σ_0 , el cual se refiere al coeficiente de retrodispersión, en otras palabras, la energía dispersada que regresa a antena del satélite también llamada intensidad del eco reflejado. Este proceso es necesario para efectuar comparaciones de imágenes en distintos espacios temporales, y/o diferencias entre azimuts (ESRI, 2019; NASA, 2017). La figura 7 muestra la diferencia entre la imagen no calibrada (recuadro superior) y la calibrada, en la que se puede notar mejor la definición de los elementos existentes.

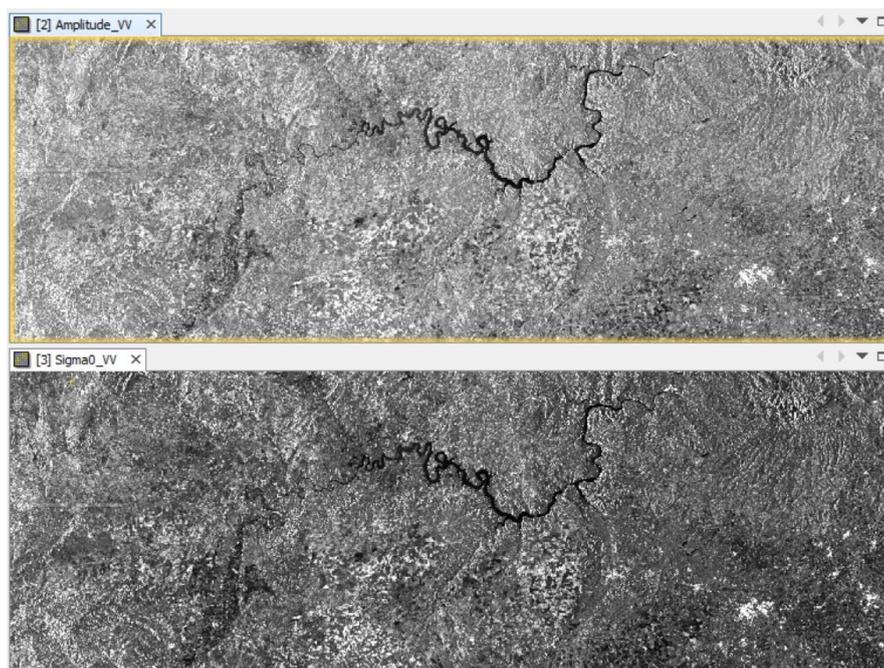


Figura 7. Calibración de la imagen RADAR.

Posteriormente, se llevó a cabo la reducción del *speckle*. El denominado *speckle* es un efecto común de las imágenes RADAR y se produce por el cambio que experimenta, en su desplazamiento, la onda emitida por el satélite al momento de entrar en contacto con alguna superficie lo que genera interferencias que se transforman en píxeles claros y oscuros, lo que algunos autores también nombran ruido de moteado (García, et al., 2003). Para las imágenes utilizadas en esta investigación se implementó la reducción del *speckle* simple Lee de 5 x 5. La figura 8 expone las diferencias entre la imagen con *speckle* (recuadro superior) y la sin este efecto, en la que se puede notar un mejoramiento en visualización de los elementos de relieve presentes en la zona.

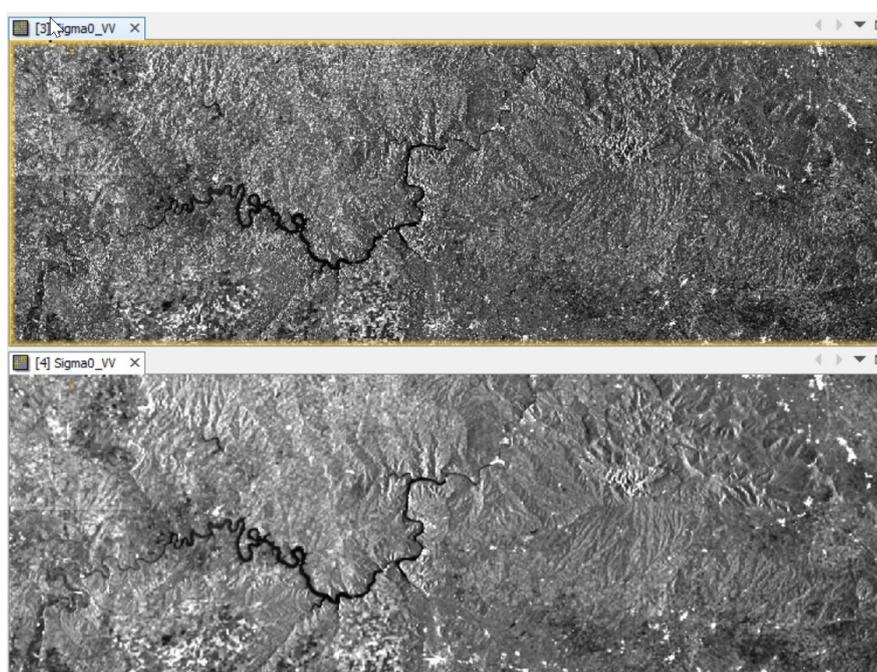


Figura 8. Reducción del *speckle*.

Siguiendo el esquema de la figura 5, se continuó con la corrección del terreno en la cual se efectuó la rectificación de las distorsiones geométricas de la imagen mediante la elevación del modelo digital del terreno y las proyecciones geográficas necesarias (Veci, 2019).

Seguidamente se creó el llamado *Stack* que consiste en sobreponer las imágenes. En este caso se hicieron dos superposiciones: 1) antes y durante el evento correspondiente a las fechas de las imágenes del 06 de abril y 13 de abril del 2018 y 2) durante y después de la inundación, es decir 13 de abril y 05 de junio del 2018. La ventaja del *Stack* radica en que agruparon las bandas de ambas imágenes en una sola, lo que facilitó su manipulación y visualización en miras a una separación entre las zonas inundadas y los cuerpos de agua permanentes, por medio de una combinación RGB en la que se colocó la imagen correspondiente al

momento anterior o posterior a la inundación en el canal rojo, y la imagen del día de la inundación en los canales verde y azul, tal y como se puede ver en la figura 9.

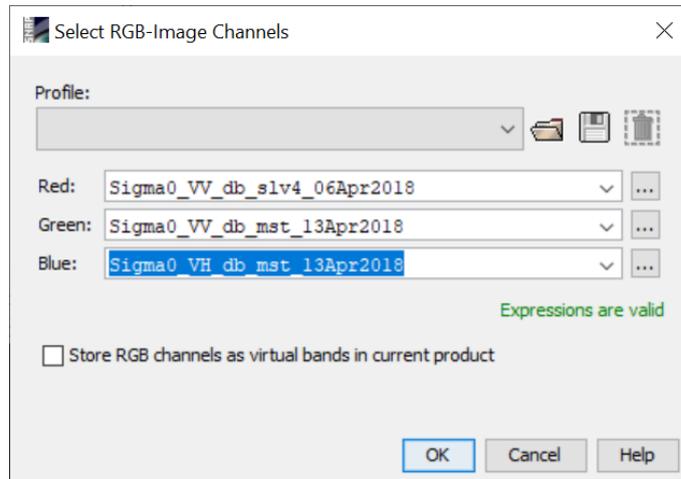


Figura 9. Combinación de bandas RGB.

Finalmente, se llevó a cabo la clasificación de la imagen que es el proceso en el que se identifican los píxeles con contenido de agua para delimitar las zonas inundadas. Para ello se creó una banda nueva en donde se incluyeron todos los píxeles que representen agua de acuerdo con el análisis del histograma de las bandas, en el que la curva más pequeña representara los píxeles de las zonas de inundación.

Una vez completado esto se exportó la imagen que contiene los píxeles con las zonas inundadas, la cual se terminó de procesar en ArcGIS y validó con la capa vectorial de las zonas de inundación digitalizadas por la CHE.

2.3.3 Imágenes Sentinel-2

En la búsqueda y selección de las imágenes Sentinel-2 se aplicaron los siguientes criterios: 1) *Sensing date* (imagen al momento de la toma), 2) Fecha: según tabla 1, 3) Misión: Sentinel-2.

Una vez que se descargó la imagen, por medio del programa SNAP, se aplicó el índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI) el cual permitió delimitar las superficies que contienen agua identificándose con valores positivos, mientras que cualquier otro elemento tendrá valores negativos en sus píxeles (McFeeters, 1996). Su fórmula de cálculo es:

$$\frac{NIR - Blue}{NIR + Blue} \quad (1)$$

Donde;

NIR: Infrarrojo cercano. Banda 8.

Blue: Banda azul. Banda 2.

Finalmente se exportó la imagen que contiene el NDWI, continuándose con el proceso de depuración y vectorización de las zonas de inundación en ArcGIS, que luego fue validado con los datos oficiales de la CHE.

2.3.4 Imágenes Landsat 8

En el caso de Landsat 8, también se utilizaron los criterios para la búsqueda y descarga de imágenes: 1) *Sensing date* (imagen al momento de la toma), 2) Fecha: según cuadro 1, 3) Misión: Landsat 8.

Landsat 8 brinda imágenes multiespectrales como ya se ha mencionado en apartados anteriores, a las cuales se les aplicó el índice NDWI utilizándose la fórmula 1 haciéndose la correspondiente variación de las bandas según corresponde; NIR: Banda 5 y *Blue*: Banda azul. Banda 2. La imagen resultante se exportó, y se continuó con el proceso de depuración y vectorización de las zonas de inundación en ArcGIS, que luego fue validado con los datos oficiales de la CHE.

En la figura 10 se presenta la aplicación del índice NDWI tanto la imagen Sentinel 2 como en la Landsat 8, en la que se puede notar claramente en tonos azules de los píxeles que contienen agua, los cuales son diferenciables ya que la energía emanada de los respectivos satélites se refleja desigual en las superficies con agua con respecto a las otras. La imagen de la izquierda corresponde a al NDWI en la imagen Sentinel 2 para el día 14 de abril, mientras que la de la derecha se muestra el resultado del mismo cálculo para Landsat 8 en la fecha 19 de abril representando la evolución de la inundación en un fragmento del tramo de estudio.

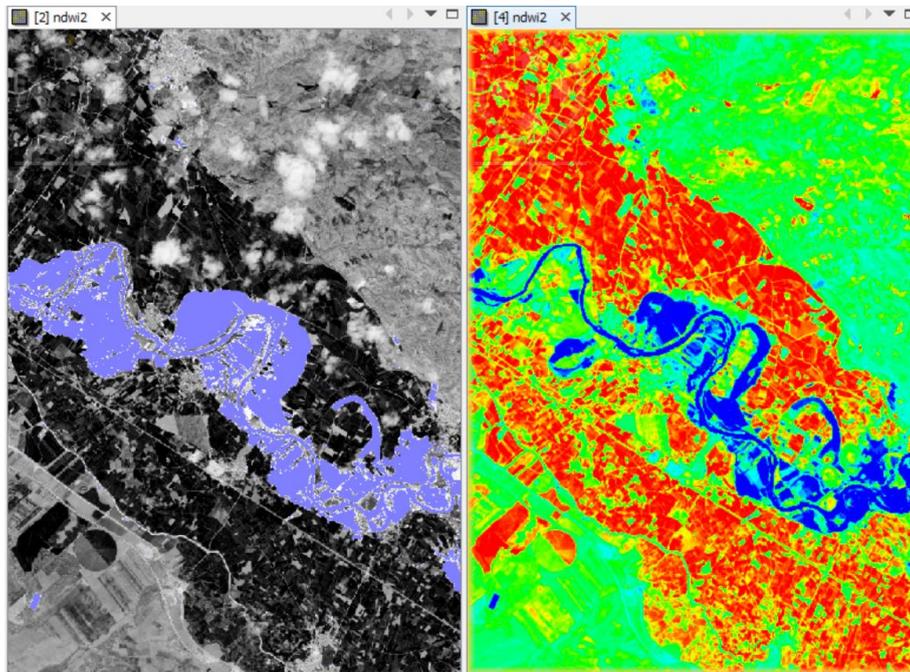


Figura 10. Índice NDWI aplicado a imagen Sentinel 2 del 14 de abril (izquierda) y Landsat 8 para el 19 de abril del 2018 (derecha).

2.3.5 Estimación de profundidades mediante combinación datos LIDAR con RADAR

Para estimar las profundidades de inundación se incorporaron los datos de elevaciones del terreno derivadas de datos LIDAR.

El primer proceso, fue llevar a cabo la superposición de la capa con las zonas de inundación y el MDE para acotar las zonas afectadas.

En segundo lugar, se trazaron líneas perpendiculares al río con una separación equidistante de un kilómetro longitudinalmente (Figura 11). El principio de esta acción es posteriormente generar una red de puntos sólida que permita la construcción del modelo digital de profundidades, mediante interpolación para el tramo de estudio.

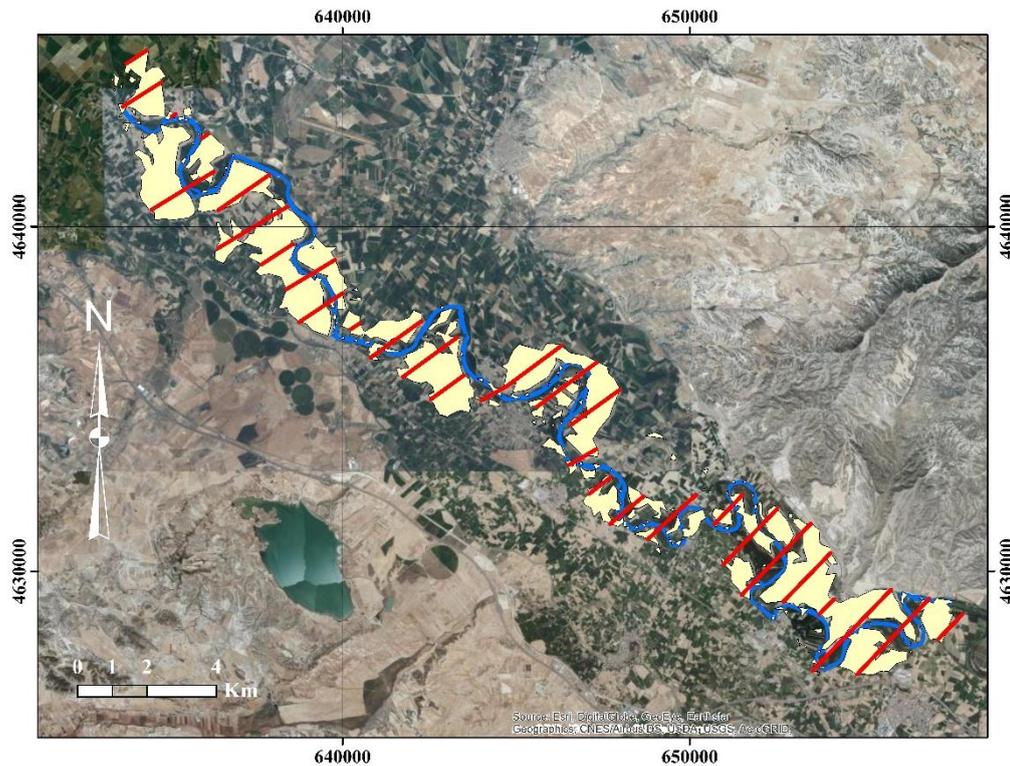


Figura 11. Trazado de las líneas perpendiculares al río equidistantes 1km para la estimación de las profundidades.

Con respecto al tercer paso, sobre las líneas rojas de la figura anterior y con ayuda de las herramientas del programa ArcGIS, se crearon puntos a 5 metros de equidistancia, a los que se les asociaron los parámetros de posición y elevación a partir del modelo de digital de elevación.

La cuarta actividad, fue la obtención de los valores de profundidad, por lo que en cada una de las líneas perpendiculares al río se determinó la cota máxima inundada. Seguidamente, para calcular la profundidad de cada uno de los puntos de esa misma línea se aplica:

$$\text{Profundidad} = \text{Cota Máxima} - \text{Cota en el punto } n \quad (2)$$

Toda la información de los puntos tanto de coordenadas, elevación, cota máxima y profundidad se integró en un solo archivo tipo *shape* con su correspondiente tabla de atributos, como se ejemplifica en la figura 12; valores que son insumo para la creación de la cartografía representativa de las profundidades en las zonas de inundación (red de puntos).

FID	Shape *	FID	Id	X	Y	ELEVACIÓN	COTA MAX	PROFUNDIDA
0	Point ZM	0	0	633775	4644730	237,169006	238,764999	1,595993
1	Point ZM	1	0	633779	4644740	237,209	238,764999	1,556
2	Point ZM	2	0	633784	4644740	237,266007	238,764999	1,498993
3	Point ZM	3	0	633788	4644740	237,179993	238,764999	1,585007
4	Point ZM	4	0	633792	4644740	237,229996	238,764999	1,535004
5	Point ZM	5	0	633796	4644750	237,128006	238,764999	1,636993

Figura 12. Tabla de atributos red de puntos equidistantes a 5 metros.

Una vez creada la red de puntos, se elaboró el mapa de profundidades con el programa ArcGIS, utilizándose el método de interpolación conocido como vecino natural o cercano dependiendo del autor. Dicha interpolación consiste en la búsqueda de grupo más cercano de puntos con respecto a uno en concreto a los que le aplicará diferentes pesos proporcionales al área entre ellos. En otras palabras, se asigna un valor de área a un punto desconocido en función de las áreas de los puntos más próximos (vecinos). Los vecinos a usar por el programa ArcGIS son los puntos que se encuentren dentro de la superposición entre los polígonos de Thiessen que forma automáticamente el programa con la red de puntos dada (color verde en figura 13) y su correspondiente polígono alrededor del punto de interpolación. La proporción de superposición es el peso que el programa utilizará en el algoritmo de cálculo. Entre las ventajas de su implementación se pueden citar el hecho de ser local y que es altamente recomendada para cálculo de alturas (ESRI, 2016; Ferreira, 2005; Sibson, 1981).

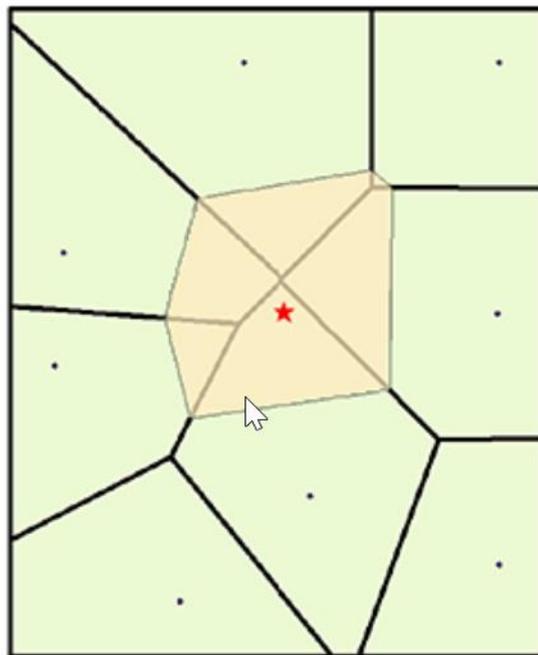


Figura 13. Ilustración interpolación vecino natural. Polígonos verdes representan los polígonos de Thiessen elaborados con la red de puntos dada. Polígono beige es el polígono de Thiessen creado alrededor del punto de interpolación (rojo). Fuente: ESRI (2016).

Una vez finalizada la interpolación, se obtuvo el mapa de profundidades el cual fue validado mediante las estaciones de aforo Novillas, Pradilla del Ebro y Alagón que están distribuidas en el cauce justo dentro del área de estudio (Figura 14) y permite comparar el nivel de la lámina de agua registrada el día del evento máximo con la profundidad calculada a partir de las imágenes satelitales.

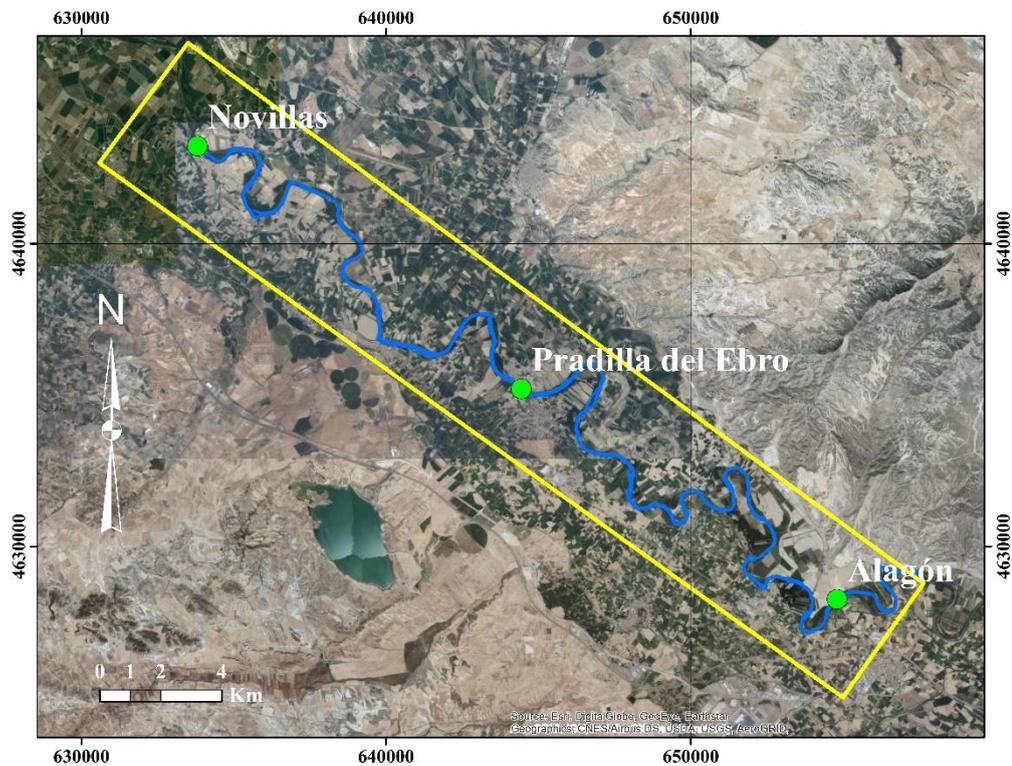


Figura 14. Ubicación estaciones de aforo para validación de profundidades estimadas.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Hidrogramas de crecida

El estudio de los hidrogramas de crecida, como ya fue mencionado, permite entender el comportamiento del evento extremo presentado en el Ebro. Con el caudal de las estaciones de Arganda-Funes, Ebro-Castejón y Zaragoza, se obtuvieron los gráficos correspondientes al mes de abril del año 2018 (figura 15).

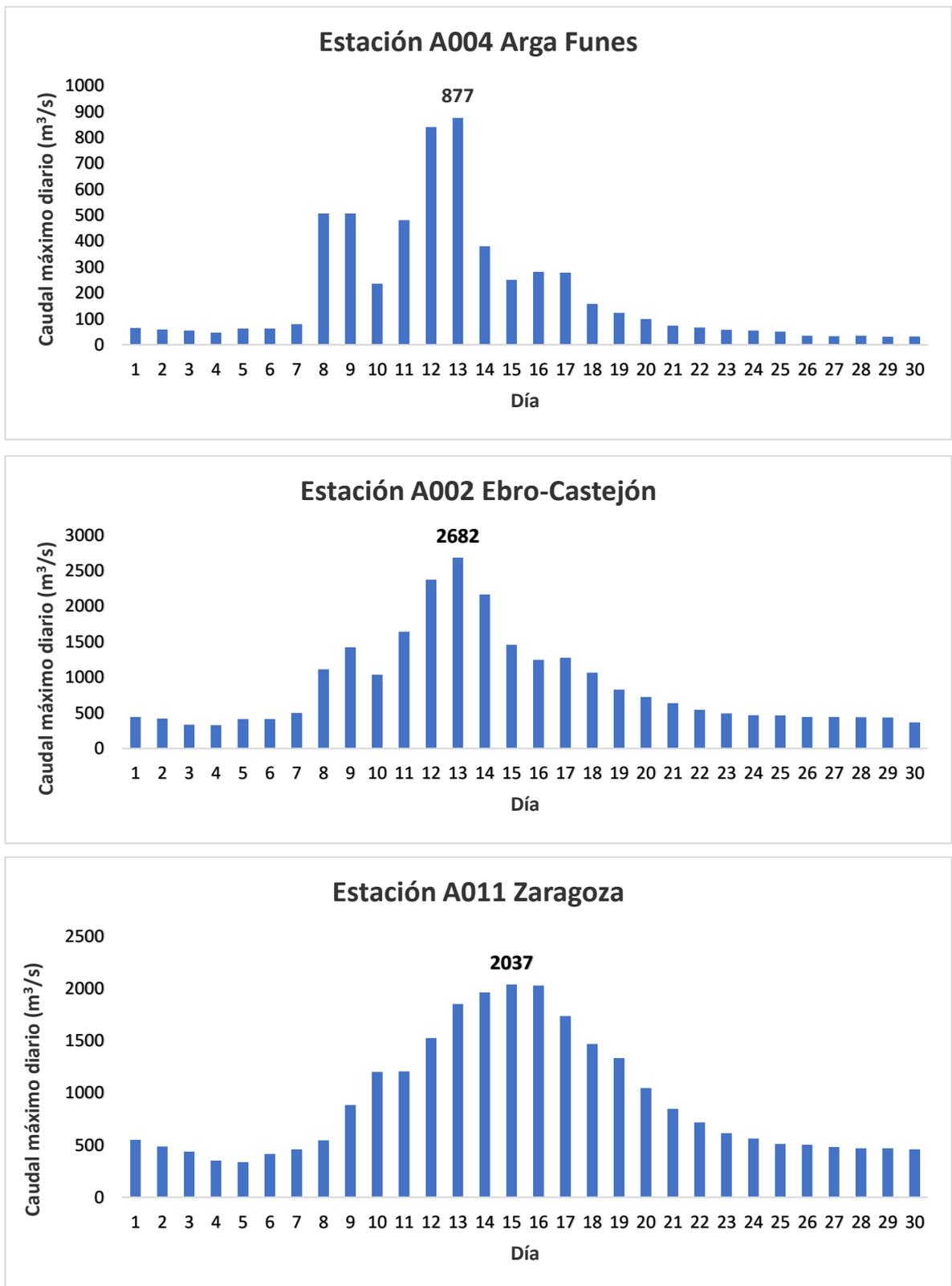


Figura 15. Hidrogramas de crecida en el mes de abril del 2018 en las estaciones A002, A004, A011 en el Ebro.

Los hidrogramas de la figura anterior muestran que, en las dos primeras estaciones, los cambios de caudal son bastante más abruptos que la de Zaragoza lo que es común en la zona por la geomorfología y baja pendiente que favorece la laminación natural de las avenidas entre la zona Castejón y Zaragoza, lo que implica que los picos de crecida son mayores en la primera (Sánchez, et al., 2015).

Por su parte, es notorio que el caudal en Arga Funes y Castejón comienza a incrementar desde el día 08 y que a pesar de la reducción del día 10 los registros se mantienen altos con respecto a los valores medidos durante los demás días de abril.

También, se puede observar, en la figura 12, que en Zaragoza dicho aumento se empieza a percibir paulatinamente los días 09 y 10, con caudales de 1199 y 1204 m³/s respectivamente. Puesto de otra forma, se da una respuesta más tardía, presentándose la avenida máxima el día 15, mientras que en Arda Funes y Castejón el pico de la avenida se da el día 13; un tiempo de respuesta de la diferenciado de dos días desde que se da el inicio del evento en la parte alta hasta un punto aguas abajo producto de la laminación.

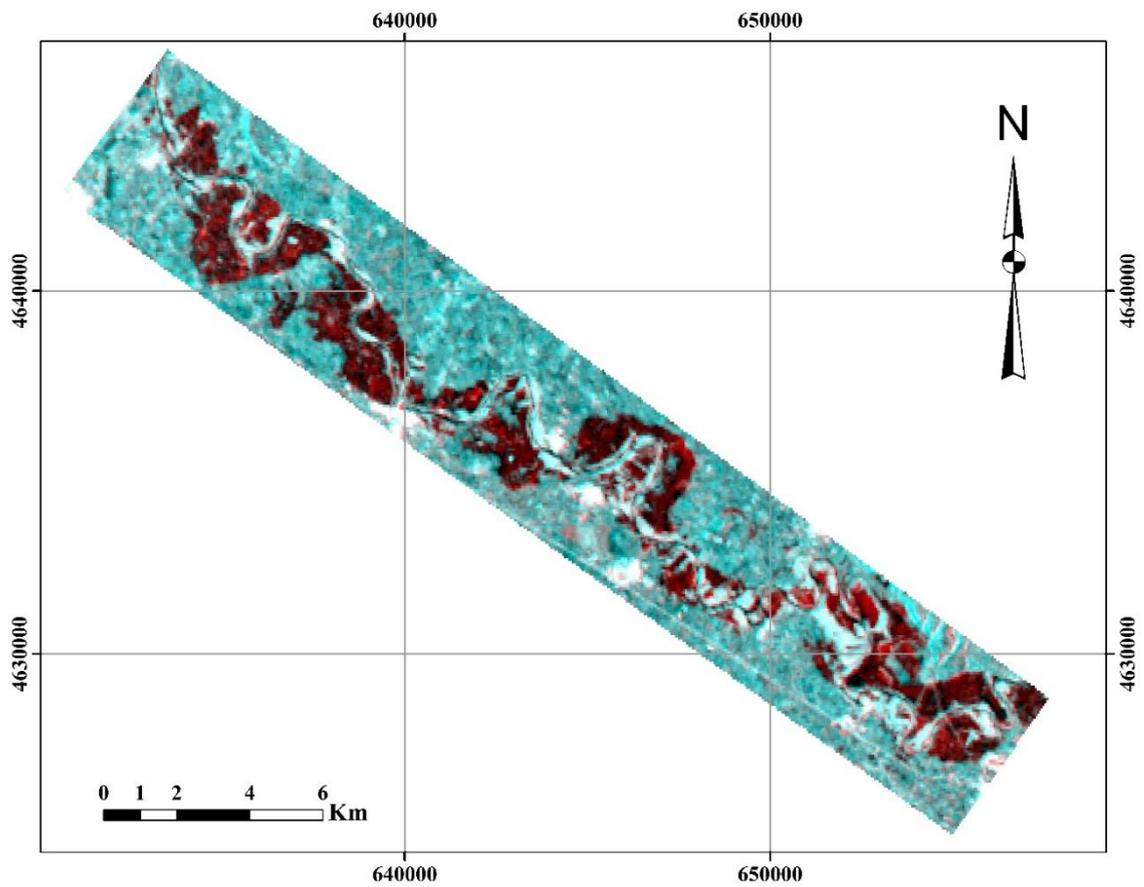
3.2 Imágenes RADAR.

La generación de las zonas de inundación a partir de las imágenes RADAR fue explicado en el apartado de metodología. A continuación, se representarán los resultados obtenidos luego de aplicar la combinación de bandas RGB mostrada en la figura 9 la cual representa las áreas bajo inundación en tonalidades rojas

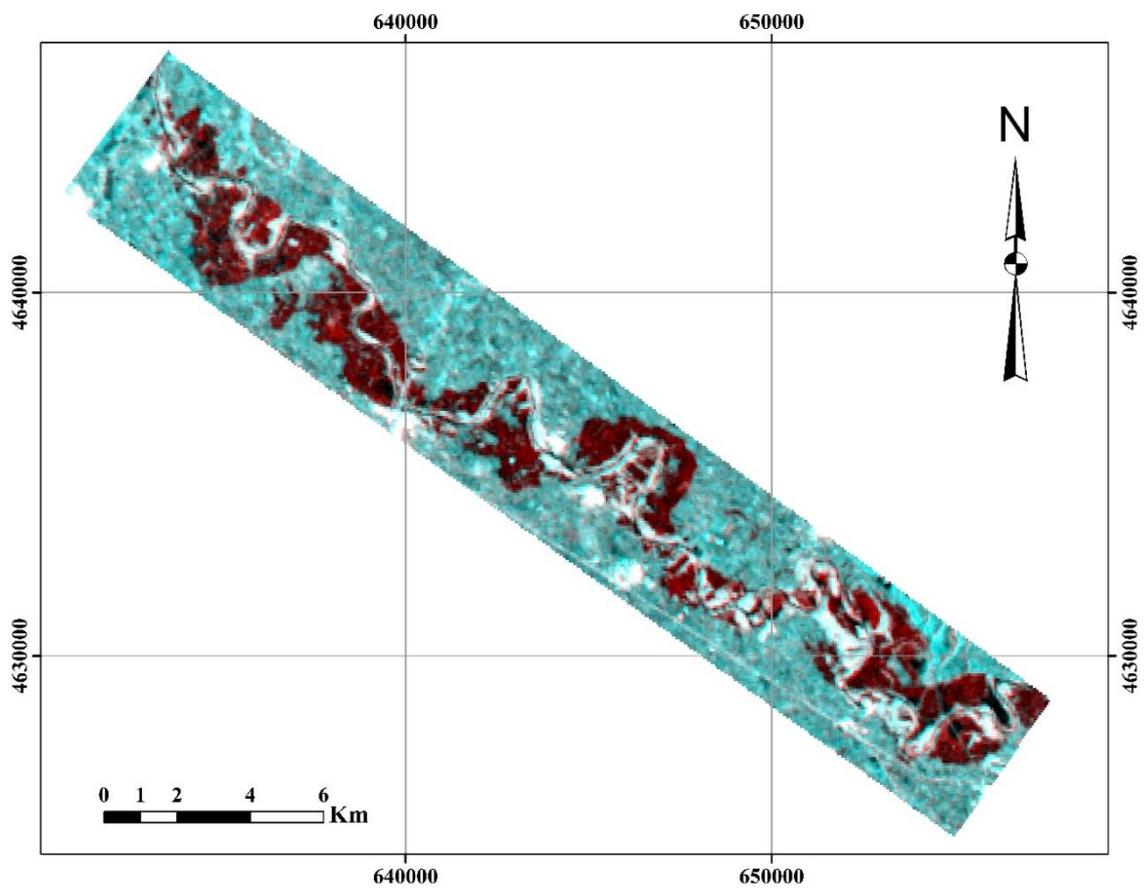
La figura 16, corresponde al Stack que combina las fechas del 06 y 13 de abril del 2018 es decir, en la línea de tiempo anterior y durante el evento de inundación en sus dos polaridades: A) Vertical-Vertical (VV) y B) Vertical-Horizontal (VH).

Por su parte, análogamente, la figura 17 representa el Stack para las fechas 13 de abril y 05 de junio del 2018, cuyo caso permite visualizar la situación durante la inundación y después de la misma con sus polaridades distribuidas de igual manera A) Vertical-Vertical (VV) y B) Vertical-Horizontal (VH).

La importancia de comparar la composición RGB en distintos momentos y diferentes polaridades radica en comprobación de la delimitación de las áreas de inundaciones las cuales son similares en todos los casos como puede apreciarse en las figuras ya mencionadas.

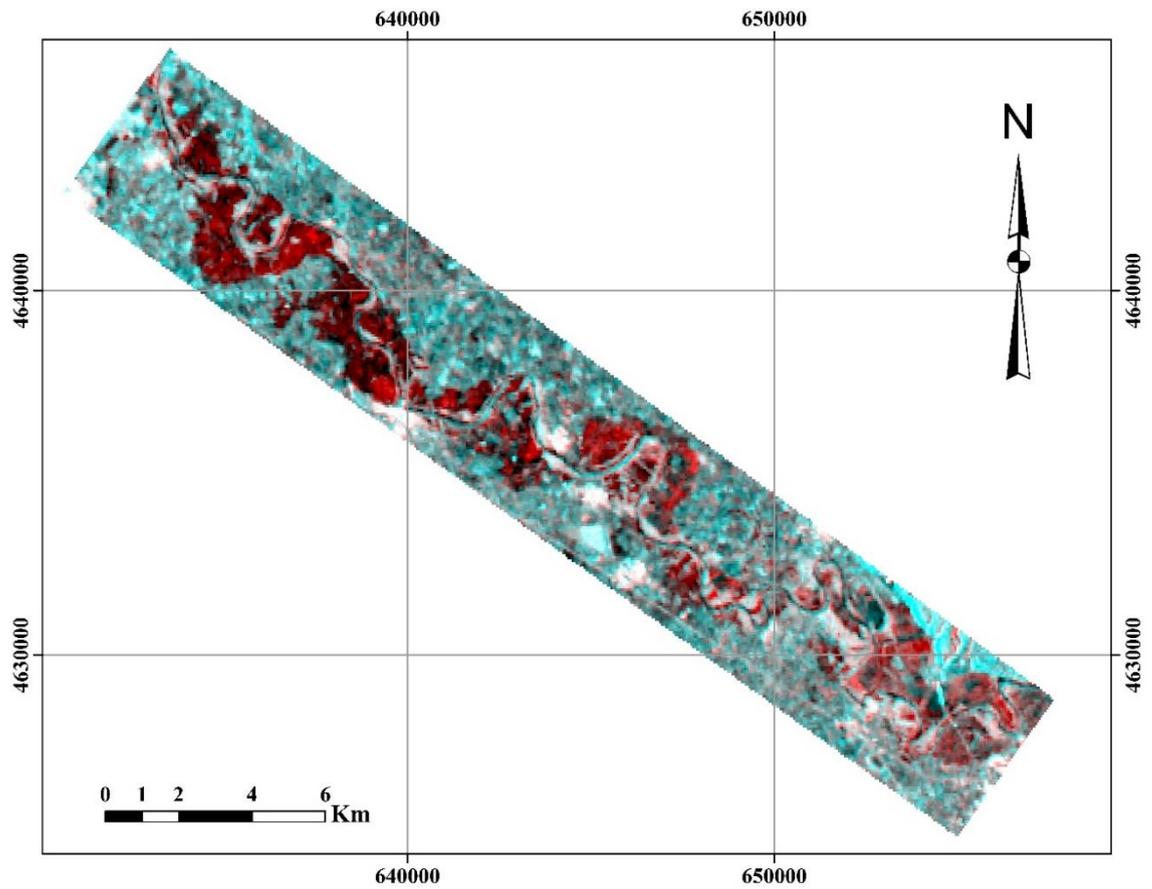


A)

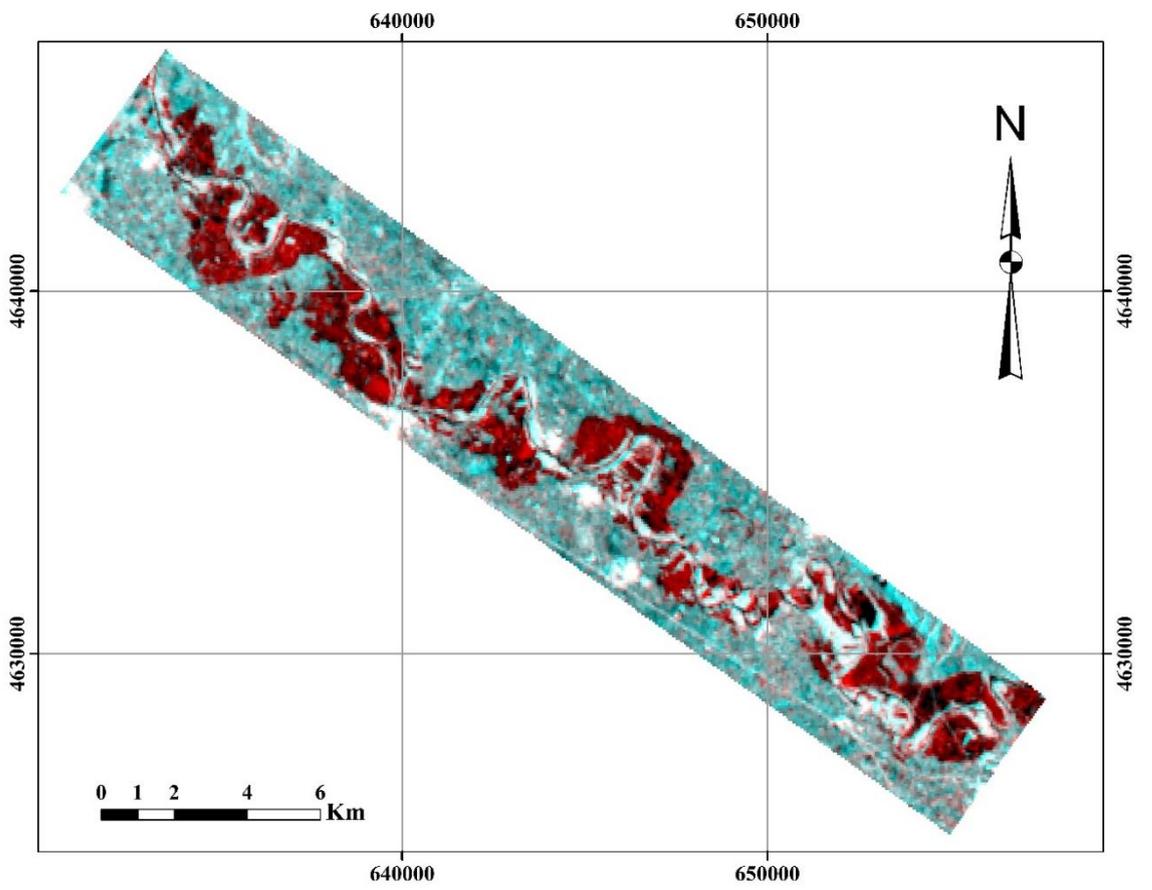


B)

Figura 16. Mapa composición RGB para las fechas 06 y 13 de abril del 2018, según polaridad: A) VV y B) VH.



A)



B)

Figura 17. Mapa composición RGB para las fechas 13 de abril y 05 de junio del 2018, según polaridad: A) VV y B) VH.

Una vez que se efectúa el análisis de las composiciones RGB y se identifican las zonas de inundación se avanza hacia el proceso de clasificación o separación de los píxeles que únicamente contienen estas áreas. Para esto se utilizan los histogramas de bandas mediante la definición del intervalo de decibelios (dB) correspondiente a áreas sumergidas, los cuales conformaran una nueva banda.

Es importante tener en cuenta que para la definición del intervalo de dB existen algunos valores ya determinados por varios autores quienes indican que entre -25 y -20 dB representa áreas cubiertas de agua (Notti *et al.*, 2018) que coincide con la pico más pequeño del histograma tal y como se ve en la figura 18.

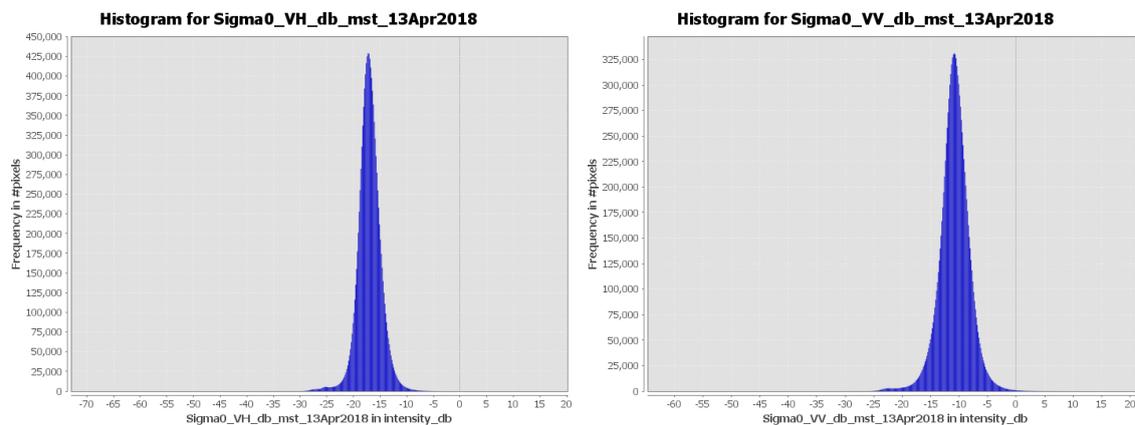


Figura 18. Histograma de bandas día 13 de abril del 2018 en VH y VV.

Se obtuvieron entonces un rango de -21 a -26 dB en VH y de -25 a 16 dB en VV, valores muy cercanos a los también indicados por Carreño y De Mata (2019) que oscilan entre -21 y -24 en VH y -15 a -21 VV para la misma zona inundada. Con los rangos de dB definidos se obtiene una imagen como la siguiente.

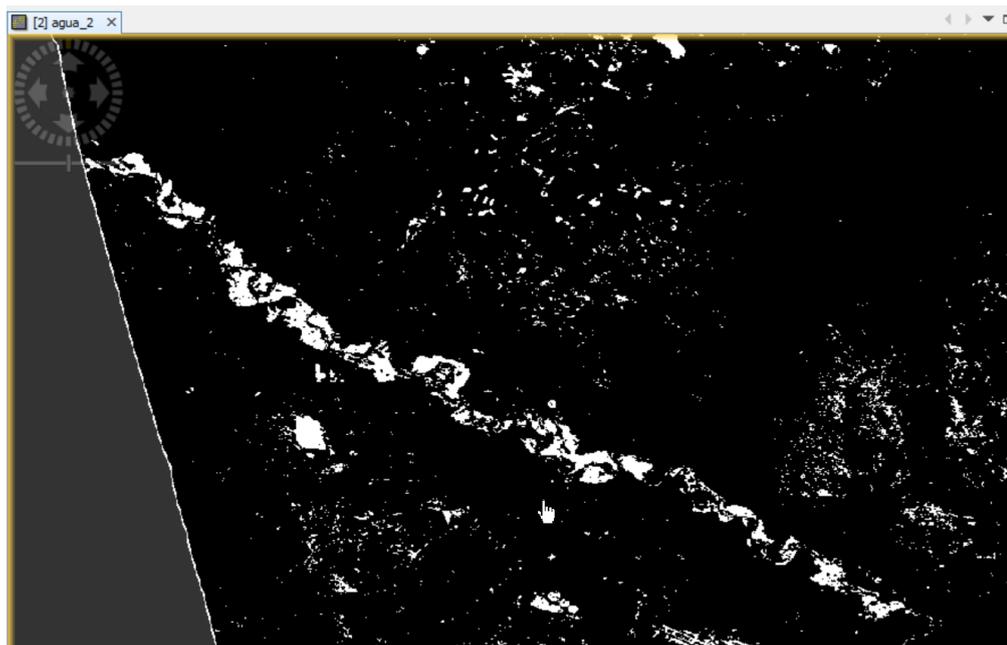


Figura 19. Visualización clasificación zonas inundadas en SNAP.

Una vez obtenida la imagen anterior, se exporta y se continua el proceso de depuración y vectorización en ArcGIS hasta, obtener el mapa correspondiente a la figura 20.

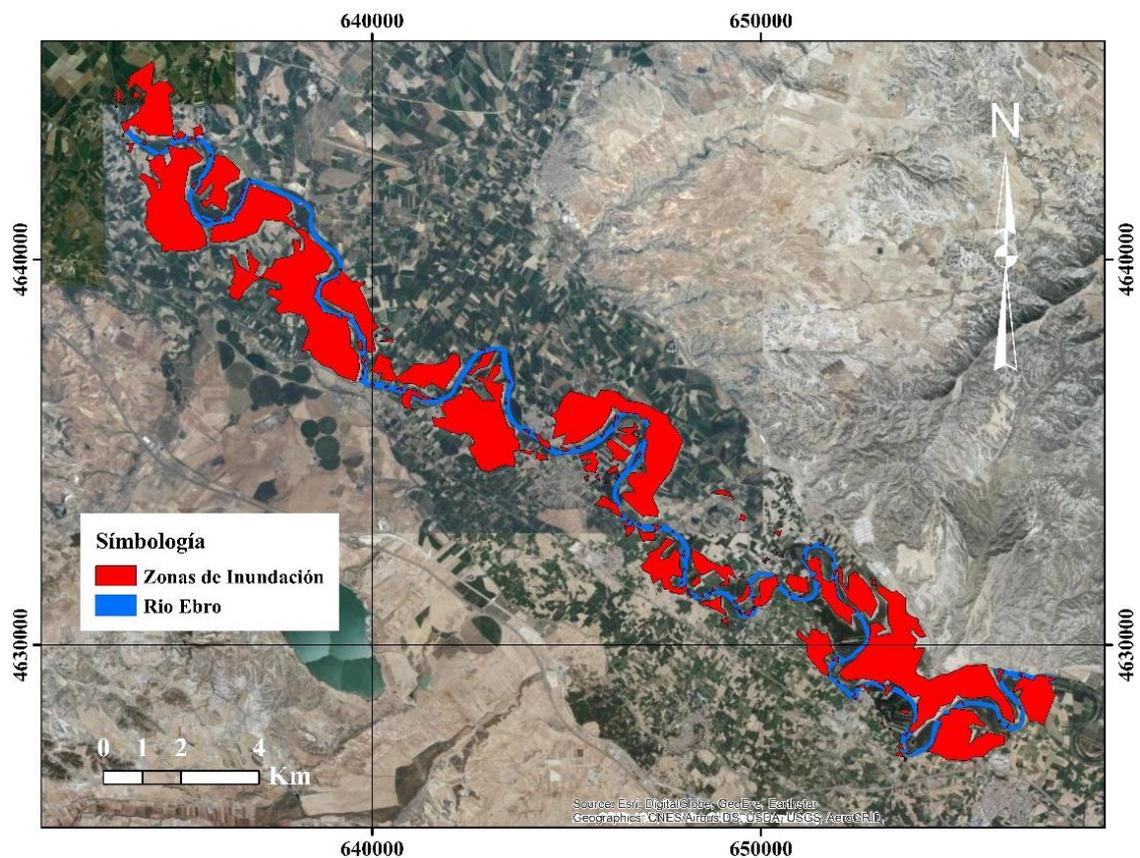


Figura 20. Zona de Inundación a partir de las imágenes RADAR del día 13 de abril del 2018.

3.3 Imágenes Sentinel 2

De conformidad con lo mencionado en la metodología se aplica el índice NDWI a la imagen correspondiente al día 14 de abril obteniéndose la figura 21, en la que se observa el desplazamiento del flujo ampliando los espacios cubiertos por agua en las partes altas e inundándose las zonas bajas, lo que es coherente con el hidrograma de la estación Zaragoza en donde en el período comprendido desde el 14 hasta el 16 se presentan los mayores caudales.

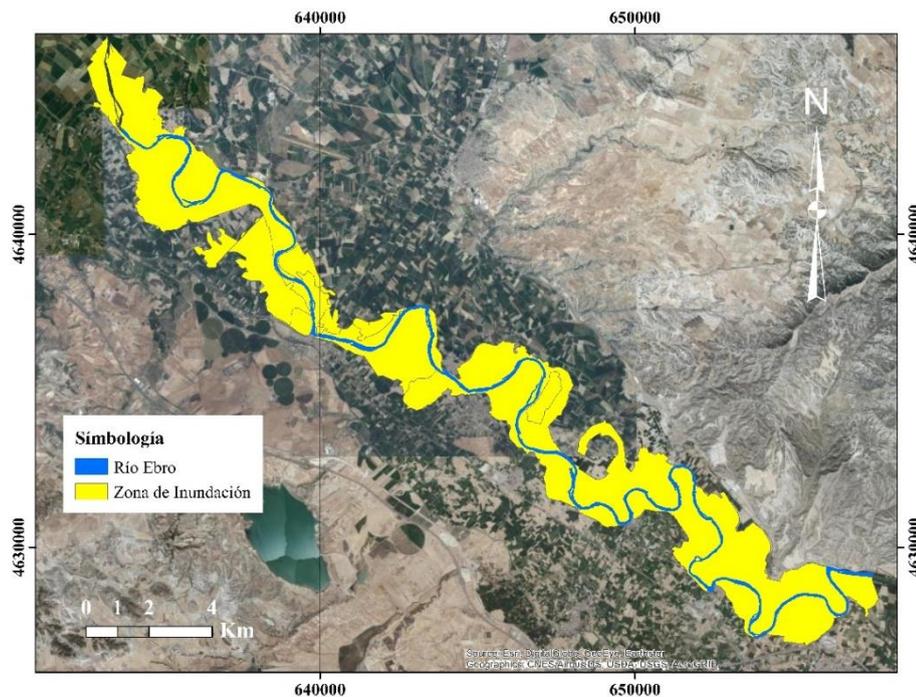


Figura 21. Zona de Inundación a partir de Sentinel 2 para el 14 de abril del 2018.

3.4 Imágenes Landsat 8

De manera similar, la imagen Landsat 8 es tratada con el índice NDWI con el que se diferenciaron las zonas que permanecen inundadas al día 19 de abril, como se representa en la figura 22, en la que se nota la disminución de los espacios cubiertos por agua en las partes altas, sin embargo se mantienen la inundación aguas abajo, lo que demuestra una vez más la respuesta tardía de la cuenca que evidenciaban los hidrogramas.

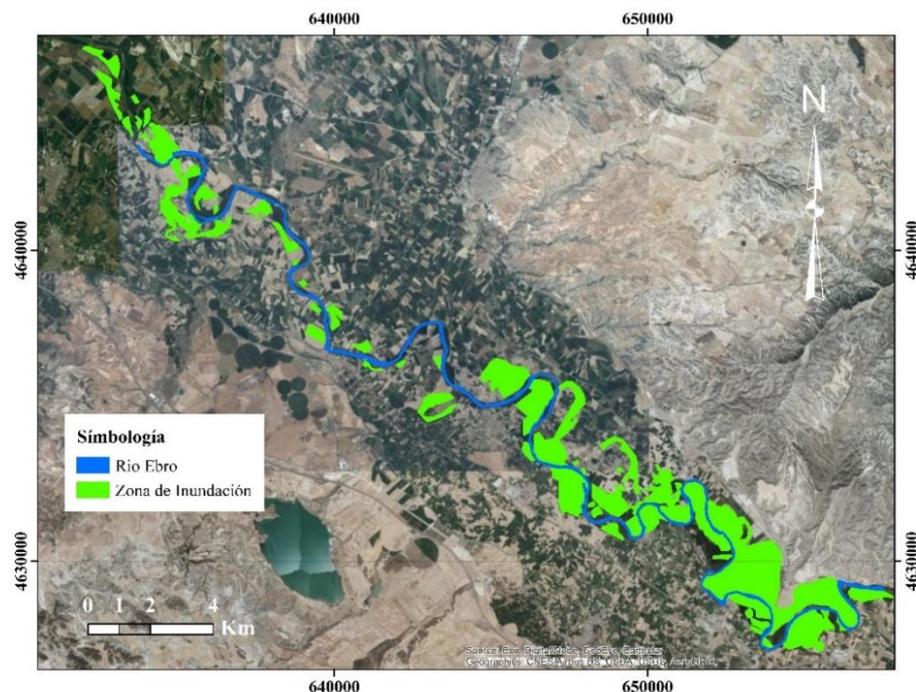


Figura 22. Zona de Inundación a partir de Landsat 8, del día 19 de abril del 2018.

3.4 Validación Cartografía Zonas Inundables

De acuerdo con lo anteriormente expresado, se dispone de cartografía de las zonas inundables generada desde tres fuentes de información diferentes, las cuales permiten evidenciar evolución del evento de inundación en el tiempo, ya que cada imagen utilizada corresponde a un momentos temporales distintos.

La información proveniente de las imágenes RADAR correspondientes al día uno del evento (13 de abril) evidencian que la mayor concentración de agua se ubica entre la parte alta a intermedia del área de estudio. De acuerdo con Carreño y De Mata (2019), el área inundada obtenida desde RADAR es de 2640,61ha, mientras que el valor procesado para este estudio es de 3203,5ha, es decir, una diferencia de el orden del 10%.

Ahora bien, al día siguiente, representado por medio de la imagen Sentinel-2 se nota un claro incremento del área cubierta por la inundación abarcando un total de 5469 ha, es decir un aumento de 2266 ha.

Pasados seis días desde el inicio de la inundación, esta continúa y se concentra mayoritariamente en la parte baja de la zona de estudio, lo que corresponde a lo ya mencionado del tiempo tardía de respuesta de la cuenca reflejado en los hidrogramas de crecida (Figura 15).

En la figura 23 se presenta todo lo anteriormente mencionado referente a la evolución de la inundación en la zona de estudio así como el área de cobertura respectiva según tipo de imagen utilizada

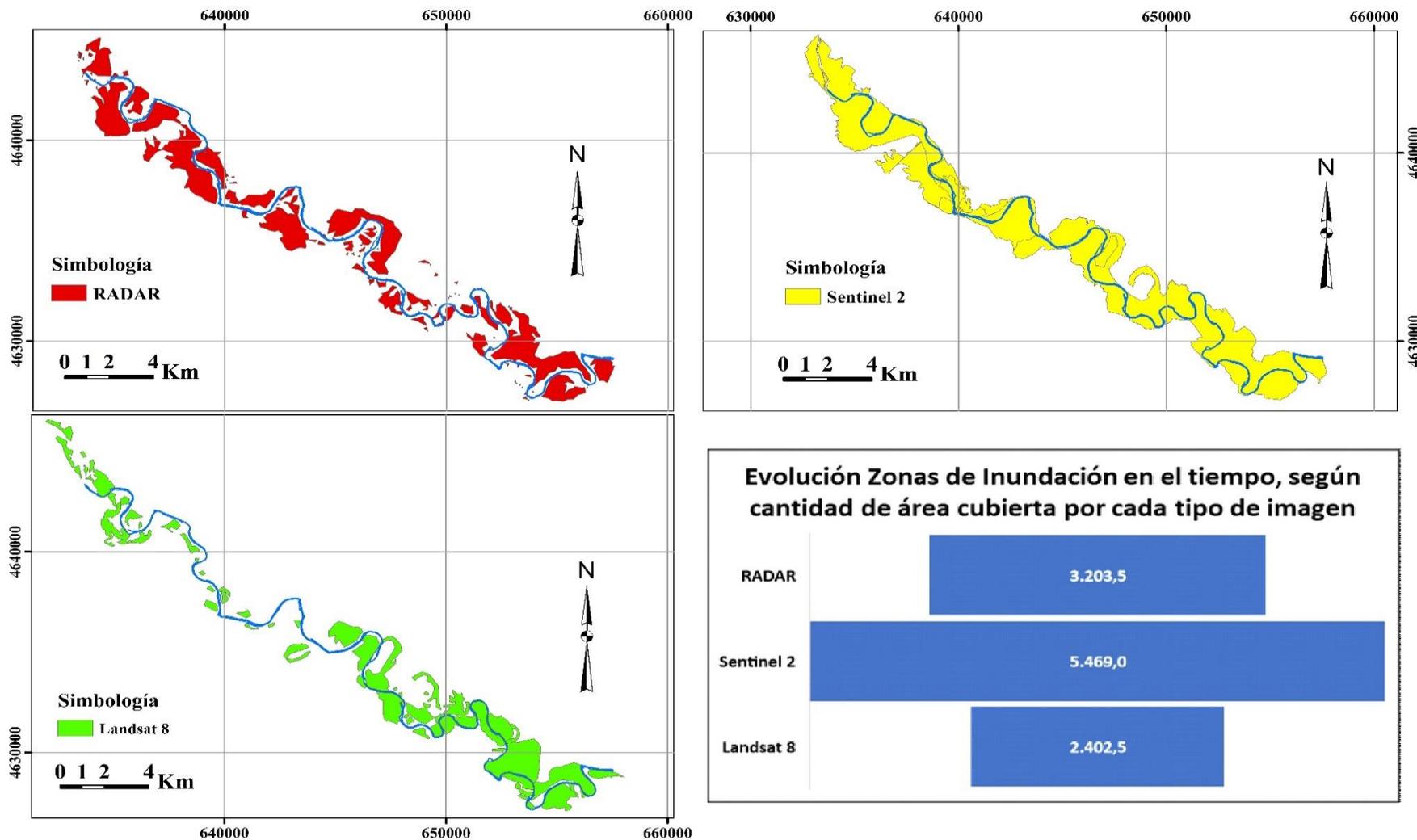


Figura 23. Evolución áreas de inundación, en hectáreas, según tipo de imagen. Fecha RADAR 13 de abril del 2018. Fecha Sentinel-2: 14 de abril del 2018. Fecha Landsat 8: 19 de abril del 2018.

Como parte del proceso de validación de la cartografía obtenida, es necesario compararla con la información oficial de la CHE; por lo que se tomó cada una de las zonas de inundación producidas en este estudio y se correlacionó con la ya establecida por la confederación con el fin de determinar sus áreas en común.

De conformidad con el análisis efectuado producto de la comparación con la cartografía de la CHE, la mayor proporción de área común se da con las zonas de inundación delimitadas a partir de la imagen Sentinel 2, lo cual es totalmente predecible dado que es el día en que mayor superficie se encuentra cubierta por agua durante el periodo implementado para esta investigación.

Para el caso de las zonas de inundación generadas desde imágenes RADAR y Landsat 8, el porcentaje de área común con lo establecido por la CHE es similar, sin embargo su distribución en el espacio es diferente por las razones ya antes mencionadas en relación con la respuesta de la cuenca ante un evento con este.

Propiamente para las zonas elaboradas a partir de RADAR (Carreño y De Mata, 2019) indican un área en común de 1767,88ha con la ortofoto de la confederación, en tanto en esta investigación es de 2142,2ha, es decir mayor espacio coincidente.

Llama la atención en la figura 24, como una porción de área inundada que se diferencia tanto en las imágenes RADAR como en la Sentinel 2 y algunos pequeños espacios en Landsat 8, no son contemplados en la delimitación oficial de la confederación.

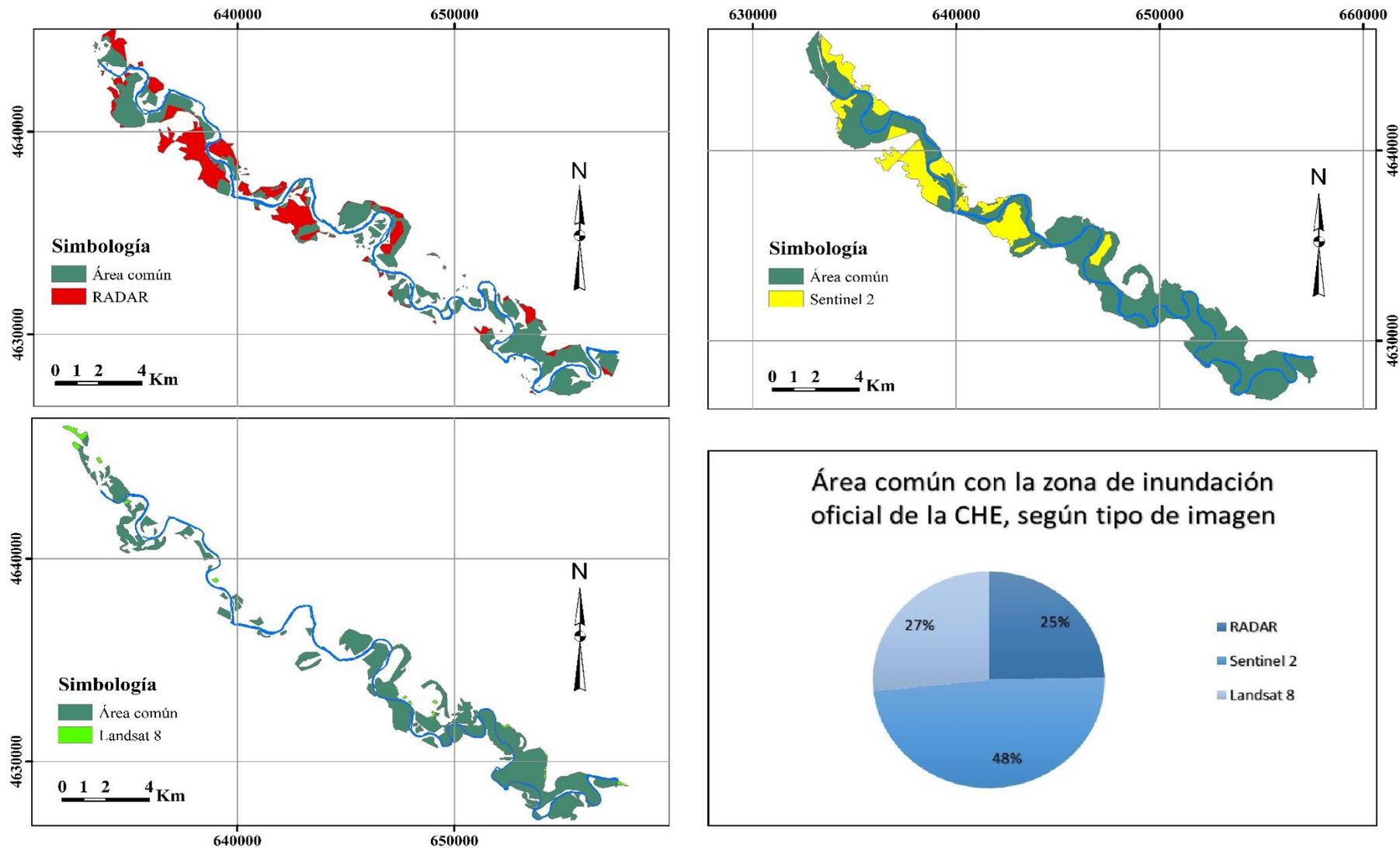


Figura 24. Área común de las zonas de inundación generadas a partir de cada imagen satelital con los datos oficiales de la CHE. Fecha RADAR: 13 de abril del 2018. Fecha Sentinel 2: 14 de abril del 2018. Fecha Landsat 8: 19 de abril del 2018.

3.5 Estimación de Profundidad

Con respecto a la profundidad de la zona inundada, es necesario mencionar que su comportamiento es variable a lo largo del tramo del río en cuestión, lo cual es esperado dada la morfología, relieve y respuesta al evento ya antes descrita.

Tal y como fue mencionado en el capítulo de metodología, para la estimación de las profundidades se utilizó el MDT con una resolución de 2m realizado por el IGME. La red de puntos empleada en la interpolación contó con un total de 6222 observaciones cada una con sus parámetros de latitud, longitud y profundidad.

Los valores calculados se encuentran dentro del rango esperado de precisión en conformidad con la información de elevación utilizada, por lo que se procede a la elaboración de la correspondiente cartografía.

Las profundidades que se obtuvieron oscilan entre el rango de 0 a 2 metros en la mayoría del área que abarca las zonas de inundación del tramo de estudio, localizándose tres focos importantes en donde los valores superen dicho intervalo, identificados alrededor de la estación de aforo Novillas (zona alta), Pradilla del Ebro (zona intermedia) y cerca del poblado de Alagón (zona baja).

En la figura 25 se presenta el mapa de profundidades elaborado para el tramo en cuestión, en el que las tonalidades azules representan el rango de 0 a 2m que tal y como se evidencia es el área mayoritaria. En tanto, los tonos verdes identifican las profundidades medias, es decir, entre 3 a 4m. El amarillo sería valores entorno a los 5 metros mientras que las coloraciones rojizas hacen referencia a valores en el intervalo mayor a 6m, los cuales como se puede notar son escasos.

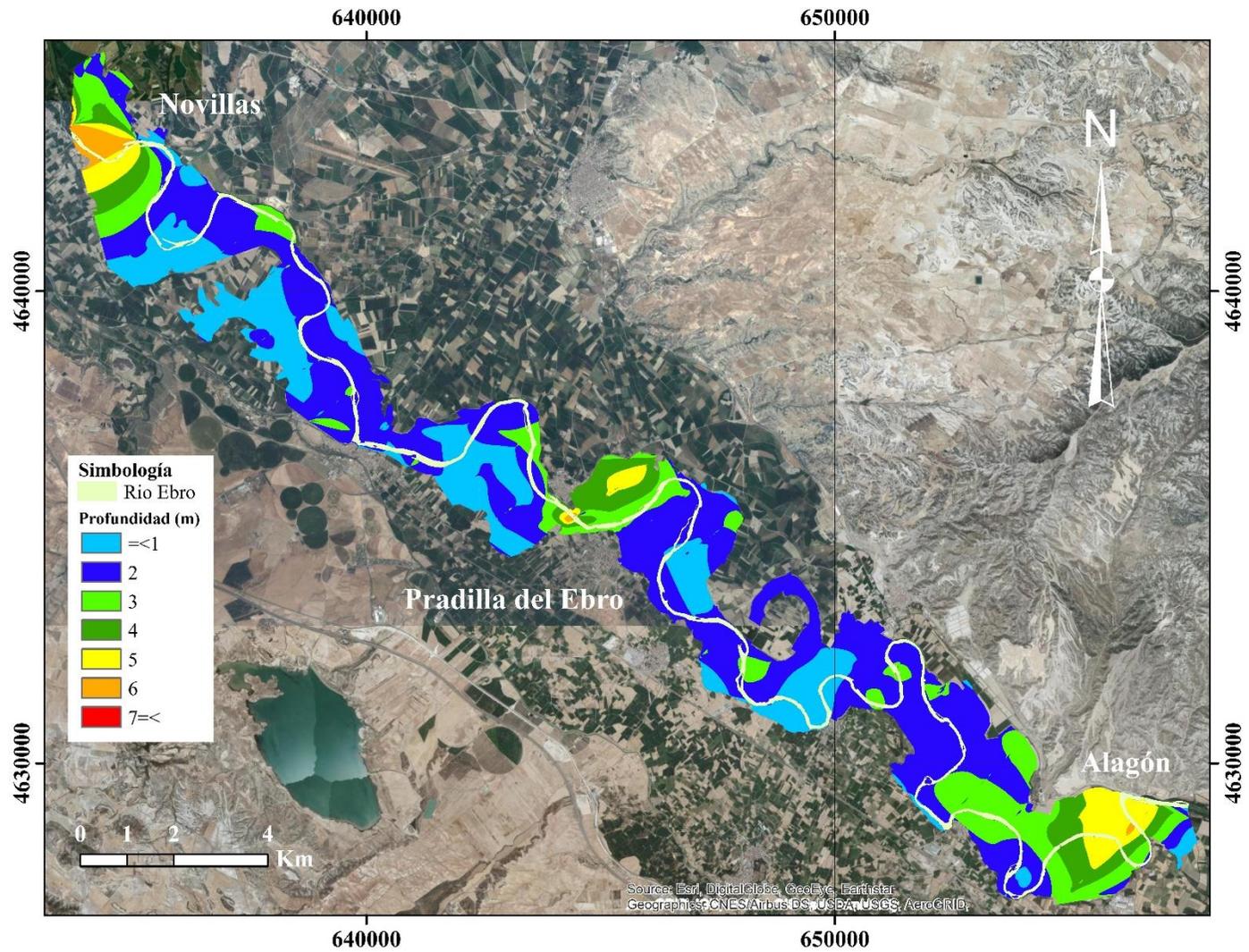


Figura 25. Mapa de profundidades, tramo de estudio en el río Ebro.

La siguiente figura, presenta la variabilidad de los datos de profundidad según el área ocupada en las zonas de inundación.

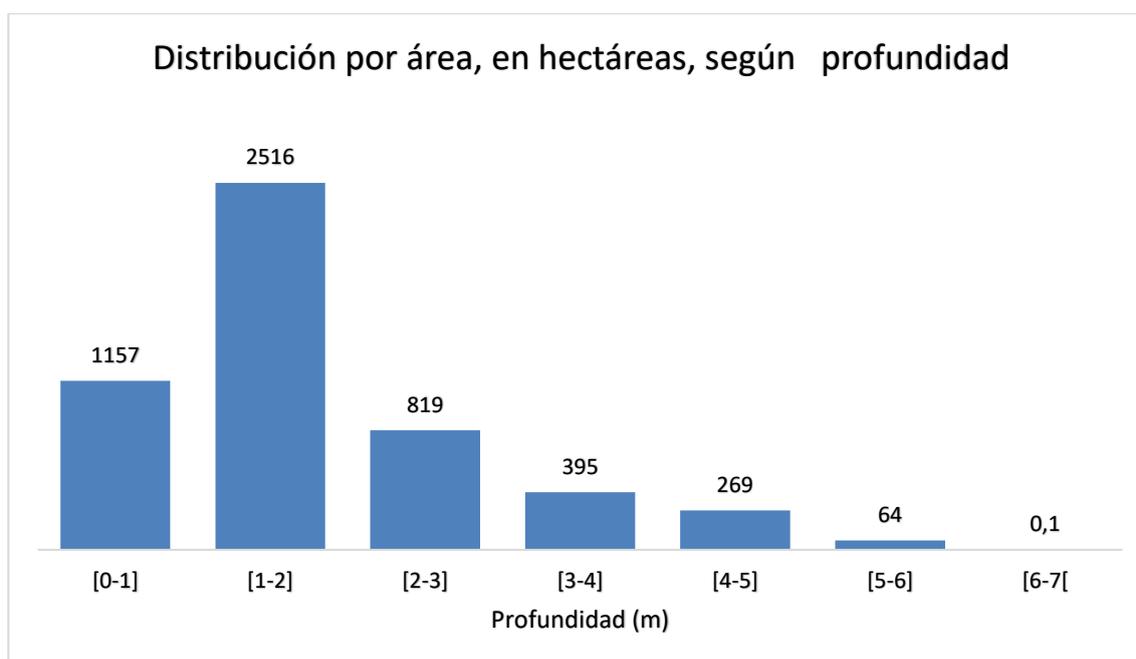


Figura 26. Distribución de áreas, en hectáreas, según profundidad en el tramo de estudio del río Ebro.

De acuerdo con la figura anterior, el 70% del área inundada posee profundidades menores a los 2m, lo que implica unas 3673 ha. Por otra parte, un 16% de la zona se encuentra entre el rango de los 2 a 3 metros de profundidad, mientras que un 8% se localiza entre valores de 3 a 4m. El restante 6% de superficie oscila en cantidades mayores o iguales a 5 metros de profundidad.

Ahora bien, con el objetivo de validar el mapa de profundidades de la figura 25, se procedió a comparar los niveles máximos registrados por las estaciones de aforo a saber: Novillas, Pradilla del Ebro y Alagón de las que se conoce el nivel máximo de la lámina de agua registrado del día de la inundación, para lo que, en las mismas coordenadas de las estaciones, se extrae el valor estimado de profundidad cuyos resultados son:

Tabla 5. Comparación entre niveles de estaciones de aforo y datos obtenidos a partir de las imágenes RADAR.

Estación de Aforo	Nivel promedio 2018 (m)	Nivel Máximo día de inundación (m)	Nivel estimado (m)	Diferencia (m)
*Novillas	2,63	8,24	6,31	-1,93
*Pradilla de Ebro	3,11	8,51	7,72	-0,79
Alagón	0,88	2,26	3,34	+1,07

*Estación ubicada cerca de puente.

Fuente: Adaptado de Carreño y De Mata, 2019.

Como se puede notar en la tabla anterior, los niveles máximos alcanzados el día de la inundación superan el promedio del 2018, por lo que puede así dimensionarse la magnitud del evento catalogado como extremo por la CHE.

Referente a la validación de los datos obtenidos, la diferencia entre los valores teóricos (nivel máximo día de la inundación) y calculados no superan los 2m lo cual de conformidad con la resolución del modelo digital del terreno (2m) es aceptable.

Es importante reflexionar sobre los tres sitios en los que existen profundidades con valores extremos. El primer caso es alrededor de la estación Novillas la cual se ubica bajo un puente (Figura 27), lo que interfiere en señal emitida por los satélites, lo que repercute directamente en la información contenida en las imágenes utilizadas. En concreto, el nivel de agua calculado es de 6,31m teniéndose una diferencia de 1,93 m por debajo del valor oficial de la CHE de 8,24m indicado en la tabla anterior.



Figura 27. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Novillas.

Fuente: Adaptado de Ortofoto de CHE, 2018.

En el segundo caso, sucede algo similar con los valores de profundidad obtenidos en el entorno cercano a la estación Pradilla del Ebro, localizada igualmente en un puente como lo evidencia la figura 28. En este caso se calcula un valor de 7,72m mientras que el dato oficial es de 8,51, es decir una diferencia de -0,79m.



Figura 28. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Novillas.

Fuente: Adaptado de Ortofoto de CHE, 2018.

El tercer sitio es cercano al poblado de Alagón en el que igualmente la estación se ubica bajo un puente (figura 29), en la que según la CHE la profundidad es de 2,26m mientras que la calcula es de 3,34m es decir 1,07m por encima.

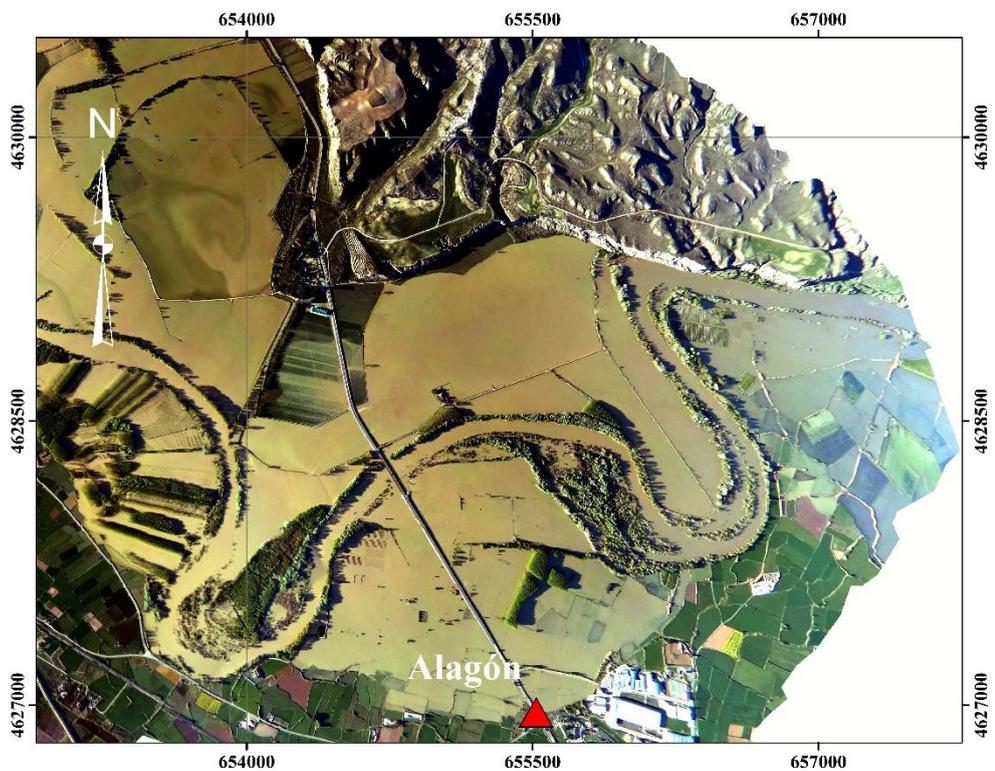


Figura 29. Ilustración puente en el que se ubica la estación de aforos Alagón.

Fuente: Adaptado de Ortofoto de CHE, 2018.

En la figura 29, además se puede observar que el relieve y el cambio de la forma del río en esta zona, incide en un aumento del nivel de la lámina de agua de manera que el caudal se mantenga estable. En otras palabras, el cambio en la dirección del flujo provoca una variación en la velocidad de este, por lo que debe modificarse el área para mantener el caudal que circula. Dado que el ancho de la sección es constante, la altura de la lámina de agua debe incrementarse proporcionalmente de ahí que en la parte baja del mapa de la figura 25 se puede notar un incremento en las profundidades teniéndose valores menores a los 6 metros.

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que las imágenes satelitales son una herramienta complementaria en el análisis de inundaciones, en las cuales es posible observar la evolución del evento en el tiempo mediante la identificación de áreas afectadas y el análisis de variables como la profundidad.

En cuanto a la delimitación de las zonas inundadas, a partir de las imágenes satelitales se obtuvo una correspondencia entre lo generado como producto de esta investigación y los datos oficiales de la CHE de un 25% para la cartografía proveniente de RADAR, mientras que se tiene un 27% para Landsat 8 y un 48% de área en común en el caso de Sentinel-2.

Es importante resaltar que la delimitación de las zonas de inundación en las diferentes imágenes evidenció la evolución del evento de inundación por medio de la cantidad de área cubierta. En el caso de RADAR, que corresponde al día inicial de la inundación se obtuvo un total de 3203 ha cubiertas de agua mientras que al día siguiente en la imagen Sentinel 2 ha se tienen 5469 ha, en tanto con Landsat 8 se observó que aún el día 19 de abril la inundación continuaba con unas 2043 ha concentradas mayoritariamente en la parte baja del tramo de estudio.

Propiamente en lo que se refiere a la estimación de valores de profundidad, los resultados alcanzados cumplieron con la precisión esperada de conformidad con la resolución, de 2m, del modelo digital de elevación utilizado y según los niveles registrados en las estaciones de aforo en la zona. Esto a pesar de la presencia de elementos como puentes, los cuales producen distorsión de la señal del satélite, lo que debe ser analizado con detenimiento para cada caso con el fin de determinar la calidad de los datos calculados.

En concreto, los resultados mostraron que la mayor parte del tramo de estudio, específicamente el 70% del área total, posee valores entre los 0 y menor a 2m de profundidad, mientras que el 29% se encuentra en un rango intermedio que va desde los 2 a menos de 5 m. En tanto el 1% restante de la superficie registra los datos máximos, es decir mayores 5 m.

En conclusión, la metodología implementada en este estudio es válida en su dado que los resultados obtenidos. Sin embargo es necesario recalcar la importancia de analizar cuidadosamente la presencia de objetos que puedan alterar la señal satelital para garantizar que el producto final se encuentre entre los valores de tolerancia deseados. Además, conocer los valores de profundidad así como las áreas específicas en las que estas se dan puede tener distintas aplicaciones como por ejemplo mitigación de emergencias causadas por avenidas, cálculo de tasa de infiltración, eventual análisis del manejo del excedente de agua en miras a recarga artificial de acuíferos o utilización para riego y/o otros uso, por citar algunos ejemplos con los cuales se podría implementar el procedimiento propuesto.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Espacial Europea . (17 de junio de 2015). *Sentinel-2*. Obtenido de Sentinel-2: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- Agencia Espacial Europea. (2020). *Copernicus: descarga de imagenes*. Obtenido de Copernicus: descarga de imagenes: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Agencia Espacial Europea. (2020). *Sentinel-1*. Obtenido de Sentinel-1: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- Arango, A. (2012). *Impacto de las inundaciones en España: 1910-2010*. Obtenido de Impacto de las inundaciones en España: 1910-2010: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3954/6/TFM_Amalia%20Mar%C3%ADa_Arango_Selgas.pdf
- Benito, G. (2006). Riesgo de inundaciones: tendencias y perspectivas de acuerdo con el cambio climático. *C&G*, 29-44.
- Bioresita, F., Puissant, P., Stumpf, A., y Malet, J. P. (2019). Fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 image time series for permanent and temporary surface water mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 40. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1624869>
- Carreño, F., y De Mata , M. (2019). Flood Monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR Images: The Ebro river case Study. *Water* 2019(12: 2454).

- Chuvienco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, Alcalá de Henares: Ediciones RIALP S.A.
- Confederación Hidrográfica del Ebro . (2009). *Confederación Hidrográfica del Ebro* . Obtenido de Confederación Hidrográfica del Ebro : <http://www.chebro.es/>
- Consortio de Compensación de Seguros. (2018). *Estadística Riesgos extraordinarios*. Obtenido de http://www.consorseguros.es/c/document_library/get_file?uuid=548d4f59-b6c5-40dd-b06b-98dbcefd790f&groupId=10124
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz, A., Pereira, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., . . . Moreno, J. (2016). *Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales*. Argentina: Conference: XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER). Obtenido de Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales.
- Ecologistas en Acción. (Noviembre de 2015). *Los efectos del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones en España*. Obtenido de Los efectos del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones en España: https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/informe-inundaciones_cc-castellano.pdf
- ESRI. (2016). *Cómo funciona Vecino natural*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm>
- ESRI. (2019). *Calibración radiométrica de Sentinel-1*. Obtenido de Calibración radiométrica de Sentinel-1: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/manage-data/raster-and-images/sentinel-1-radiometric-calibration.htm>
- European Environmental Agency. (2005). *EEA Briefing No 1/2005: El cambio climático y las inundaciones fluviales en Europa*. Obtenido de EEA Briefing No 1/2005: El cambio climático y las inundaciones fluviales en Europa: https://www.eea.europa.eu/es/publications/briefing_2005_1
- European Environmental Agency. (2020). *European Environmental Agency*. Obtenido de European Environmental Agency: <https://www.eea.europa.eu/highlights/publications/water-resources-and-vulnerability>
- Fernández O., Y., y Soria R., J. (2015). Imágenes de RADAR de apertura sintética y conceptos básicos de polarimetría. En Y. Fernández O., M. J. Escalona M.,

- y J. R. Valdéz L., *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas* (págs. 37-66). Montecillo, Texcoco. Estado de México: Editorial del Colegio de Postgraduados.
- Fernández, J., y Siabato, W. (2010). *Procesamiento y accesibilidad de datos LIDAR a través de aplicaciones distribuidas*. Madrid.
- Ferreira. (2005). *Técnicas de interpolación utilizadas en la evaluación de las reservas geológicas*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-1500/UCH1803_01.pdf
- Ferrer, C. (2012). *El sistema hidráulico del Ebro. Hidrología y Previsiones*, <https://ifc.dpz.es/recursos/publicaciones/22/86/12ferrer.pdf>. Obtenido de Institución Fernando el Católico.
- García, R., González, C., de la Vega, R., & Sebem, E. (2003). *Análisis del comportamiento de filtros de reducción del Speckle en imágenes ERS2-SAR*. Obtenido de Análisis del comportamiento de filtros de reducción del Speckle en imágenes ERS2-SAR: <http://www.aet.org.es/congresos/x/cac73.pdf>
- Gobierno de España. (2020). *Centro Nacional de Información Geográfica: Centro de descarga*. Obtenido de Centro Nacional de Información Geográfica: Centro de descarga: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscador.do#>
- González C., L. (2018). *Seguimiento y control cuantitativo del desplazamiento del terreno en una zona de la explotación minera, "El Feixolín" (León), mediante Interferometría Diferencial SAR*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Hernández U., E., Barrios P., H., y Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5-25.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. (2019). *Analizando el vocabulario de los productos Sentinel-1*. Obtenido de Analizando el vocabulario de los productos Sentinel-1: https://www.inta.es/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1547196454442
- MCFeeters, S. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (2018). *Inundaciones y Cambio Climático*. Madrid.

- NASA. (29 de Noviembre de 2017). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR)*. Obtenido de Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR): https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf
- Notti, D , Giordan, D., Caló,F. , Pepe, A., Zucca, F., y Galve, J. (23 de Octubre de 2018). *Remote Sensing*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/11/1673>
- Ollero O., A., y Sánchez F., M. (2015). Las Inundaciones del Ebro en febrero y marzo del 2015. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 350-351.
- Rebelo, F. (1997). Risco e crise nas inundações rápidas em espaço urbano. Alguns exemplos portugueses analisados a diferentes escalas. *Territorium*, 29-47.
- Sánchez F., M., Ballarín F., D., Mora, A., Ollero, A., Serrano_Notivoli, R., y Saz, M. (2015). *Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/283300340>
- Schmidt, T., y Greiving, S. (2010). La respuesta a los peligros naturales y al cambio climático en Europa. *Investigaciones Geográficas*, 23-49.
- Schroeder, W., Oliva, P., y Gig, L. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, 210-220.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2020). *EarthExplorer - Home :Descarga de imágenes*. Obtenido de EarthExplorer - Home :Descarga de imágenes: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos. (s.f). *Landsat Missions*. Obtenido de Landsat Missions: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/about?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con
- Sibson, R. (1981). A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. En J. W. Sons, *Interpolating Multivariate Data* (págs. 21–36). Nueva York.
- Veci, L. (2019). *SAR Basics Tutorial*. Agencia Espacial Europea.