

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Cambios en la dinámica fluvial y usos del suelo en el tramo Alcalá – Cabañas (curso medio del río Ebro). Aplicación de herramientas de análisis para su diagnóstico y restauración

AUTOR: Álvaro Melián Valverde

DIRECTOR: Alfredo Ollero Ojeda

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN ORDENACIÓN TERRITORIAL Y
MEDIOAMBIENTAL**

FEBRERO DE 2025



**Universidad
Zaragoza**

Resumen

El curso medio del río Ebro presenta una dinámica fluvial cambiante y compleja en los últimos 100 años. Esto ha provocado que el territorio fluvial que ocupa haya sido transformado y haya experimentado una creciente intervención antrópica desde el siglo XX. Este trabajo se centra en el tramo Alcalá de Ebro – Cabañas de Ebro (provincia de Zaragoza, Aragón) con una longitud de unos 10 kilómetros, el cual presenta un considerable territorio bajo el riesgo por inundación con actividades y localidades muy vulnerables y expuestas. El objetivo principal de este trabajo ha sido analizar su evolución y funcionamiento dentro de un contexto de cambio global, diagnosticando su situación actual y estudiando las actuaciones realizadas para reducir el riesgo de inundación sobre Alcalá y Cabañas. La metodología se ha centrado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la fotointerpretación de imágenes para la posterior creación de cartografía sobre los elementos biogeomorfológicos y usos del suelo en el periodo 1927- 2021. Además, se ha utilizado un sistema doppler ADCP para realizar mediciones de caudal en crecida y batimetría que ayuden a comprender las actuaciones realizadas en el área de estudio propuesto. Asimismo, se realiza una caracterización de los sedimentos sobre barras fluviales con el fin de conocer su estado actual y aportar métodos y herramientas de medición.

Palabras clave: *dinámica fluvial, usos del suelo, biogeomorfología, restauración fluvial, ordenación del territorio.*

Abstract

The middle course of the Ebro River has exhibited a changing and complex fluvial dynamic over the past 100 years. This has led to the transformation of the riverine territory it occupies and has resulted in increasing human intervention since the 20th century. This study focuses on the Alcalá de Ebro – Cabañas de Ebro section (province of Zaragoza, Aragón), which spans approximately 10 kilometers and includes a significant area at risk of flooding, with highly vulnerable and exposed activities and settlements. The main objective of this study is to analyze the river's evolution and functioning within the context of global change, diagnosing its current situation and examining the measures taken to reduce flood risk in Alcalá and Cabañas. The methodology is based on the use of Geographic Information Systems (GIS) for image photointerpretation, enabling the creation of cartography depicting biogeomorphological elements and land use between 1927 and 2021. Additionally, an ADCP Doppler system has been used to measure discharge during floods and perform bathymetric assessments, helping to understand the interventions carried out in the study area. Furthermore, a characterization of sediments on river bars has been conducted to assess their current state and provide measurement methods and tools.

Key words: *river dynamics, land use, biogeomorphology, river restoration, territorial planning.*

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento al profesor Alfredo Ollero Ojeda por su orientación y apoyo para el desarrollo de este trabajo. Sus valiosas enseñanzas durante las clases en el máster y su pasión en el campo de los ríos me han enseñado un maravilloso campo de estudio en la Geografía, el cual desconocía, y del que me llevo un profundo aprendizaje.

Dar las gracias a Valeria Pirchi por su colaboración y apoyo en el proceso que me ha llevado a terminar este trabajo. Gracias por prestarme tu ayuda en todo momento y enviarme ánimos para realizar un buen estudio.

Aprovecho también para agradecer a Óscar y Néstor, de Ebro NAUTAS, por permitirme realizar con ellos el trabajo de campo durante la crecida del Ebro a finales de febrero del año pasado, aprender sobre el uso del sistema doppler ADCP y por facilitarme los resultados obtenidos.

Por último, quisiera dar las gracias a mi familia, pareja y amigos por sus ánimos mientras me encontraba estudiando el máster en Zaragoza y apoyarme en el logro de mis metas en el ámbito académico como geógrafo y amante de la geografía.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos	3
2. ÁREA DE ESTUDIO	3
2.1 Proyecto Ebro Resilience y sus actuaciones en el área de estudio	7
2.2 Proyecto SEDEXCHARE y su importancia en el área de estudio	13
3. METODOLOGÍA	14
3.1 Delimitación del área de estudio	15
3.2 Creación de la cartografía biogeomorfológica	15
3.2.1 Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)	16
3.3 Actualización y creación de cartografía de usos del suelo	17
3.4 Aplicación de sistema doppler ADCP	19
3.5 Trabajo de campo para la caracterización granulométrica y morfométrica de los sedimentos	21
4. RESULTADOS	24
4.1 Creación de cartografía biogeomorfológica	24
4.1.1 Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)	32
4.2 Actualización y creación de cartografía de usos del suelo	37
4.3 Análisis de los datos obtenidos con el sistema doppler ADCP	44
4.4 Análisis granulométrico y morfométrico de los sedimentos	46
5. DISCUSIÓN	52
6. CONCLUSIONES	56
7. BIBLIOGRAFÍA	56

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los ríos son ambientes fluviales altamente dinámicos, cuya comprensión resulta sumamente compleja de entender (Giménez-Font, 2009). Los cambios en el tiempo que se puedan detectar sobre ellos nos hablan de la contribución de los ríos como indicadores sobre el estado natural del territorio en el que se encuentran. De esta forma, su dinámica y las alteraciones antrópicas producidas, sin olvidarnos de los efectos producidos por el cambio global sobre las cuencas hidrográficas, deben ser profundizadas en su conocimiento, permitiendo así una mejor gestión y ordenación de todo el territorio fluvial.

El aumento de la antropización del tramo medio del Ebro desde principios del siglo XX hasta la actualidad ha conllevado un incremento en la exposición y vulnerabilidad de bienes y personas ante las inundaciones. A lo largo de los años se han realizado actuaciones, como pueden ser la construcción de motas y diques de defensa, con tal de eliminar y reducir las inundaciones en las zonas de mayor peligrosidad, generando una falsa sensación de seguridad. Esto provoca que el cauce natural se vea cada vez más “asfixiado” por la construcción de defensas y que genere nuevos riesgos como pueden ser la rotura de motas, carreteras inundadas (Sánchez Fabre et al, 2015) o zonas inundadas por ascensos del nivel freático que pueden tardar semanas en retornar al cauce. Además, debemos de tener en cuenta la alteración de los procesos geomorfológicos que se producen por las transformaciones antrópicas mencionadas anteriormente, dada su importancia en la dinámica fluvial.

En España, el río Ebro ha sido objeto de estudio en el ámbito científico de la geografía, tal y como lo evidencian cientos de publicaciones científicas al respecto. En el caso del tramo medio del Ebro, algunos autores como Fabre et al. (2015) han trabajado en la caracterización de los eventos de crecida e inundación y sus efectos, así como los factores que las provocan. Otras publicaciones más recientes como la de Ollero et al. (2024) hacen hincapié en la necesidad de una mejor gestión fluvial que devuelva espacio al río y mejore su resiliencia natural, social y territorial. Asimismo, para diagnosticar el estado en el que se encuentra la dinámica fluvial es necesario la utilización de indicadores geomorfológicos como los propuestos por Ollero et al. (2011). En esta publicación son propuestos algunos índices que pueden ser aplicados para el diagnóstico del sistema fluvial, siendo utilizados algunos de ellos para el presente trabajo. El uso de los índices hidrogeomorfológicos están muy extendido en los estudios de ámbitos fluviales que pretenden entender su funcionamiento. Trabajos como

el de León y Ramírez (2010) abordan las características morfológicas de los sedimentos como la esfericidad, aplanamiento y desgaste, entre otros. Estas características serán tenidas en cuenta en este trabajo a través de su cálculo como índices morfológicos.

En otro orden de cosas, las publicaciones existentes relacionadas con el área de estudio propuesto encontramos la aportación realizada por Ollero (1996) sobre la dinámica de los meandros y los riesgos hidromorfológicos. En ella se pone de manifiesto cómo los pueblos de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro presentan un riesgo máximo de inundación y los riesgos que han provocado la alteración de la dinámica fluvial en estos dos núcleos. Sobre la gestión de las inundaciones, Salas (2015) realizó un Trabajo Fin de Grado sobre este aspecto para la localidad de Alcalá de Ebro, proponiendo buenas prácticas sobre el conocimiento, evaluación y cartografía de las inundaciones, sobre el territorio fluvial atendiendo a la extensión del corredor ribereño del río, la gestión y ordenación de los espacios fluviales; y sobre los sistemas de alerta temprana y la educación en la cultura del riesgo. Sobre los usos del suelo, no se han encontrado publicaciones y artículos que aborden este aspecto en ambas localidades y que ayuden a comprender la evolución que ha tenido en el tiempo y su relación en la modificación del sistema fluvial. Es cierto que Ollero et al (2015) realizaron una aproximación entre los usos del suelo y los cambios producidos en el cauce del Ebro, pero a una escala muy superior a la que se aproxima este trabajo.

También existen iniciativas públicas como es la Estrategia Ebro Resilience que trabaja en la mitigación del riesgo de inundación en el tramo medio del río Ebro, con actuaciones realizadas dentro del área de estudio propuesto en este trabajo. Y otras iniciativas dentro del ámbito universitario de la investigación como es el proyecto SEDEXCHARE. Ambos proyectos serán detallados más adelante sobre su implicación y contexto en el área de estudio.

Por otro lado, ha resultado fundamental la asignatura 66713 “*Técnicas de campo y resolución de casos en la planificación del medio natural*”, impartida durante el curso 2023/2024 en el máster de Ordenación Territorial y Medioambiental en la Universidad de Zaragoza, para una parte del desarrollo de este trabajo. Esta asignatura ha proporcionado conocimientos en el manejo de técnicas experimentales en el campo de la hidromorfología fluvial, así como elaborar tratamientos estadísticos y cartográficos de la información obtenida en el campo.

1.1 Justificación

Conforme a lo todo lo señalado anteriormente, se concluye en la necesidad de un estudio que analice y relacione la evolución hidromorfológica con la evolución de los usos del

suelo en un tramo concreto del río Ebro, entre Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro, por su relevancia en el riesgo hidrogeomorfológico. Es por ello, que surge este Trabajo Fin de Máster con la finalidad de establecer una relación entre los usos del suelo y su alteración en la dinámica fluvial.

1.2 Objetivos

En el presente Trabajo Fin de Máster se establece como objetivo general analizar la evolución y funcionamiento actual de un tramo dinámico y representativo del curso medio del río Ebro en un contexto de cambio ambiental.

Partiendo de este objetivo general, surgen los siguientes objetivos específicos:

1. Crear una cartografía detallada de los elementos biogeomorfológicos del cauce del río y los usos del suelo en el área estudiada desde 1927 hasta 2021.
2. Utilizar métodos y herramientas de medición para la caracterización morfológica de los sedimentos.
3. Emplear un sistema doppler que permita realizar cálculos de caudal y batimetrías sobre el cauce en crecidas.
4. Establecer la existencia o no de la posible relación entre los usos del suelo y su afección en la dinámica fluvial del área estudiada.

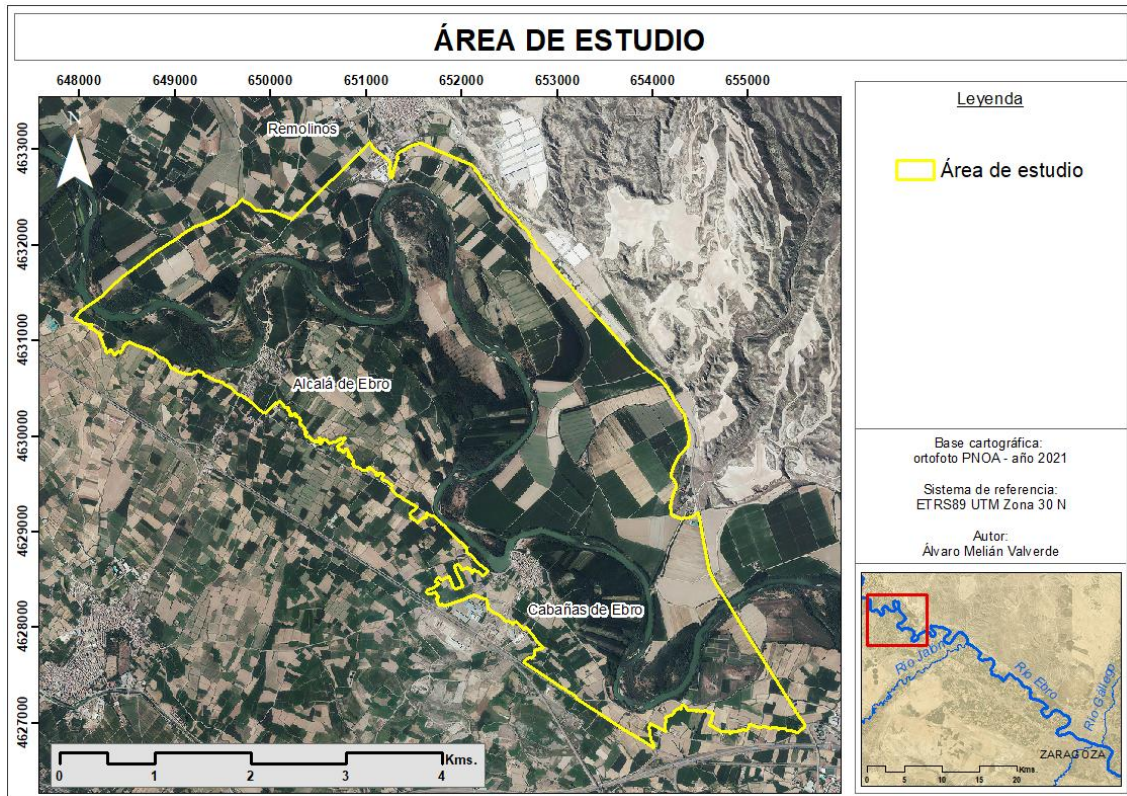
2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el tramo medio del río Ebro, que se prolonga desde Logroño hasta La Zaida con una longitud de 345 kilómetros, aproximadamente. Este tramo del Ebro se caracteriza por presentar un cauce meandriforme (Ollero, 1992) con un trazado de grandes curvas y meandros libres en su llanura de inundación; con una anchura de 3,2 kilómetros y de hasta 6 kilómetros en algunos tramos con un índice de sinuosidad medio de 1,505 y una pendiente media muy baja de 0,67 m/km (Sánchez Fabre et al, 2015). Desde el punto de vista hidrológico, el tramo medio del Ebro “está definido por un régimen pluvio-nival, con máximos en febrero y un estiaje estival bien marcado” (Sánchez Fabre et al, 2015), recibiendo las principales aportaciones de agua de los afluentes pirenaicos donde destacan las cuencas de los ríos Aragón, Arga, Segre y Cinca.

Para este trabajo se ha decidido conocer la dinámica fluvial y sus principales afecciones en el tramo comprendido entre las localidades de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro. Alcalá

de Ebro con 243 habitantes (INE, 2024) y Cabañas de Ebro con 481 habitantes (INE, 2024) pertenecen a la provincia de Zaragoza y se enmarcan dentro de la comarca de la Ribera Alta del Ebro. En cuanto a la longitud de río que se encuentra dentro del área de estudio, ésta es de unos 10 kilómetros aproximadamente, comenzando un poco más arriba de la localidad de Alcalá de Ebro hasta el puente de la carretera A-126 que pasa por encima de dicho río (Figura 1). La superficie total que comprende el área de estudio es de 1.966,92 hectáreas.

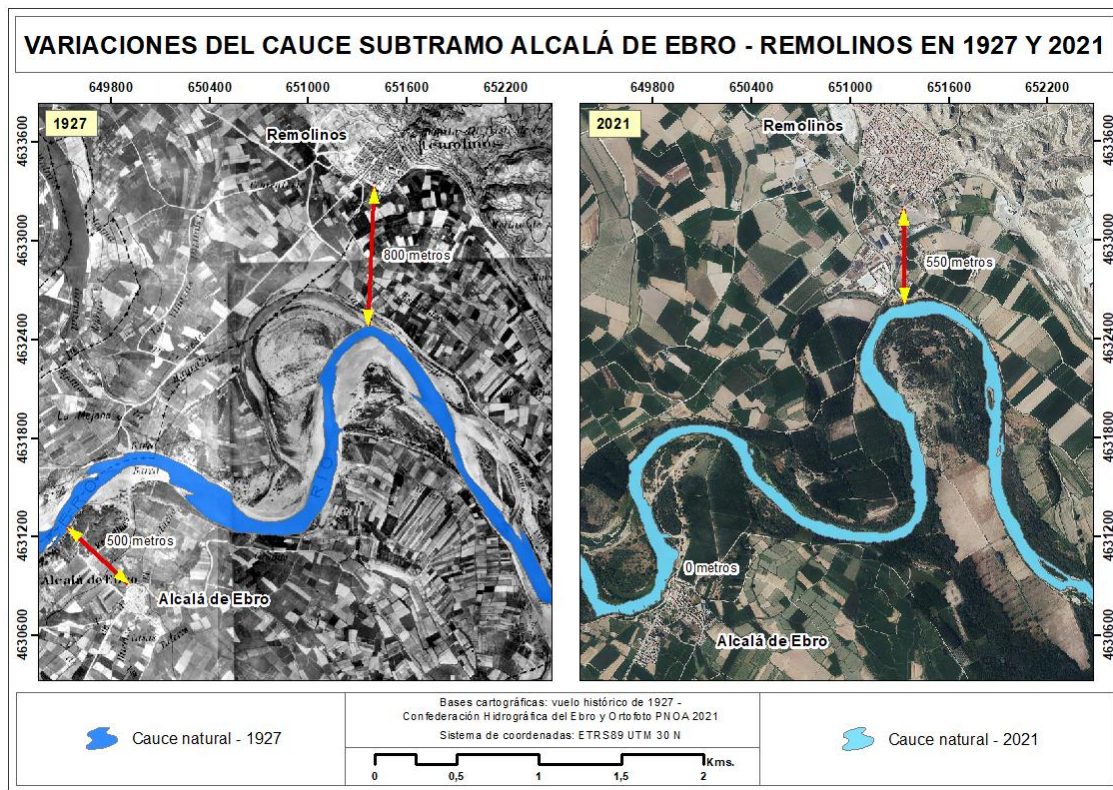
Figura 1. Localización del área de estudio



Este tramo de río se caracteriza por presentar una llanura de pendiente muy suave (0,67 ‰) y de gran sinuosidad, sobre todo entre las localidades de Alcalá de Ebro y Remolinos donde encontramos una continuidad de meandros de reducido tamaño, pero de “amplitudes bien desarrolladas y curvaturas correctamente diseñadas” (Ollero, 1996) debido a la pendiente. La llanura de inundación en este tramo se encuentra bien delimitada en su margen izquierda por los escarpes yesíferos pertenecientes a la era Cenozoica (antiguamente conocida como era Terciaria) que generan conos de deyección por desprendimientos y caídas de bloques a causa del diaclasado de los materiales de los escarpes (Gobierno de Aragón, 2023). Sin embargo, la llanura de inundación en la margen derecha resulta complicado establecer su delimitación debido a que los límites entre la terraza no inundable e inundable quedan desdibujados por la pendiente suave dominante en toda esta margen.

En cuanto a la morfología que describe el río Ebro en este tramo, ésta ha ido variando considerablemente en los últimos 100 años. A través de las imágenes aéreas más antiguas que se tienen del tramo, que es el vuelo histórico de 1927 de la Confederación Hidrográfica del Ebro, podemos observar las variaciones del cauce del río con la actualidad. Mediante la Figura 2 se observa la dinámica cambiante del cauce aproximándose tanto a Alcalá de Ebro como a Remolinos. En el caso de Alcalá de Ebro, el cauce del río se situaba a unos 500 metros de distancia. El proceso de cambio desde la situación de 1927 hasta la actualidad se originó a partir de la crecida de febrero de 1952 en la que se produjo el desplazamiento del cauce hasta su situación actual (Ollero, 1996). Esta migración del río provoca una erosión lateral muy importante sobre la orilla del pueblo de Alcalá de Ebro debido a que la corriente choca de manera frontal sobre su núcleo de población, dando lugar a un riesgo muy elevado tanto de inundación como por procesos de erosión lateral. Y, con respecto a Remolinos, también presenta una tendencia similar a la de Alcalá de Ebro, aunque algo menos acusada (Ebro Resilience, 2020b). Observando la Figura 2, desde 1927 hasta la actualidad el cauce del río se ha acercado al pueblo de Remolinos unos 300 metros, encontrándose hoy en día a tanto solo 550 metros.

Figura 2. Variaciones del cauce del Ebro en el subtramo Alcalá de Ebro y Remolinos en 1927 y 2021



Fuente: elaboración propia

Continuando aguas abajo, el río no presenta aspectos geomorfológicos relevantes y destacables hasta llegar a la localidad de Cabañas de Ebro. Ésta se encuentra en la parte final de un gran meandro donde se ha generado una curvatura a causa de la morfología urbana de Cabañas de Ebro sobre el cauce y por los diferentes elementos de protección ante inundaciones a lo largo de toda la margen derecha. Desde la década de los 60 hasta la década de los 90 del siglo pasado, aguas arriba del Cabañas de Ebro se realizaron diferentes obras de defensa que presentan una forma de embudo (Ebro Resilience, 2020a). Esto conlleva a una mayor velocidad de las aguas que chocan de manera frontal contra el casco urbano de Cabañas, aumentando los procesos de erosión sobre el lecho del cauce. Es por ello, que esos procesos erosivos se observan a través de estudios batimétricos realizado por Ebro Resilience en lo que se detecta una poza a causa de las defensas colocadas en los meandros con una profundidad de 15 metros junto al caso de Cabañas de Ebro (Ebro Resilience, 2020a).

Llegando al final del tramo, aguas debajo de Cabañas de Ebro, nos encontramos con el último meandro. En él se genera un fenómeno similar al descrito anteriormente. Una fuerte erosión lateral en la margen derecha del cauce que ha generado un escarpe de más de un metro que, en el corto plazo, puede poner en peligro a la carretera VP-24.

2.1 Proyecto Ebro Resilience y sus actuaciones en el área de estudio

El proyecto LIFE Ebro Resilience nace como una propuesta innovadora con la finalidad de hacer frente a los fenómenos de inundación que suceden en el tramo medio del río Ebro. Este proyecto se fija como objetivo “que la población y las actividades económicas convivan en un Ebro en buen estado de conservación sin que las inevitables crecidas produzcan daños importantes” (Ebro Resilience, s. f.). Este proyecto fue seleccionado en la convocatoria LIFE del año 2020 por la Comisión Europea, el cual comprende las comunidades autónomas de La Rioja, Navarra y Aragón. Tras haber sido seleccionado, el proyecto tiene una duración de 6 años para el periodo 2021-2027 con un presupuesto total de 13.310.350 euros con un 55 % de financiación europea.

Los antecedentes que llevaron a la creación de este proyecto fueron las recurrentes inundaciones en el tramo medio del Ebro, capaces de abarcar grandes extensiones de terreno por la escasa pendiente. Las actividades humanas en la llanura de inundación, como es la agricultura y los asentamientos urbanos a lo largo del río se encuentran claramente expuestos a las inundaciones. Desde principios de la década de los años 60 del siglo pasado, se destacan numerosas inundaciones como las de 1961, 1966, 1977, 1978, 1980, 1981, 1993, 2003, 2007, 2015 y, recientemente, en 2018. Del mismo modo, las inundaciones suponen un impacto social que se puede ver reflejado en el desalojo de poblaciones, el estrés que conlleva, la ruina que puede provocar en las explotaciones agrícolas y ganaderas, etc. Es por ello, que se hace necesario trazar actuaciones y medidas resilientes que logren reducir el riesgo de inundación, evitando provocar en todo momento una fuerte alteración del entorno fluvial y su biodiversidad asociada.

Con todo esto, el proyecto LIFE Ebro Resilience se sustenta sobre 5 claves para el desarrollo del mismo:

- **Cambio en la gestión de las inundaciones**

Con ello, se pretende establecer un nuevo modelo fluvial que esté basado en la adaptación a las inundaciones y la conservación de los ecosistemas asociados a entornos fluviales (Ebro Resilience, s. f.).

- **Implicación de la población como eje transversal**

Desde el proyecto se pone un especial énfasis en la participación social en todos los ámbitos como parte fundamental en la gestión de las inundaciones, permitiendo una mejora

en el conocimiento que logre alcanzar alternativas sostenibles desde un punto de vista ambiental, social y económico.

- **Coordinación administrativa y cooperación institucional**

En los tramos donde se han llevado a cabo actuaciones, instituciones como el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, la Confederación Hidrográfica del Ebro, los gobiernos autonómicos de la Rioja, Navarra y Aragón; y el Instituto Aragonés del Agua han sido partícipes dentro de este proyecto.

- **Apuesta decidida por la tecnología**

Para poder llevar a cabo el diseño de las acciones de mitigación y adaptación se han realizado modelos digitales del terreno con gran precisión, modelizaciones hidráulicas bidimensionales de última generación, simulaciones de eventos extremos...

- **Replicación de las soluciones propuesta para casos similares en otros ríos**

Muchas de las acciones planteadas para el río Ebro pueden servir de ejemplo para otras zonas de la cuenca del Ebro e incluso otras cuencas españolas y europeas, teniendo así un modelo de referencia tanto a nivel nacional como internacional.

Asimismo, los objetivos específicos fijados dentro de este proyecto son los siguientes:

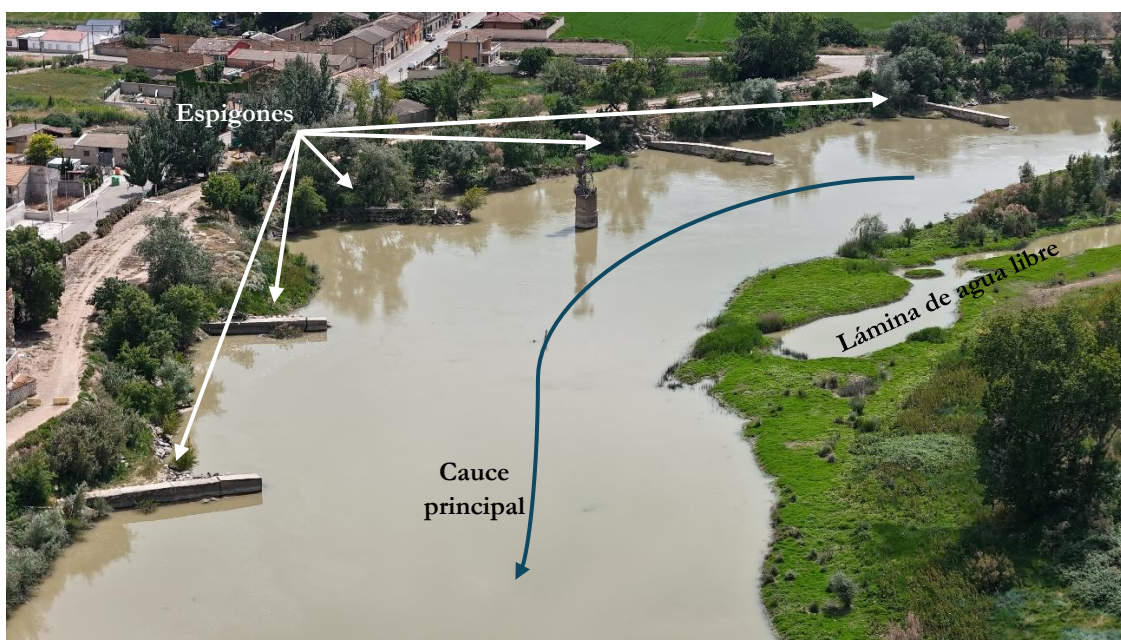
1. Mejorar un 60 % la resiliencia al peligro de inundación que se da en el territorio de intervención.
2. Recuperar un 14 % de las llanuras aluviales mediante la eliminación de 1,8 kilómetros de motas.
3. Mejorar el estado ecológico del río Ebro en las zonas de intervención.
4. Recuperar 20 hectáreas de bosque ribereño.
5. Promover la implicación de la población local en el proyecto.
6. Mejorar la biodiversidad nativa creando hábitats adecuados para tres especies amenazadas: *Margaritifera auricularia*, *Potomida littoralis* y *Mustela lutreola*.
7. Utilizar las acciones del proyecto como referencia para el comienzo de intervenciones similares en otras zonas del tramo medio del río Ebro.
8. Establecer una estrategia que se pueda replicar a nivel nacional y europeo en otras cuencas hidrográficas con problemas similares.

Con todo ello, en el tramo de estudio del presente trabajo se han realizado diferentes actuaciones en los entornos de las poblaciones de Alcalá de Ebro, Remolinos y Cabañas de Ebro.

- **Actuaciones en Alcalá de Ebro**

Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, la dinámica y evolución del río Ebro ha llevado el cauce del mismo hasta la localidad de Alcalá de Ebro. Su núcleo urbano se encuentra protegido por un dique de defensa y un total de cinco espigones colocados en la orilla derecha con la función de disipar la energía del agua, evitando así un acelerado proceso de erosión lateral (Imagen 1). El dique de defensa está a una cota de 223,3 m.s.n.m., mientras que las calles más cercanas al dique se encuentran a 221 m.s.n.m. (Ebro Resilience, 2020b), por lo que, en crecidas importantes del río pueden llegar a darse situaciones de afloramiento de agua por el ascenso del nivel freático.

Imagen 1. Espigones junto a la margen derecha del río en Alcalá de Ebro



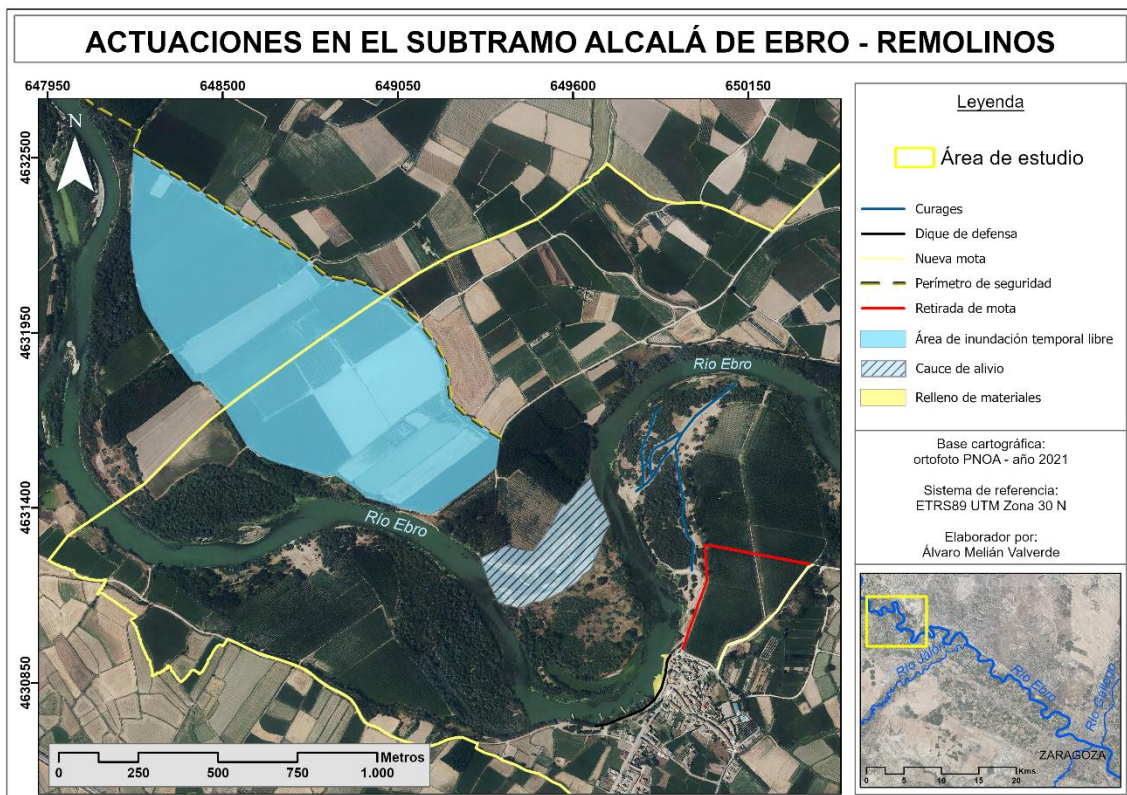
Fuente: Álvaro Melián Valverde (24/5/2024)

En 2015 sucedió una avenida de gran importancia y tras ella se realizaron algunas actuaciones como el refuerzo del dique de defensa. Asimismo, se retiró una mota que cercaba una zona de producción de chopos muy próxima al cauce, siendo retranqueada con el fin de que el río pueda ganar espacio en su llanura de inundación ante una crecida (Figura 3). Otra de las actuaciones fue la creación de un cauce de alivio (Imagen 2) en el meandro que se encuentra justo en frente de Alcalá de Ebro y que entra en funcionamiento durante las

crecidas con el objetivo de reducir la cantidad de agua que circula por el cauce natural. Cabe destacar que los materiales extraídos para la apertura del cauce de alivio sirvieron para reforzar la ribera en los espigones que presentaban un mayor deterioro (Figura 3) (Ebro Resilience, 2020b).

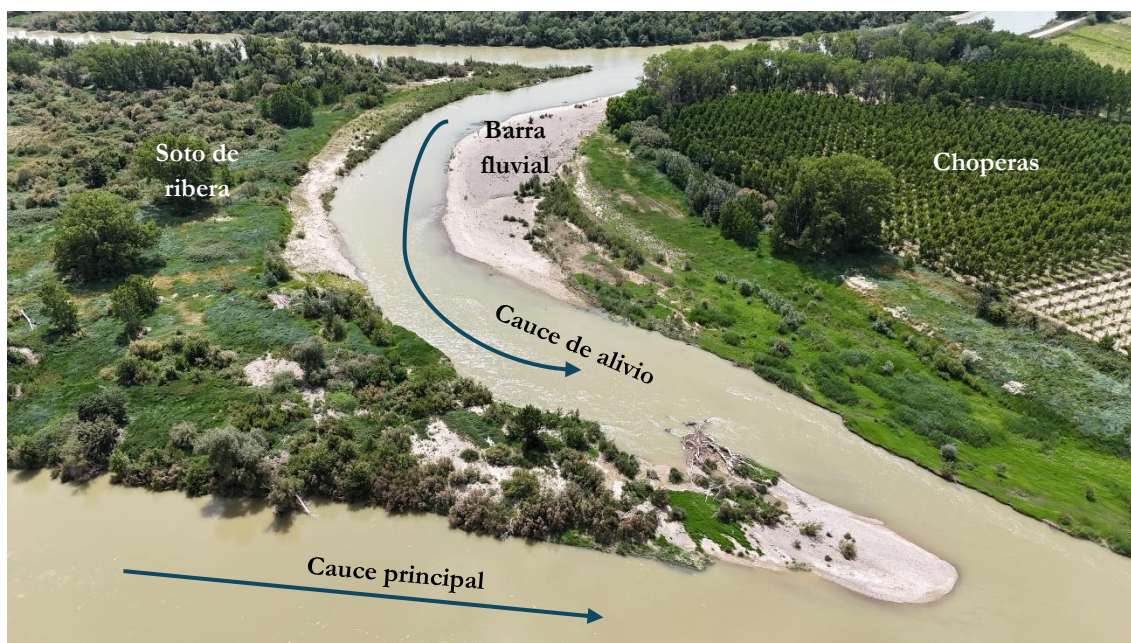
Por otro lado, en Alcalá de Ebro se han llevado a cabo trabajos para la creación de la técnica *curage*. El término *curage* proviene del idioma francés y se define como “la limpieza del barro o de la basura acumulada en un lugar hueco” (Cuartero et al, 2022). Desde la Confederación Hidrográfica del Ebro, este término se aplica a una técnica que consiste en abrir pasillos sobre zonas con sedimentos colonizados por la vegetación. En Alcalá de Ebro se crearon dos *curages* (Figura 3) con diferentes zonas de apertura y articulación con una superficie total de 2 hectáreas y longitud total de un kilómetro, aproximadamente (Cuartero et al, 2022).

Figura 3. Actuaciones del proyecto Ebro Resilience en el subtramo Alcalá de Ebro – Remolinos



Fuente: elaboración propia a partir de Ebro Resilience, 2020b

Imagen 2. Cauce de alivio en Alcalá de Ebro



Fuente: Álvaro Melián Valverde (24/5/2024)

Ya en 2017, se propuso un perímetro de seguridad en torno a la población de Alcalá de Ebro que consistió en delimitar las diferentes estructuras de defensa que lo protegen y generar unas garantías de seguridad a los equipos de emergencias, además de la instalación de hitos de control de niveles de las crecidas por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Por último, en el año 2018 se volvieron a reforzar las defensas de la margen derecha, se realizaron algunos trabajos para el mantenimiento del cauce de alivio y se trabajó en la nivelación de caminos en la parte noreste del casco urbano para “evitar cortar el posible retroceso de las aguas desbordadas” (Ebro Resilience, 2020b) hacía Alcalá de Ebro.

- **Actuaciones para la localidad de Remolinos**

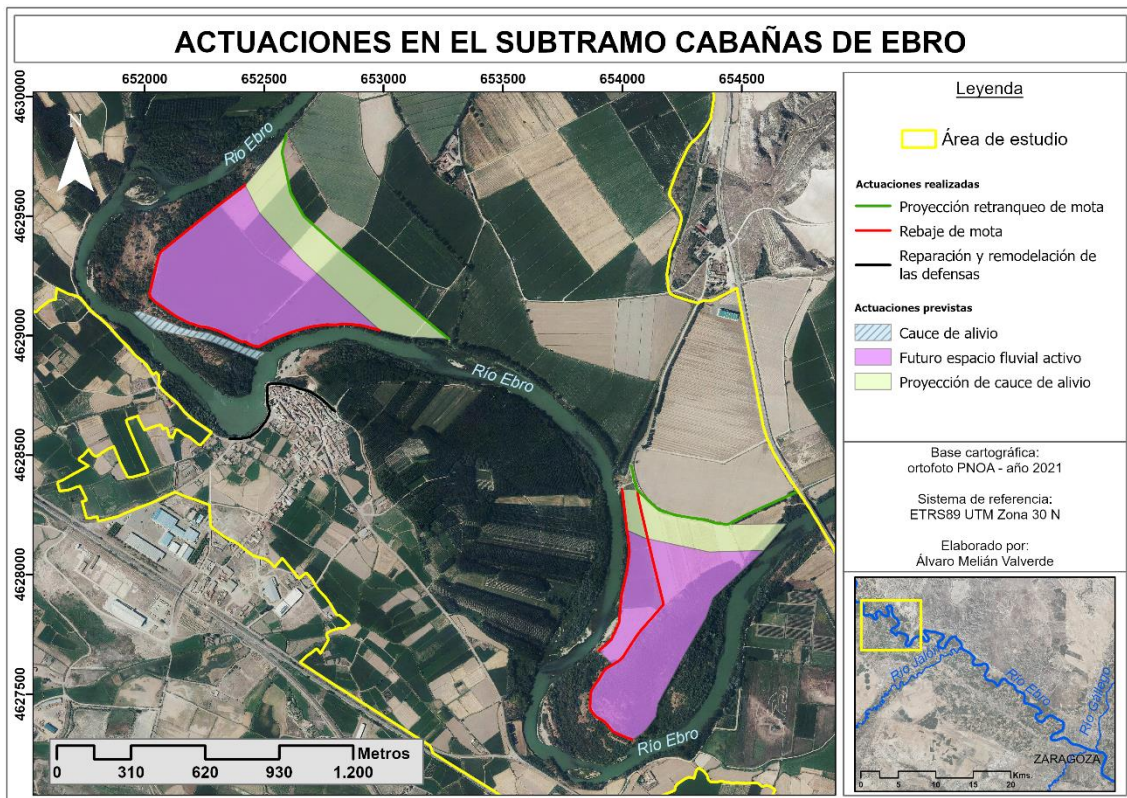
Aunque la localidad de Remolinos se encuentra fuera del área de estudio se han llevado a cabo algunas actuaciones dentro del mismo para la protección de su núcleo urbano. Aun estando a unos 500 metros del cauce del río, Remolinos se ve afectado por las inundaciones debido a los desbordamientos marginales que se producen aguas arriba. Para reducir el riesgo potencial por inundación que existe, después de la crecida de 2015 se diseñó un perímetro de seguridad (Figura 3) a través de la integración, refuerzo y nivelación de los diques de protección, así como los caminos ya existentes y de nueva construcción. Después de la avenida del año 2018 se realizaron labores de mantenimiento en este perímetro y se creó un

área de inundación temporal libre (Figura 3) con el objetivo de reducir el daño que provoca la inundación en las fincas que se encuentra dentro de él.

- **Actuaciones en Cabañas de Ebro**

Después de las importantes inundaciones de 2015, se reforzó el dique de defensa que protege al casco urbano de Cabañas, se rebajó la mota situada en el meandro aguas arriba del núcleo urbano (Figura 4) y se abrió un cauce de alivio (Imagen 3) que permita reducir la cantidad de agua que circula por el cauce principal a la altura de Cabañas.

Figura 4. Actuaciones del proyecto Ebro Resilience en el subtramo de Cabañas de Ebro



Fuente: elaboración propia a partir de Ebro Resilience, 2020a

Imagen 3. Cauce de alivio en Cabañas de Ebro



Fuente: Álvaro Melián Valverde (25/05/2024)

En 2017 se estableció el perímetro de seguridad en torno a la localidad de Cabañas de Ebro el cual comienza en el camino interior que conecta los núcleos de Cabañas y Alcalá hasta el último meandro que se encuentra dentro del área de estudio. Se instalaron varios hitos de control de avenidas a lo largo del perímetro, además de adecuar dicho perímetro para posibles intervenciones de los equipos de emergencias durante una crecida. Ya en 2018 y tras la crecida del río en ese año, se realizaron actuaciones para el refuerzo de los muros que se encuentran en la curva de salida del meandro, la cual choca directamente contra Cabañas de Ebro y labores de mantenimiento en el cauce de alivio.

Por otro lado, en el meandro ubicado en la parte final del área de estudio se han realizado pequeñas actuaciones sobre la orilla derecha al producirse el mismo proceso erosivo que en Cabañas de Ebro, explicado en el anterior apartado. Los diques de defensa presentan diferentes estados de conservación ya que no se ha actuado en su totalidad, lo que ha provocado un aumento de la erosión lateral poniendo en serio peligro la carretera VP-24 que se encuentra a escasos metros.

2.2 Proyecto SEDEXCHARE y su importancia en el área de estudio

El proyecto SEDEXCHARE (Sedimento, extremos hidrológicos, cambios histórico-ambientales y resiliencia fluvial: el río Ebro) es una iniciativa transdisciplinar que tiene como objetivo comprender la evolución y desafíos actuales del río Ebro mediante la colaboración

de diferentes equipos de investigación (Proyecto SEDEXCHARE, s. f.). La página web del Observatorio del río Ebro tiene como propósito servir de repositorio de investigaciones y crear un espacio donde descubrir de diálogo entre la sociedad y la ciencia. Asimismo, SEDEXCHARE se subdivide en tres proyectos:

- Subproyecto 1. Gestión de riesgos y de cambios ambientales en el Ebro medio: restauración fluvial y resiliencia territorial: su principal objetivo es el estudio de las crecidas del Ebro antes el riesgo que supone para las poblaciones y las actividades económicas con el fin de mitigar los efectos de las inundaciones sobre ellos.
- Subproyecto 2. Observatorio del sedimento del Ebro (OSE): impactos hidromorfológicos resultado de la actividad humana. Implicaciones para el riesgo de inundación y la gestión del sedimento: debido a la importancia de los sedimentos para la salud y geodiversidad del Ebro surge la necesidad de monitorear el transporte de sedimentos, su evaluación de los impactos antrópicos sobre los mismo y proponer mejoras de cara a su gestión y restauración.
- Subproyecto 3. Historia de un paisaje fluvial navegable: el río Ebro: cuyo objetivo es aportar una mirada histórica al proyecto SEDEXCHARE estudiando el Ebro como un elemento de movilidad a lo largo de los siglos.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el presente trabajo se basa en la utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), en especial fuentes de información como ortofotos digitales, imágenes aéreas antiguas y datos espaciales proporcionados por entidades públicas, así como la creación de entidades geográficas en formato *shapefile*. La secuencia metodológica utilizada ha sido: 1) Delimitación del área de estudio; 2) Creación de cartografía biogeomorfológica; 3) Actualización y creación de cartografía de usos del suelo; 4) Aplicación del sistema doppler ADCP en momento de crecida; 5) Trabajo de campo para el análisis morfométrico y granulométrico de los sedimentos.

Por último, cabe destacar la utilización del dron DJI Air 3 y DJI Mavic Mini durante algunos trabajos de campo para la toma de imágenes que ayuden a ejemplificar y visualizar algunos elementos y zonas del área de estudio que se explican durante este trabajo.

3.1 Delimitación del área de estudio

Delimitar el territorio que se pretende abordar supone un reto al tratarse de una llanura de inundación muy amplia, fundamentalmente, en la margen derecha del cauce. A esto habría que añadir los escasos elementos geográficos físicos que permitan una mejor delimitación. Es por ello, que los límites de este tramo fueron establecidos sobre el espacio inundable en el periodo de retorno de 10 años que proporciona el Sistema de Información Territorial del Ebro (SITEbro). Este sistema fue creado por la Confederación Hidrográfica del Ebro con el objetivo de “conseguir un portal interactivo con el público y las administraciones para ofrecer toda la información de la que se dispone del medio hídrico, pero, a la vez, abrir una línea de comunicación para mejorar y actualizar esa información con cualquier propuesta o servicio” (SITEbro, s. f.).

Desde el catálogo de descargas del geoportal SITEbro, se descargó la información en formato vectorial, concretamente en *shapefile*, del periodo de retorno para 10 años en toda la cuenca hidrográfica del Ebro. Una vez descargado, mediante el software SIG ArcGIS Pro se creó una nueva capa vectorial a partir de la capa del periodo de retorno, realizando ajustes de los límites mediante fotointerpretación con los elementos lineales del territorio (vías de comunicación, límites entre fincas, etc.).

3.2 Creación de la cartografía biogeomorfológica

Para la identificación y caracterización de los elementos biogeomorfológicos, se realizó una cartografía en los años 1927, 1956, 1999 y 2021 con la finalidad de obtener una radiografía evolutiva del cauce del río Ebro y los elementos que lo componen. Para este caso, el término de “biogeomorfolología” cobra importancia ya que éste se define como las relaciones existentes entre los procesos naturales que ocurren en la superficie terrestre y el relieve, en donde la vegetación cobra un papel fundamental por su capacidad de generar cambios complejos en dichos procesos naturales, creando nuevas formas en el relieve (Corenblit et al., 2011). De este modo, la elaboración de la cartografía biogeomorfológica consistió en la fotointerpretación de imágenes utilizando herramientas de digitalización mediante Sistemas de Información Geográfica.

En primer lugar, se realizó una descarga de las imágenes y fotoplanos necesarios para la fotointerpretación. Las imágenes del año 2021, 1999 y 1956 fueron obtenidas en la Infraestructura de Conocimiento Espacial de Aragón (ICE Aragón) como servicio WMS (Web Map Service). Y, las imágenes de 1927 se obtuvieron del Sistema de Información

Territorial de la Confederación Hidrográfica del Ebro (SITEbro) mediante fotoplanos en formato *tiff*. Una vez descargadas las imágenes y fotoplanos, el proceso de fotointerpretación y digitalización de los elementos biogeomorfológicos se realiza a una escala de detalle de 1:5.000, con el objetivo de generar una cartografía precisa. En el caso particular de la caracterización de barras e islas fluviales, se establece una jerarquía cualitativa en función de la cobertura vegetal que se encuentra sobre ella, a partir de la clasificación utilizada por Najes et al. (2019). En este trabajo se ha basado en el porcentaje de cobertura vegetal, en donde las barras e islas colonizadas representan más de un 80% de cobertura que impide visualizar el sedimento que lo componen; las barras e islas poco colonizadas se estiman entre un 80% y un 40%; las barras e islas muy poco colonizadas con menos de un 40% de cobertura vegetal; y las barras e islas sin vegetación son aquellas que no presentan ningún tipo de colonización vegetal.

3.2.1 Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)

El IDBF se define como una métrica que “mide la cantidad de barras en un tramo dividiendo la superficie total de las barras por la longitud del cauce en el tramo a diagnosticar” (Pirchi, 2023). Este índice fue creado en el Trabajo Fin de Máster de Valeria Noemí Pirchi con el fin de realizar una comparación de la movilidad y la disponibilidad de sedimento en el curso bajo del río Gállego (municipio de Zuera). De esta manera, el IDBF será utilizado en el presente trabajo con el objeto de analizar la concentración y disposición de las barras fluviales en el área de estudio.

La ecuación utilizada para el cálculo del índice de densidad de barras fluviales es la siguiente a partir de Pirchi (2023):

$$IDBF = db / Lc$$



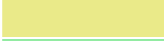


En donde, *IDBF* es la ratio del índice de densidad de barras fluviales; *db*, hace referencia a la superficie total de la barra; y, *Lc*, a la longitud del cauce activo en el tramo que se encuentra dentro del área de estudio.

En el presente trabajo las barras se han clasificado a partir de las categorías de barras fluviales establecidas en la cartografía biogeomorfológica de los años de estudio, definida en apartados anteriores. Las categorías utilizadas para el IDBF son cuatro: barras colonizadas, barras poco colonizadas, barras muy poco colonizadas y barras sin vegetación. Mediante el sistema de información geográfica ArcGIS Pro, se realiza una selección por atributos de las barras fluviales categorizadas en las capas utilizadas para la cartografía biogeomorfológica,

exportando las entidades seleccionadas y creando nuevas capas *shapefile* para el cálculo del IDBF y su posterior representación cartográfica. Los resultados obtenidos “se expresan en superficie de barras por metro de longitud de tramo de río” (Pirchi, 2023).

Por último, para la representación cartográfica de los resultados se utilizan los valores y códigos de color propuestos en el trabajo de Pirchi (2023) (Tabla 1), en donde la densidad de barras se expresa de forma cualitativa mediante una escala de colores oscuros y fríos para representar una mayor densidad, mientras que utiliza colores más cálidos para representar una menor densidad de las barras. Cabe destacar que los mapas realizados en los años 2021 y 1999 han tenido que ser divididos en otros dos mapas debido a que los datos no son visibles con suficiente claridad a escala de área de estudio, pero sí a escala de subtramo.

Tabla 1. Valoración cualitativa y cuantitativa del IDBF

Valoración cualitativa		Valoración cuantitativa
Densidad	Código RGB	
Muy baja	 240-123-110	Muy baja: 0 a 5 m ² /m
Baja	 240-187-123	Baja: 5,1 a 10 m ² /m
Media	 234-234-137	Media: 10,1 a 20 m ² /m
Alta	 146-235-162	Alta: 20,1 a 30 m ² /m
Muy alta	 147-188-235	Muy alta: 30,1 m ² /m

Fuente: elaboración propia a partir de Pirchi (2023)

3.3 Actualización y creación de cartografía de usos del suelo

Para el presente trabajo, también se ha decidido estudiar la evolución de los usos del suelo dentro del área de estudio con la finalidad de conocer y establecer los cambios de uso que se han producido desde 1927 hasta la actualidad. De esta manera, podremos conocer los cambios de superficie y la introducción de nuevos usos ya sean de carácter abiótico, biótico o antrópico, fundamentalmente. Es por ello, que el proceso de caracterización e identificación de los usos del suelo ha tenido diferentes fases para finalizar en una cartografía de los años 1927, 1956, 1999 y 2021.

Primeramente, se utilizan las mismas imágenes y fotoplanos descritas en el apartado anterior como base cartográfica. En segundo lugar, se decide utilizar la cartografía desarrollada por el Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE) que tiene como objetivo “generar una base de datos de ocupación del suelo para toda España a escala de referencia 1:25.000, integrando la información disponible de las Comunidades

Autónomas y la Administración General del Estado” (Instituto Geográfico Nacional, s. f.). Los datos que proporciona el SIOSE han sido descargados desde el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional que ofrece los datos en formato vectorial (*shapefile*). Cabe destacar que los datos descargados de máxima actualidad pertenecen al año 2017 con la particularidad de tener una mayor escala de detalle (entre 1:1.000 y 1:5.000) con respecto a años anteriores. Es así como, teniendo la base de referencia del SIOSE de Alta Resolución, se procede a una actualización de la misma a través de fotointerpretación para el año 2021 corrigiendo errores y digitalizando nuevos usos a una escala de detalle de 1:5.000.

Para el resto de los años, se descarta el uso de cartografía vectorial de referencia ya que la primera información aportada por el SIOSE se remonta al año 2004, descartándose también el uso de la información aportada por el proyecto europeo CORINE Land Cover debido, principalmente, a su escala (1:100.000). Por todo ello, se fotointerpretan todos los usos del suelo de 1999, 1956 y 1927 utilizando la misma escala y nomenclatura o similar que para el año 2021. Dentro de esta segunda fase, se integra también la cartografía biogeomorfológica simplificando la jerarquía cualitativa establecida para las barras e islas fluviales.

En la tercera y última fase, se establece la nomenclatura para cada uso del suelo a partir de la propia clasificación del SIOSE, quedando de la siguiente manera:

- Áreas naturales terrestres: áreas que se encuentran en estado natural y que no presentan ningún uso antrópico, alejadas del cauce principal del río.
- Producción maderera de chopos: áreas destinadas, exclusivamente, al cultivo de chopo (*Populus* sp.).
- Infraestructuras agrícolas y de almacenamiento: viviendas agrícolas, infraestructuras ganaderas para el alojamiento de animales e infraestructuras de almacenamiento y transformación de materias primas agrícolas y ganaderas.
- Zonas residenciales: aquellas zonas que presentan núcleos de población consolidados y continuos.
- Depuradora: infraestructuras e instalaciones destinadas al tratamiento de las aguas residuales.
- Tierras de cultivo: áreas parceladas destinadas a labores de aprovechamiento agrícola.
- Invernadero agrícola: infraestructura destinada al cultivo herbáceo bajo plástico.

- Áreas sin uso: todas aquellas áreas que no se incluyen en ninguna otra categoría al no presentar superficies cementadas, no tener vegetación y/o no tener un uso claramente definido.

Por último, para establecer la simbología se utilizaron los códigos de color RGB usados por CORINE Land Cover debido a su simplificación. Asimismo, los elementos biogeomorfológicos integrados como parte de la cartografía de usos del suelo mantienen la simbología ya establecida para ellos.

3.4 Aplicación de sistema doppler ADCP

El Sistema Perfilador Acústico Doppler (ADCP) “está diseñado para medir el caudal de un río, así como la velocidad de sus corrientes de agua en tres dimensiones” (Cruz Palacios, 2017). Este sistema emite una serie de pulsos de ultrasonido que son reflejados sobre las partículas suspendidas en el agua, así como burbujas de aire o sedimentos. De esta manera, se obtiene la dirección del agua y su velocidad en diferentes profundidades, pudiéndose determinar el caudal.

En este trabajo, el ADCP fue utilizado durante la crecida ordinaria de finales de febrero de 2024 en el meandro localizado justo en frente del pueblo de Alcalá de Ebro con la finalidad de conocer el caudal de agua que pasaba por el cauce principal y por el cauce de alivio de corta el meandro, así como en los *curages* que se encuentran justo enfrente de la salida del cauce de alivio. Para ello, se instaló el sistema ADCP en la parte trasera de una piragua junto a un receptor GPS RTK multifrecuencia (Imagen 4) que aportase una precisión centimétrica de los datos obtenidos en campo. Todo ello, gracias a la ayuda de Ebro Nautas, empresa de ecoturismo fluvial que colabora con el proyecto SEDEXCHARE para el uso y toma de datos con el ADCP.

Imagen 4. Sistema ADCP y receptor GPS RTK en la parte trasera de la piragua



Fuente: Álvaro Melián Valverde (1/3/2024)

Con el sistema ADCP y el receptor GPS RTK instalados, se realizaron multitud de transectos de orilla a orilla y a contracorriente en el cauce principal y en todo el cauce de alivio, así como en sus bifurcaciones con el cauce principal y en los curages (Imagen 5). Posteriormente, los datos fueron tratados con el software “RiverSurveyor Live” por parte de Ebro Nautas, obteniéndose así el caudal, la velocidad y dirección del agua en los transectos de mayor relevancia.

Imagen 5. Momento de toma de datos con la piragua en el cauce principal antes de la bifurcación con el cauce de alivio



Fuente: Álvaro Melián Valverde (1/3/2024)

3.5 Trabajo de campo para la caracterización granulométrica y morfométrica de los sedimentos

El 3 de mayo de 2024 se realiza trabajo de campo con la finalidad de recoger muestras tanto superficiales como subsuperficiales de sedimentos en dos barras del área de estudio. La primera barra se localiza en la margen izquierda del cauce de alivio en frente del pueblo de Alcalá de Ebro y la segunda en la margen derecha del río, justo enfrente de la salida del cauce de alivio localizado en el pueblo de Cabañas de Ebro.

- Granulometría

Para el análisis del tamaño de los sedimentos, se realizó un transecto longitudinal de 20 metros (Imagen 6 y 7) en donde cada 20 centímetros se tomaba una muestra aleatoria del sedimento y se medía su anchura con un calibrador digital. Asimismo, se recogieron muestras de las 5 piedras superficiales más grandes que se encontraran en la zona cercana al transecto para su posterior medición en laboratorio.

Imagen 6. Toma de muestras en barra fluvial cercana a Alcalá de Ebro



Fuente: Valeria Pirchi (3/5/2024)

Imagen 7. Toma de muestras en barra fluvial cercana a Cabañas de Ebro



Fuente: Valeria Pirchi (3/5/2024)

Por otro lado, se recogieron muestras de la coraza (Imagen 8) y subcoraza (Imagen 9) dentro del muestro longitudinal. Para ello, se utilizó un cuadrante de 80 cm² (40 cm x 40 cm) para ser medidas y pesadas en laboratorio y analizar el índice de acorazamiento de las barras muestreadas. Dentro de los cuadrantes se recogieron muestras de los sedimentos superficiales (coraza) y de los sedimentos subsuperficiales (subcoraza) separados en bolsas distinguidas.

Imagen 8. Coraza y subcoraza de la barra fluvial cercana a Alcalá de Ebro

Coraza



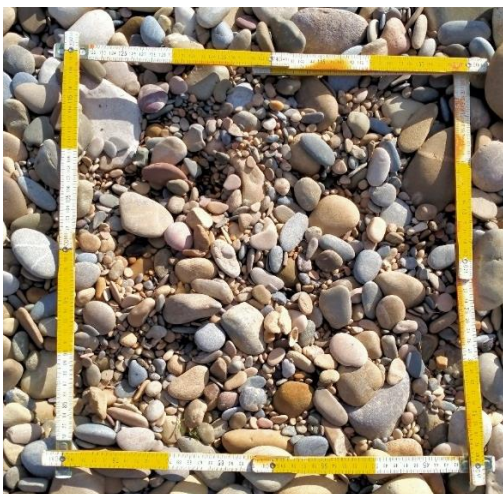
Subcoraza



Fuente: Álvaro Melián Valverde (3/5/2024)

Imagen 9. Coraza y subcoraza de la barra fluvial cercana a Alcalá de Ebro

Coraza



Subcoraza



Fuente: Álvaro Melián Valverde (3/5/2024)

El cálculo del índice de acorazamiento se realizó mediante el cociente entre el tamaño medio de la coraza y el tamaño medio de la subcoraza. Gracias al índice de acorazamiento

podemos obtener información en cuanto al grado de estabilización de las barras fluviales en los márgenes del río.

- Morfometría

Una vez realizado el trabajo de campo, en laboratorio se procede a la medición, pesaje y tamización de las muestras recogidas en ambas barras. En primer lugar, que escogen 20 muestras, previamente recogidas en campo, para la medición de su lado mayor (L), lado menor (l), espesor (E) y radio (R) mediante un calibrador digital. Con estas mediciones podremos calcular los índices morfométricos de aplanamiento, desgaste y esfericidad para poder realizar comparaciones y extraer conclusiones de los resultados obtenidos. Las

fórmulas utilizadas para el cálculo de estos índices son las siguientes: $\frac{2 \cdot R}{L}$, para el índice de desgaste; $\frac{L+1}{2 \cdot E}$, para el índice de aplanamiento; y, $\left(\frac{L \cdot E}{L^2}\right)^{0,33}$, para el índice de esfericidad

Y, en segundo lugar, se miden las muestras de las corazas y subcorazas de ambas barras, se tamizan con un tamizador manual para separar gravas, cantos, arenas y materiales muy finos para su posterior pesaje. De esta manera, podremos conocer el grado de acorazamiento de las barras medidas y obtener conclusiones de los resultados obtenidos.

4. RESULTADOS

4.1 Creación de cartografía biogeomorfológica

Los elementos biogeomorfológicos cartografiados han ido variando tanto en extensión como apareciendo o desapareciendo a lo largo de los años, lo cual es propio de la dinámica fluvial del río. A continuación, se exponen los mapas creados junto a una breve explicación de la distribución de los elementos biogeomorfológicos. Cabe destacar que la cartografía de 2021 se ha dividido en dos mapas para una mejor visualización de las variables geográficas, debido a que la cartografía de dicho año presenta un mayor número de elementos y que a escala de área de estudio no serían visibles. A continuación, se muestra la cartografía creada y la comparación de los resultados en los años de estudio.

Figura 5. Mapa biogeomorfológico de 1927

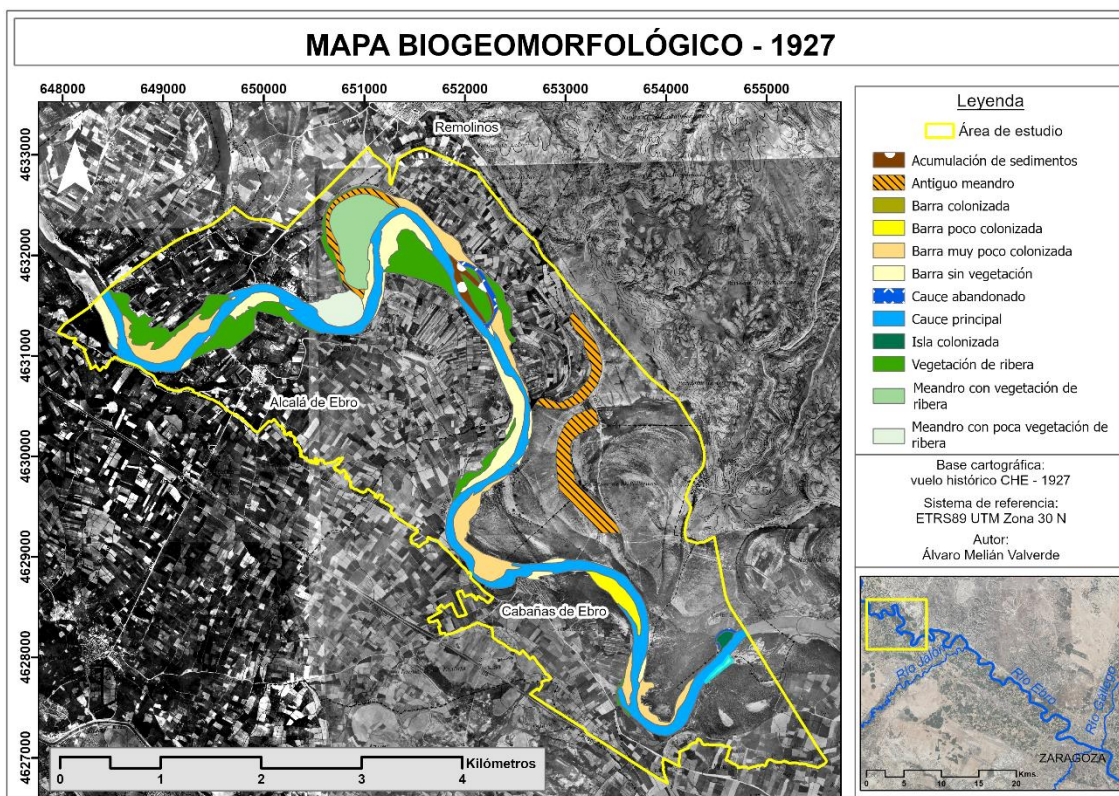


Tabla 2. Elementos biogeomorfológicos de 1927

Superficie de los elementos biogeomorfológicos - 1927		
Tipo de morfología	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Cauce principal	126,81	29,58
Vegetación de ribera	77,63	18,11
Barra sin vegetación	48,77	11,37
Antiguo meandro	48,16	11,23
Barra muy poco colonizada	40,86	9,53
Meandro con vegetación de ribera	33,56	7,83
Barra poco colonizada	17,77	4,14
Meandro con poca vegetación de ribera	13,14	3,07
Barra colonizada	8,64	2,02
Acumulación de sedimentos	7,16	1,67
Cauce abandonado	4,39	1,02
Isla colonizada	1,87	0,44

Fuente: elaboración propia

Con respecto a los elementos biogeomorfológicos de 1927 (Tabla 2), el cauce principal ocupaba una superficie de 126,81 hectáreas, lo que representa un 29,58 %. La vegetación de ribera presenta una extensión de 77,63 hectáreas, aunque podría aumentar su superficie si no

fuera por la introducción de dos nuevas tipologías como son “meandro con vegetación de ribera” y “meandro con poca vegetación de ribera”. La decisión de añadir estas tipologías se debe a que es muy probable que, años atrás, estos elementos hubiesen sido barras fluviales formadas por el antiguo meandro que los corta en 1927; y en que ese año forman meandros estabilizados tanto por el sedimento como por la vegetación.

Por un lado, sobre las barras e islas fluviales, destacan las barras sin vegetación que predominan junto a las barras muy poco colonizadas, no solo por superficie sino por la longitud que alcanzan algunas de ellas. Y, en cuanto a las islas, solo encontramos una isla colonizada de considerable extensión. Por otro lado, también hay que resaltar tres antiguos meandros formados antes de 1927, uno de los cuales recibiría aportes de agua en crecidas o por ascensos del nivel freático debido a su cercanía al cauce principal (antiguo meandro cerca del núcleo de Remolinos), así como cauces abandonados como nueva tipología para la cartografía biogeomorfológica de 1927. Estos cauces abandonados no son más que antiguas y pequeñas secciones transversales del cauce que no pueden ser incluidas en la tipología de “cauce principal” debido a la considerable reducción de caudal sobre ellos y al cierto aislamiento que presentan, aunque sigan recibiendo aporte de agua.

Figura 6. Mapa biogeomorfológico de 1956

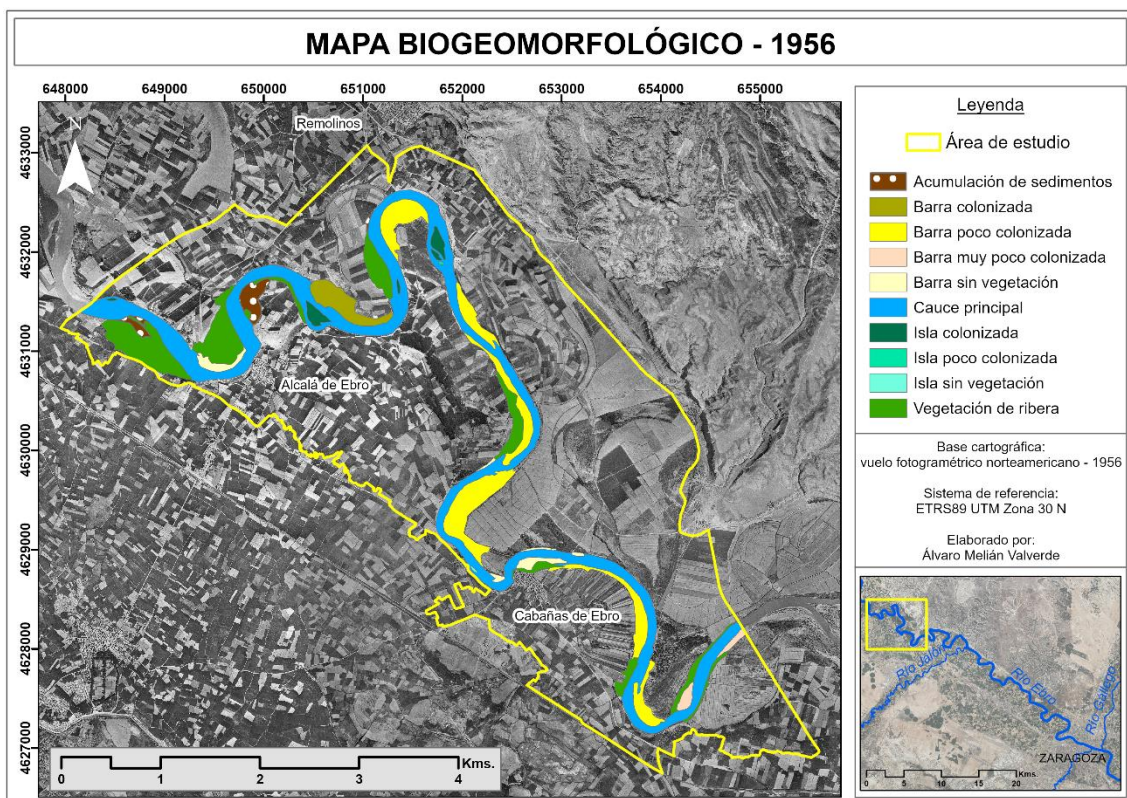


Tabla 3. Elementos biogeomorfológicos de 1956

Superficie de los elementos biogeomorfológicos - 1956		
Tipo de morfología	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Cauce principal	172,75	46,56
Vegetación de ribera	82,73	22,30
Barra poco colonizada	68,70	18,52
Barra colonizada	14,23	3,84
Acumulación de sedimentos	11,43	3,08
Barra sin vegetación	9,49	2,56
Isla colonizada	6,84	1,84
Barra muy poco colonizada	4,49	1,21
Isla sin vegetación	0,17	0,05
Isla poco colonizada	0,15	0,04

Fuente: elaboración propia

En 1956, el elemento con mayor extensión sería el cauce principal con una extensión de 172,75 hectáreas, lo que representa un 46,56%; seguido de la vegetación de ribera con una superficie de 82,73 hectáreas. Sobre la vegetación de ribera destaca un detrimento de la misma en el subtramo de Cabañas de Ebro, donde las barras poco colonizadas cobran una mayor relevancia en cuanto a superficie, ocupando 68,70 hectáreas. Es en 1956 cuando se observa una mayor variedad en las tipologías de las morfologías de barras e islas fluviales. También se añade en este año una nueva tipología como es la acumulación de sedimentos, que son grandes zonas de depósito de sedimentos que no se consideran barras fluviales por su extensión y morfología en el cauce del río.

Figura 7. Mapa biogeomorfológico de 1999

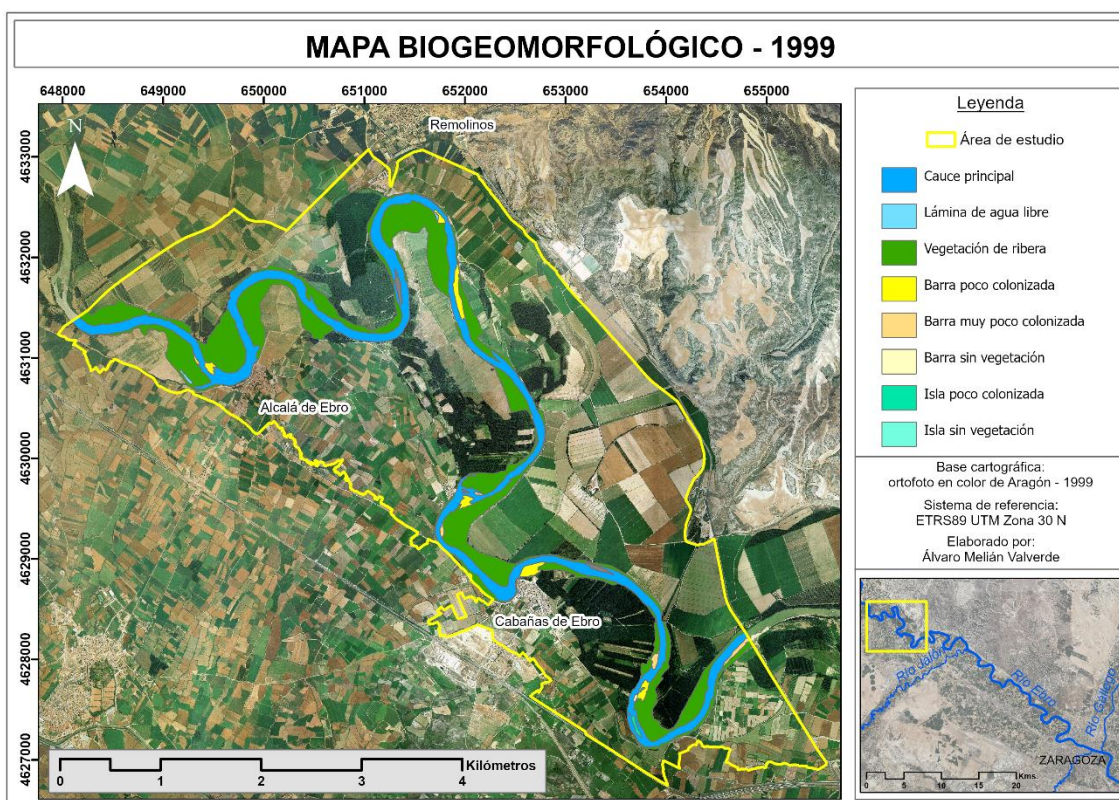


Tabla 4. Elementos biogeomorfológicos 1999

Superficie de los elementos biogeomorfológicos - 1999		
Tipo de morfología	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Vegetación de ribera	198,79	58,16
Cauce principal	129,82	37,98
Barra poco colonizada	8,79	2,57
Barra muy poco colonizada	2,64	0,77
Isla poco colonizada	0,69	0,20
Lámina de agua libre	0,59	0,17
Barra sin vegetación	0,44	0,13
Isla sin vegetación	0,03	0,01

Fuente: elaboración propia

El elemento biogeomorfológico de mayor superficie en 1999 lo ocupaba la vegetación de ribera, con 198,79 hectáreas, lo que representa un 58,16%. Le sigue el cauce principal del río con una superficie de 129,82 hectáreas, es decir, un 37,98%. Sobre la presencia de barras e islas fluviales, en cuanto a las barras, existe una predominancia de las barras poco colonizadas con una extensión de 8,79 hectáreas; y en cuanto a las islas, su superficie en conjunto es mucho más reducida, no llegando a la hectárea de extensión.

Figura 8. Mapa biogeomorfológico de 2021 – subtramo Alcalá de Ebro / Remolinos

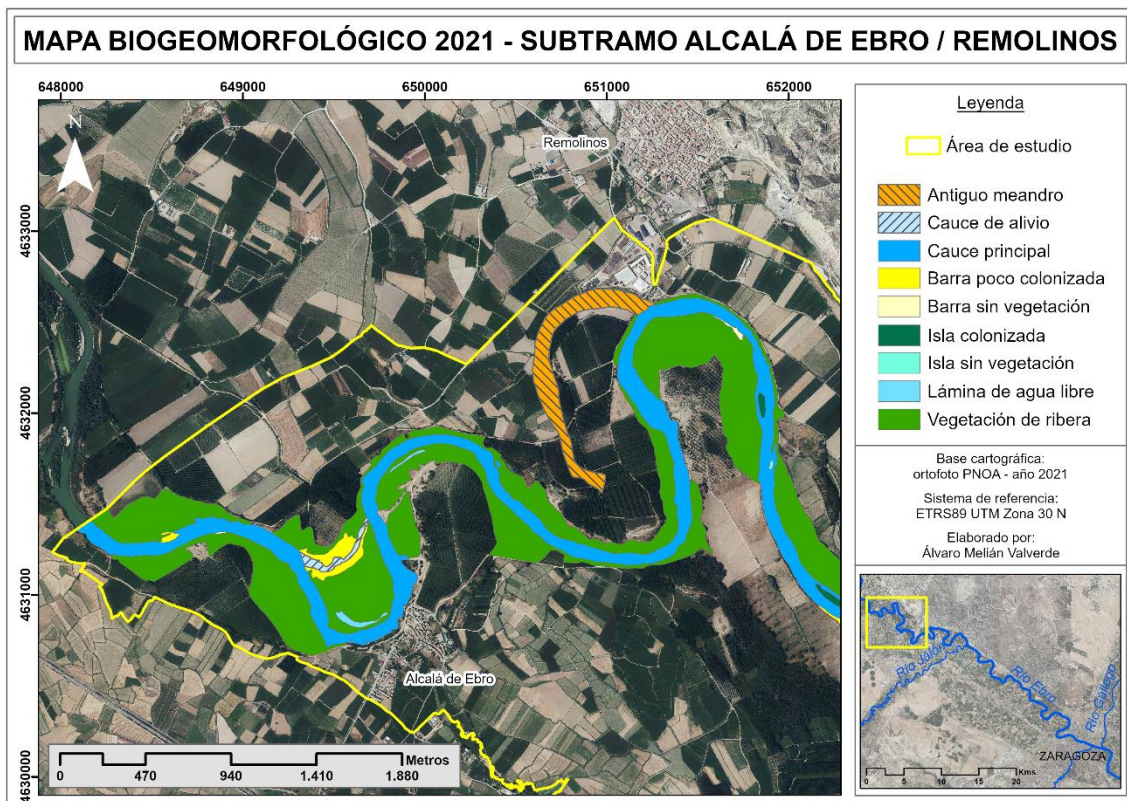


Figura 9. Mapa biogeomorfológico de 2021 – subtramo Cabañas de Ebro

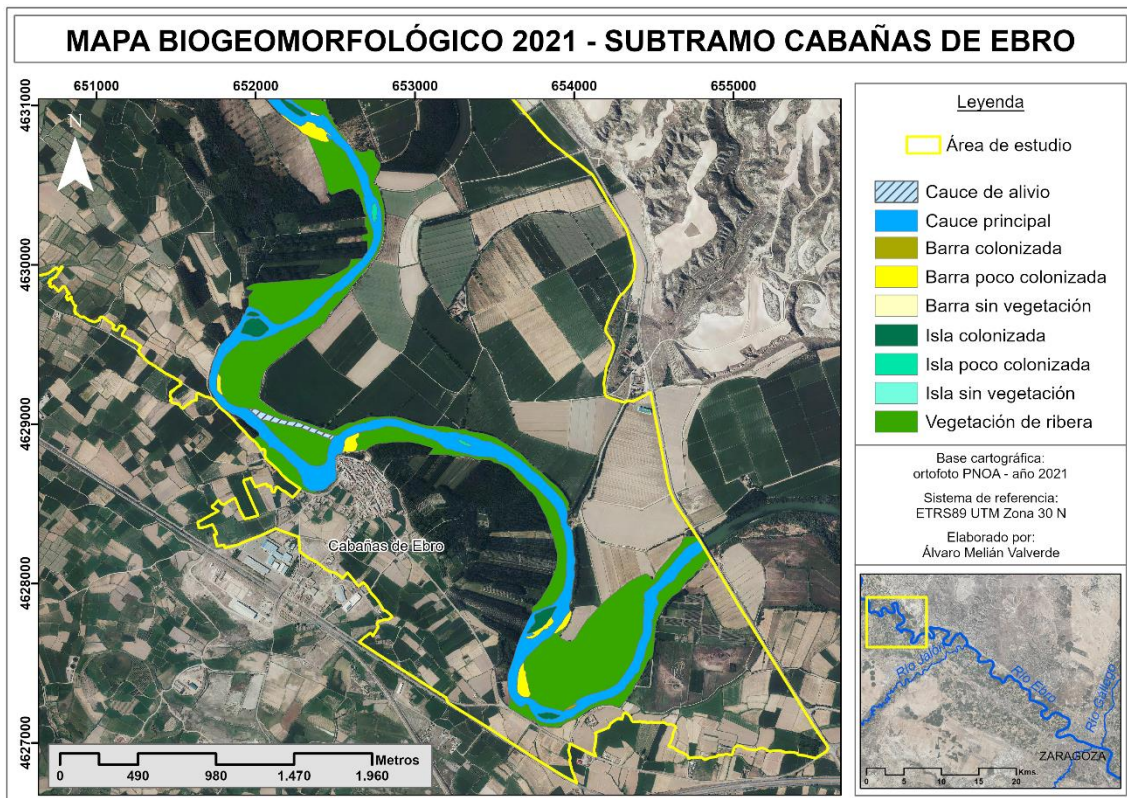


Tabla 5. Elementos biogeomorfológicos – 2021

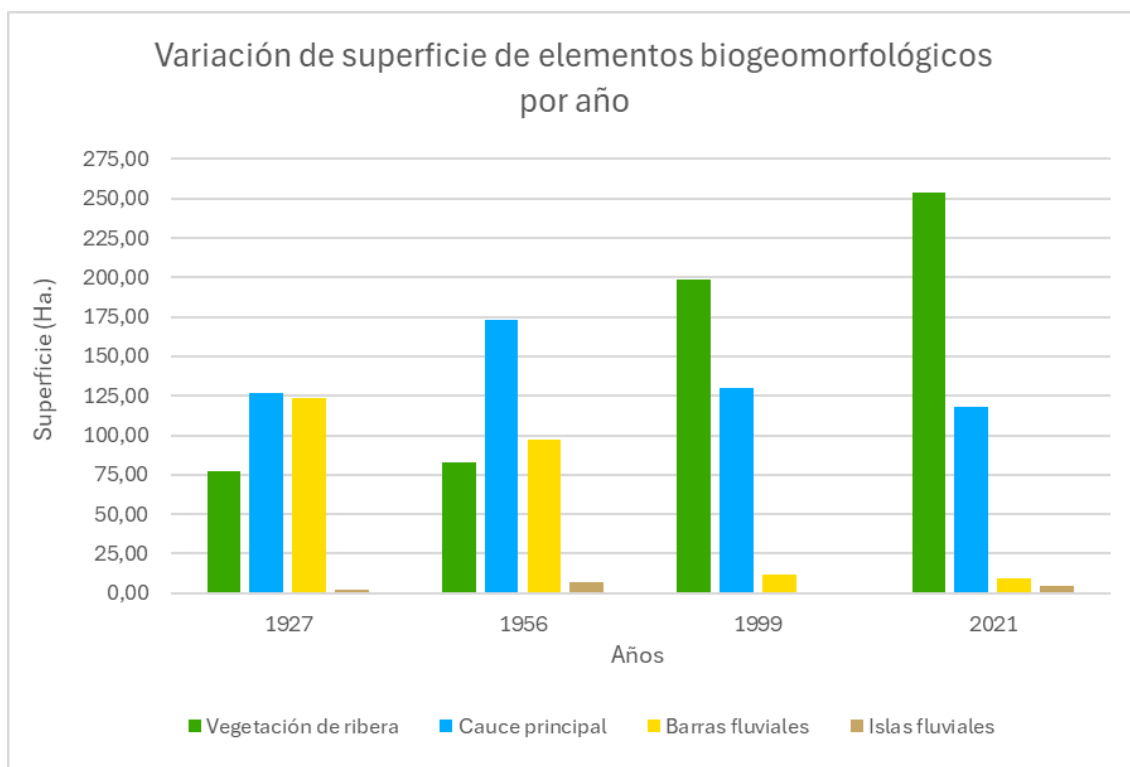
Superficie de los elementos biogeomorfológicos - 2021		
Tipo de morfología	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Vegetación de ribera	253,66	62,86
Cauce principal	118,05	29,25
Antiguo meandro	13,34	3,31
Barra poco colonizada	8,62	2,14
Isla colonizada	4,35	1,08
Cauce de alivio	3,45	0,86
Lámina de agua libre	1,01	0,25
Isla poco colonizada	0,47	0,12
Barra sin vegetación	0,40	0,10
Barra colonizada	0,10	0,03
Isla sin vegetación	0,09	0,02

Fuente: elaboración propia

En cuanto a los elementos biogeomorfológicos en 2021, la vegetación de ribera ocupa una gran superficie a lo largo de todo el tramo de río, con 253,66 hectáreas, lo que representa un 62,86% del espacio no antrópico. En el subtramo de Alcalá de Ebro – Remolinos se observa como la vegetación de ribera ocupa una mayor superficie en ambos márgenes en comparación al subtramo Cabañas de Ebro. El cauce principal es el segundo elemento de mayor superficie, con 118,05 hectáreas, lo que representa un 29,25%. Asimismo, se ha podido cartografiar un antiguo meandro que se localiza muy cerca del pueblo de Remolinos y que ocupa una superficie de 13,34 hectáreas. Con respecto a las barras e islas fluviales, la tipología de barras más dominante son las barras poco colonizadas por la vegetación con una extensión de 8,62 hectáreas, es decir, un 2,14%; y la tipología de isla más común son las islas colonizadas en su totalidad por la vegetación con una superficie de 4,35 hectáreas.

Asimismo, resulta interesante la comparación de los resultados de superficie de algunos elementos biogeomorfológicos cartografiados. En este caso, se han escogido cuatro tipologías (Figura 10) por su relevancia a la hora de conocer los cambios en la dinámica fluvial del Ebro y por presentar importantes cambios en el periodo de estudio.

Figura 10. Variación de superficie de elementos biogeomorfológicos por año



Fuente: elaboración propia

Primeramente, la vegetación de ribera vio aumentada su superficie desde 1927, siendo a partir de 1956 cuando se duplicó, llegando en 2021 a su máxima extensión. Esto también está relacionado con las variaciones de superficie del cauce principal del río, ya que en el periodo de 1927-1956 se observa una mayor ocupación del llano de inundación y un cauce más ancho en comparación con la actualidad. Es en el periodo 1999-2021 donde se producen cambios significativos en la superficie que ocupa el cauce, reduciéndose en 55 hectáreas, aproximadamente, y dejando paso a la colonización de las riberas del río.

Por otro lado, se observa una drástica reducción de la superficie que ocupaban las barras fluviales en el área de estudio. Es en el periodo 1999-2021 donde la dinámica sedimentaria se ve afectada debido a menores aportes que generan alteraciones en la propia dinámica natural, permitiendo que la vegetación de ribera ocupe un espacio que sería propio del cauce (Ollero Ojeda et al, 2015).

4.1.1 Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)

Las barras fluviales son elementos geomorfológicos formados por el río a partir de la deposición de sedimentos en los márgenes de su cauce, desvelando no solo su dinámica sino el estado de salud en el que se encuentra el río. A través del IDBF podemos conocer cuál ha sido la evolución y dinámica de los sedimentos de barras desde 1927 hasta la actualidad con las ortofotos más recientes.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del índice de densidad de barras fluviales (Tabla 6), realizando comparaciones entre los años estudiados y barras categorizadas, así como con la cartografía creada para observar los cambios de superficie y distribución de las barras.

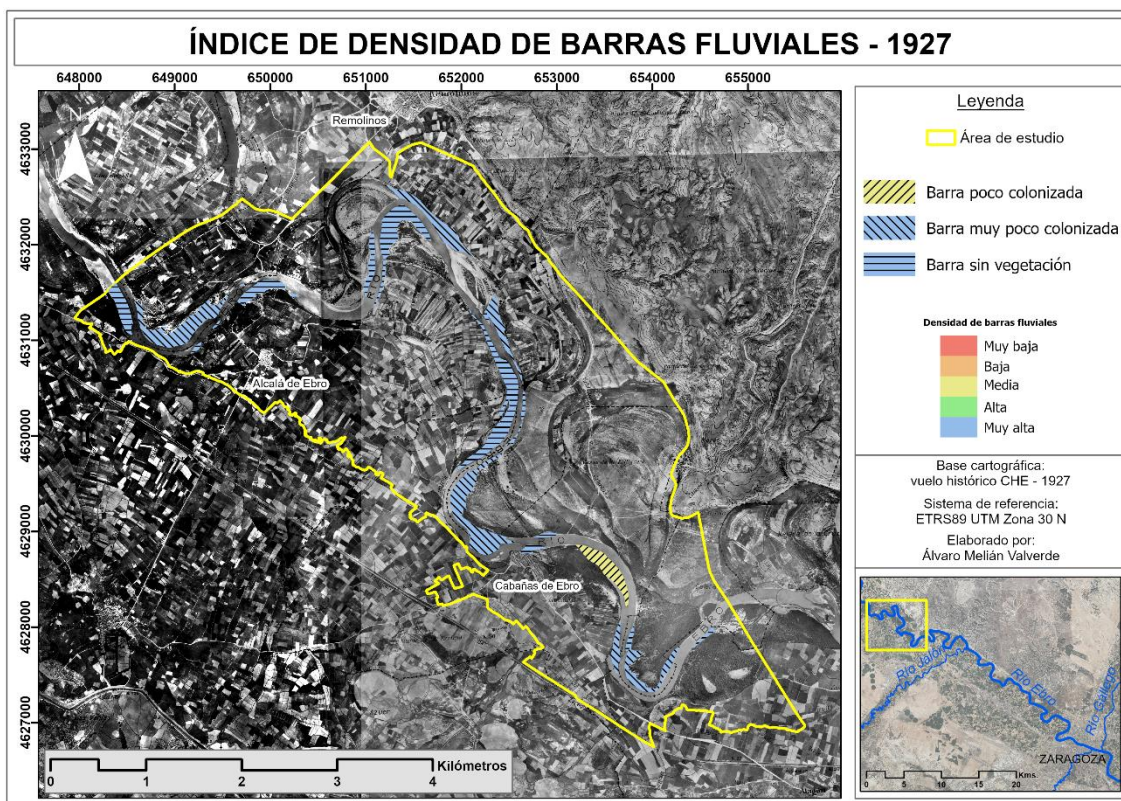
Tabla 6. Resultados del IDBF en el área de estudio

	Índice de densidad de barras fluviales (m ² /m)			
	1927	1956	1999	2021
Barras colonizadas	0	19,40	0	0,14
Barras poco colonizadas	12	93,67	11,92	11,69
Barras muy poco colonizadas	80,06	6,12	3,58	0
Barras sin vegetación	69,99	12,93	0,60	0,55

Fuente: elaboración propia

En el año 1927 se observa un claro predominio de las barras muy poco colonizadas y barras sin vegetación, presentando una densidad muy alta en este tipo de barras (80,06 m²/m y 69,99 m²/m, respectivamente). En menor medida, las barras poco colonizadas presentan un índice medio con 12 m²/m, destacando la ausencia de barras fluviales colonizadas por la vegetación. En cuanto a la distribución (Figura 11), se observa una alternancia de las barras que presentan una densidad muy alta, mostrando la dinámica sedimentaria del río en este año estudiado. La única barra poco colonizada, con una densidad media, se localiza en el meandro después del pueblo de Cabañas de Ebro.

Figura 11. IDBF en 1927

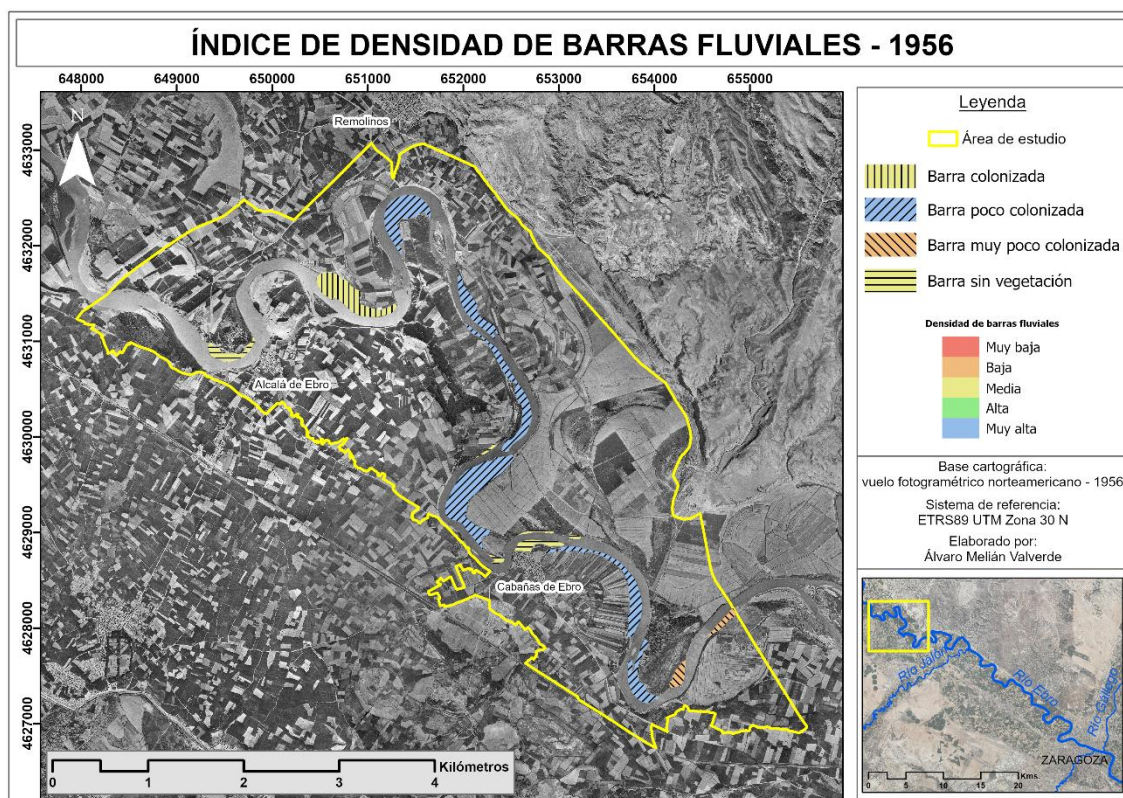


Es a partir de 1956 cuando se observa un cambio significativo de la dinámica sedimentaria del tramo. Las barras poco colonizadas pasan a tener una densidad muy alta con $93,77 \text{ m}^2/\text{m}$. Las barras muy poco colonizadas y sin vegetación ven reducida, considerablemente, su superficie a lo largo del tramo con una densidad baja y media, respectivamente. Además, las barras colonizadas por la vegetación cobran protagonismo en 1956 al tener una densidad media de $19,40 \text{ m}^2/\text{m}$. Las barras fluviales que presentan una densidad muy alta se distribuyen en el área de estudio a partir del meandro cercano al pueblo de Remolinos. Las barras con una densidad media se localizan próximas a los pueblos de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro. Y las barras con densidad baja se localizan al final del cauce en el área de estudio con una reducida superficie.

Los cambios en la dinámica sedimentaria con respecto a 1927 vienen producidos por diferentes factores, como son la modificación de los usos del uso que provoca cambios en el cauce del río por el aumento de actividades antrópicas como la agricultura intensiva que adquiere un mayor protagonismo en 1956; la construcción de infraestructuras para la regulación fluvial aguas arriba del tramo de estudio, provocando una alteración de la dinámica del río con un menor aporte de sedimento y favoreciendo la colonización de la vegetación de ribera en los márgenes; y, también debe de tenerse en cuenta la modificación del cauce en

febrero de 1952 afectando, sobre todo, al subtramo Alcalá – Remolinos que también produjo una alteración natural en el cambio de la dinámica sedimentario aguas abajo.

Figura 12. IDBF en 1956



En la situación de 1999 se constata la reducción de la superficie de las barras fluviales en el tramo con densidades muy bajas (Figura 13 y 14). En 1999 las barras poco colonizadas presentan una densidad media de $11,92 \text{ m}^2/\text{m}$; reduciéndose muy notablemente respecto al año 1956 donde la densidad de este tipo de barras era muy alta. Luego, las barras muy poco colonizadas y sin vegetación presentan unos valores de $3,58 \text{ m}^2/\text{m}$ y $0,60 \text{ m}^2/\text{m}$, respectivamente, dando una densidad muy baja en ambas. Las barras muy poco colonizadas desaparecen en el subtramo de Alcalá – Remolinos en donde predominan las barras poco colonizadas por la vegetación. Sin embargo, en el subtramo Cabañas se observan las tres categorías de barras con diferentes densidades.

Figura 13. IDBF en 1999 en el subtramo Alcalá – Remolinos

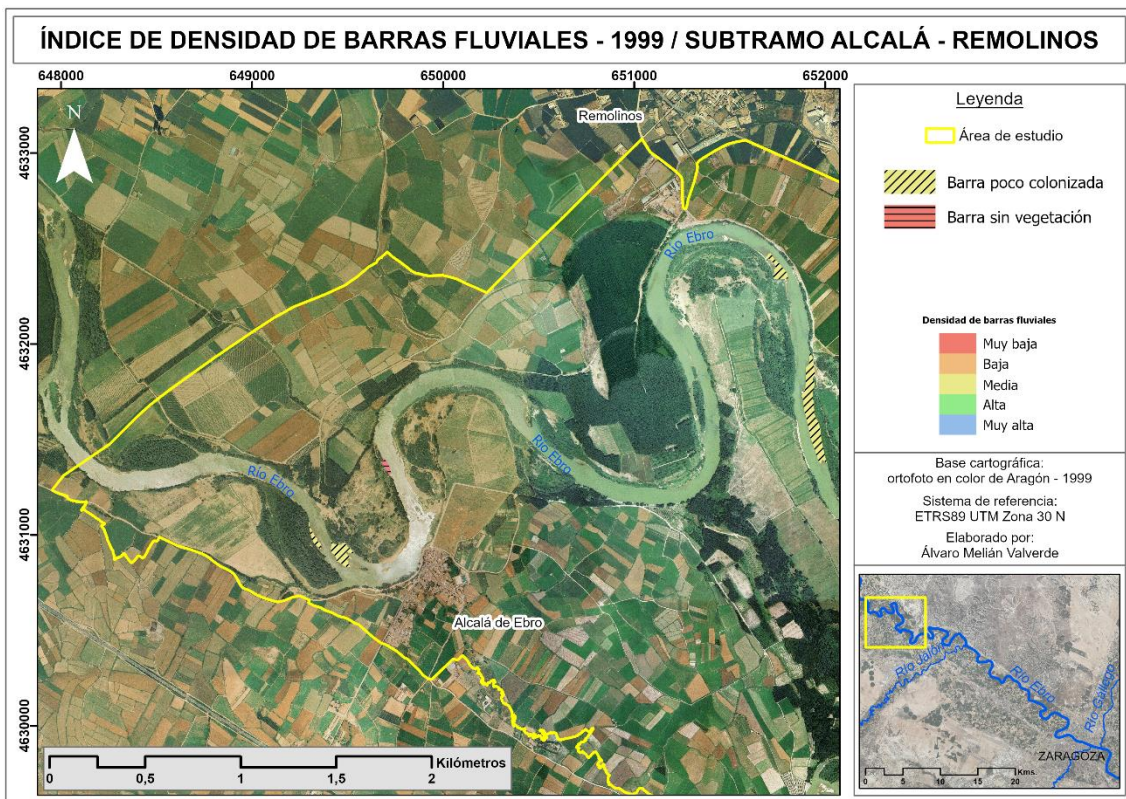


Figura 14. IDBF en 1999 en el subtramo Cabañas

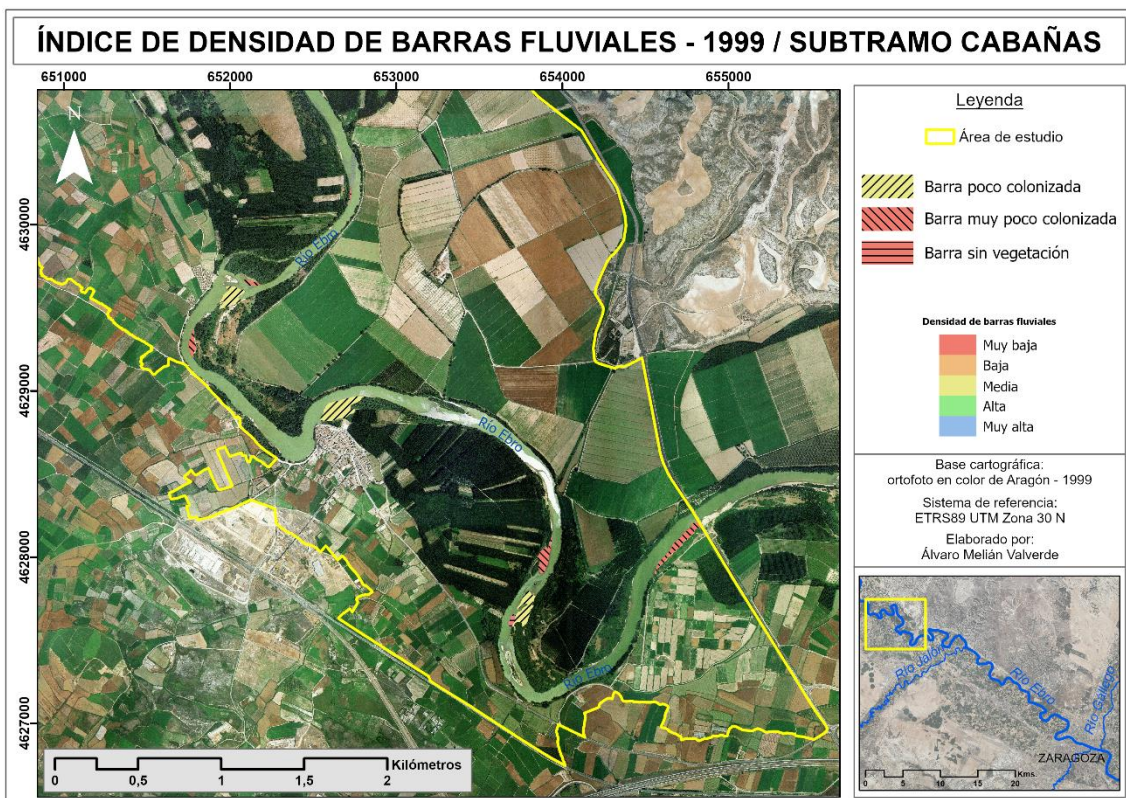
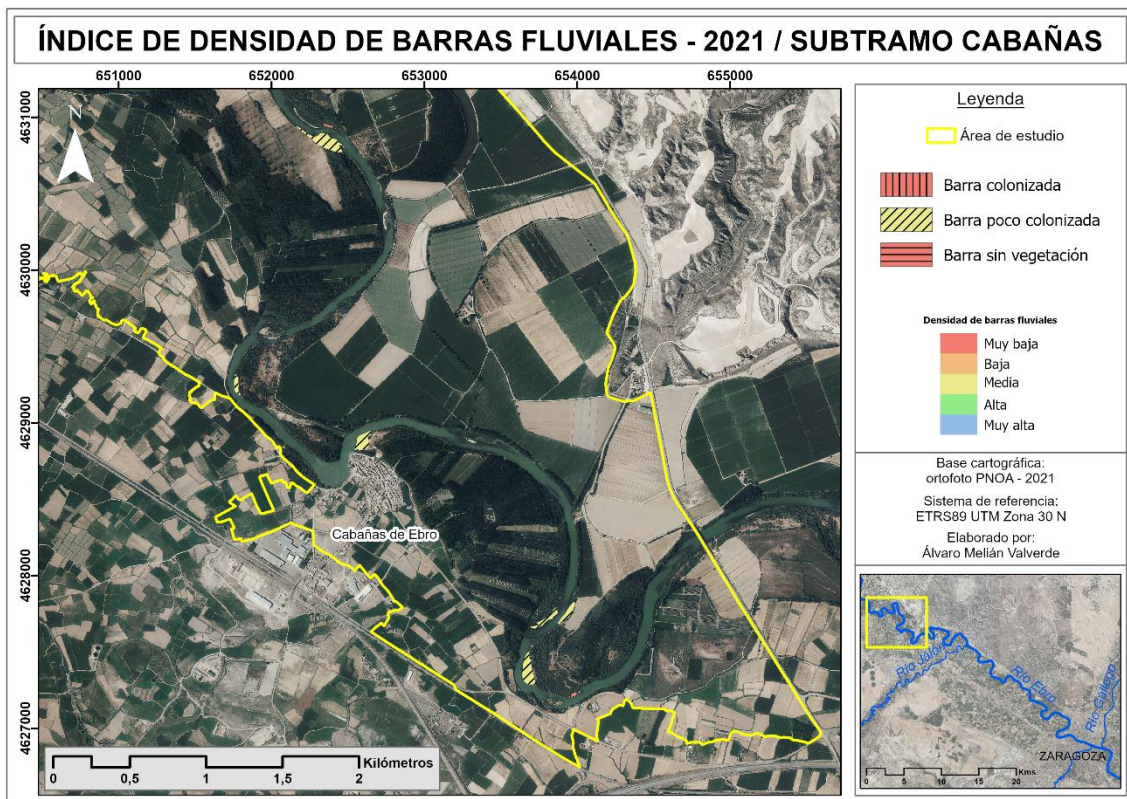


Figura 16. IDBF en 2021 en el subtramo Cabañas



4.2 Actualización y creación de cartografía de usos del suelo

Los usos del suelo podemos definirlos como la utilización del territorio que realiza una determinada sociedad con unos fines específicos. De esta manera, podemos tener un conocimiento sobre su desarrollo y la utilización de los recursos de la tierra, además de su evolución en el tiempo. A continuación, se muestra la cartografía creada de usos del suelo junto a una explicación de cada uno de los resultados obtenidos y la comparación entre los diferentes años estudiados.

Figura 17. Mapa de usos del suelo de 1927

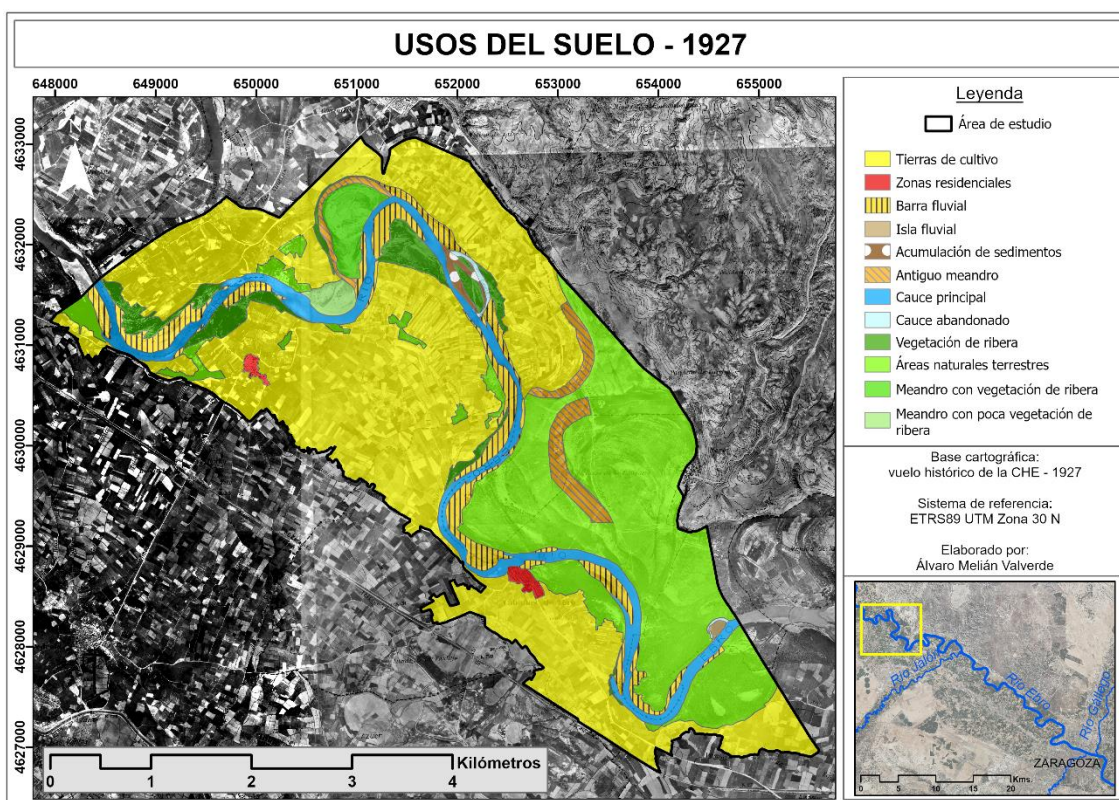


Tabla 7. Usos del suelo – 1927

Superficie de usos del suelo - 1927		
Tipo de uso	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Tierras de cultivo	977,37	49,64
Áreas naturales terrestres	552,94	28,08
Cauce principal	126,81	6,44
Barra fluvial	116,68	5,93
Vegetación de ribera	77,63	3,94
Antiguo meandro	48,16	2,45
Meandro con vegetación de ribera	33,56	1,70
Meandro con poca vegetación de ribera	13,14	0,67
Zonas residenciales	9,39	0,48
Acumulación de sedimentos	7,16	0,36
Cauce abandonado	4,39	0,22
Isla fluvial	1,87	0,09

Fuente: elaboración propia

El uso del suelo predominante en 1927 eran las tierras que cultivos que ocupaban una extensión de 977,37 hectáreas, lo que supone casi un 50% de toda el área de estudio. Le sigue las áreas naturales terrestres que se localizan, fundamentalmente, en el subtramo Cabañas de

Ebro con una gran extensión en la margen izquierda del cauce principal, además de áreas de menor tamaño repartidas por el área de estudio. Teniendo en cuenta ya los elementos biogeomorfológicos como usos del suelo descritos con anterioridad, el siguiente tipo serían las zonas residenciales que son los núcleos de población formados por Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro, con una extensión de 9,39 hectáreas. Por último, se identifica una nueva tipología como son los cauces abandonados que presentan una reducida extensión y que se localizan a unos 2 kilómetros hacia el este de Alcalá de Ebro y otro muy cerca de la terminación del cauce principal en el área de estudio por su margen izquierda.

Figura 18. Mapa de usos del suelo de 1956

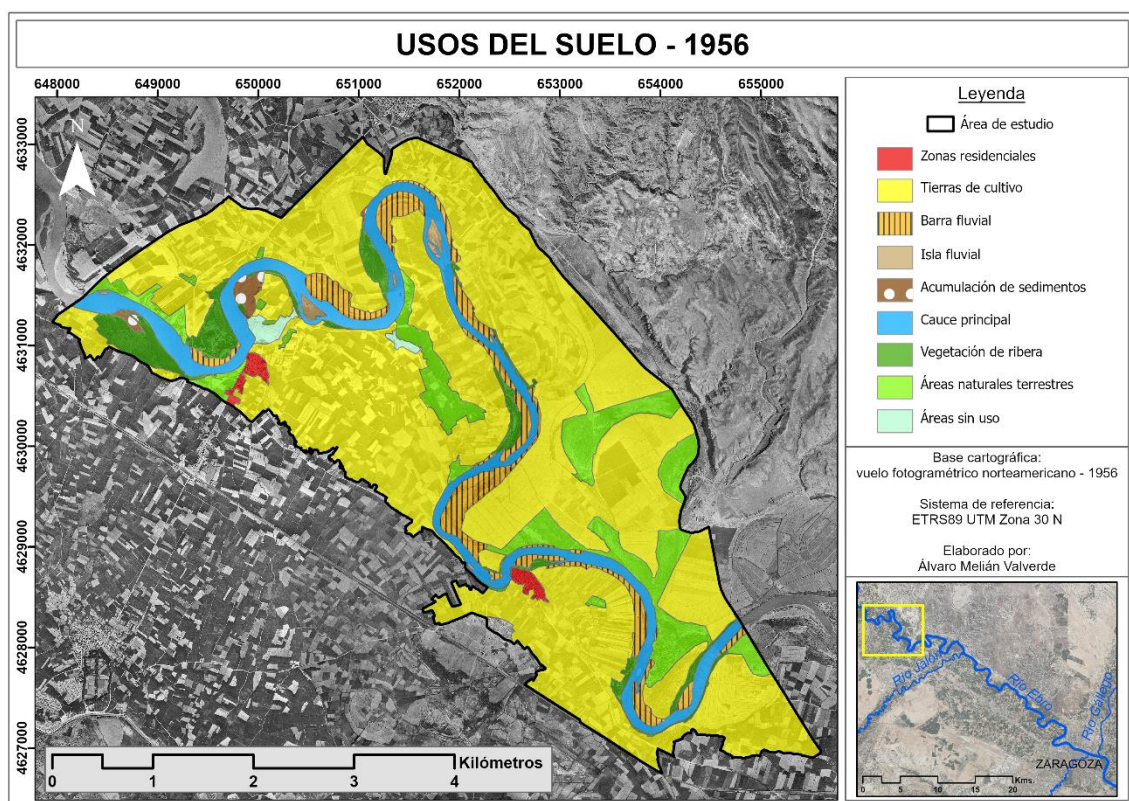


Tabla 8. Usos del suelo – 1956

Superficie de usos del suelo - 1956		
Tipo de uso	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Tierras de cultivo	1.368,50	69,72
Áreas naturales terrestres	191,22	9,74
Cauce principal	172,75	8,80
Barra fluvial	104,30	5,31
Vegetación de ribera	82,73	4,21
Zonas residenciales	13,64	0,70
Acumulación de sedimentos	11,43	0,58
Áreas sin uso	11,07	0,56
Isla fluvial	7,17	0,37

Fuente: elaboración propia

En 1956 se observa un crecimiento de las tierras de cultivo superando las 1.000 hectáreas y con un claro retroceso de las áreas naturales terrestres. Gran parte de esa área natural terrestre compuesta por comunidades herbáceas y arbustivas han pasado a convertirse en tierras de cultivo por la fertilidad de los suelos y su cercanía al río, que permite obtener recursos hídricos de manera sencilla gracias a la baja profundidad del nivel freático. Asimismo, se observa como el núcleo de Cabañas de Ebro ha crecido hacia el sureste y Alcalá de Ebro presenta un crecimiento lineal hacia el suroeste, aumentando en conjunto la superficie de las zonas residenciales en 13,64 hectáreas. Ya en esta cartografía se observa, claramente, el desplazamiento del cauce de río llegando al núcleo de Alcalá de Ebro con el consiguiente aumento de la vulnerabilidad y exposición. Por último, se identifica una nueva tipología como son las áreas sin uso localizadas, una, cerca de Alcalá de Ebro y otra a mitad de los dos núcleos de población del área de estudio.

Figura 19. Mapa de usos del suelo de 1999

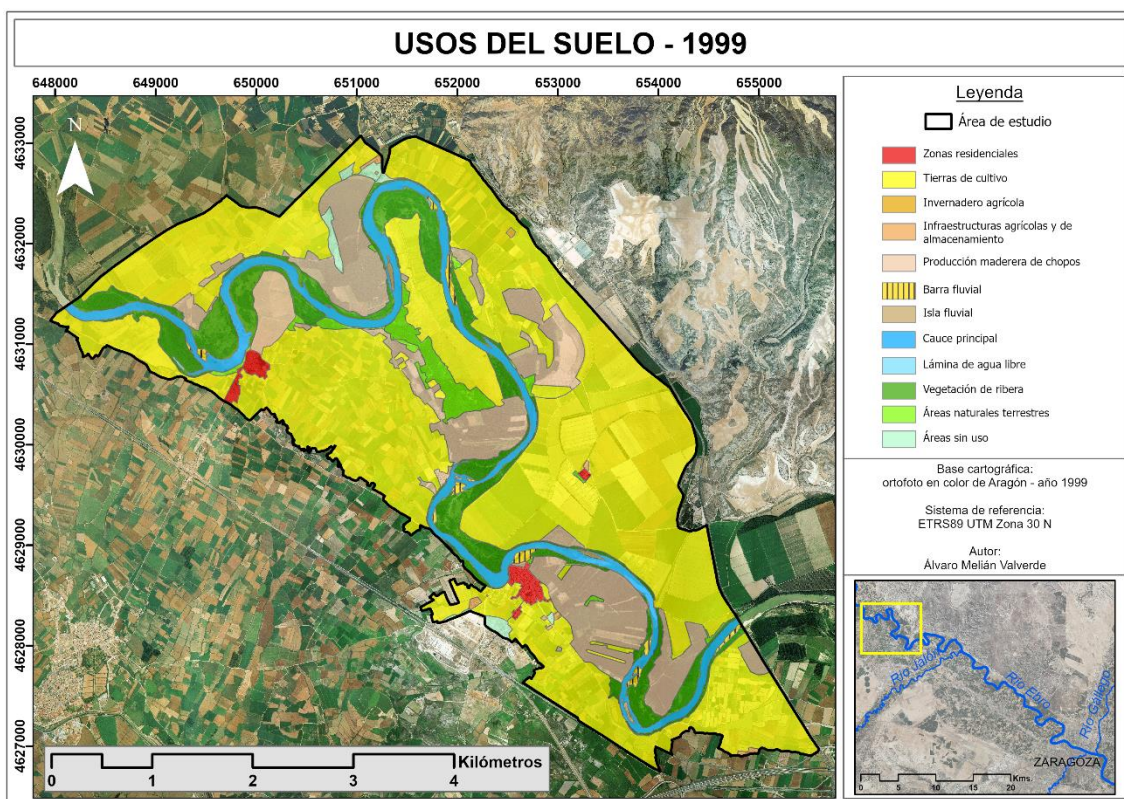


Tabla 9. Usos del suelo – 1999

Superficie de usos del suelo - 1999		
Tipo de uso	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Tierras de cultivo	1.218,95	61,95
Producción maderera de chopos	323,34	16,43
Vegetación de ribera	198,79	10,10
Cauce principal	129,82	6,60
Áreas naturales terrestres	42,55	2,16
Zonas residenciales	18,31	0,93
Áreas sin uso	14,94	0,76
Barra fluvial	11,87	0,60
Infraestructuras agrícolas y de almacenamiento	4,83	0,25
Isla fluvial	2,95	0,15
Lámina de agua libre	0,59	0,03
Invernadero agrícola	0,54	0,03

Fuente: elaboración propia

El uso del suelo de mayor extensión sigue siendo las tierras de cultivos con 1.218,95 hectáreas, lo que representa un 61,95% de toda el área de estudio. Ante el incremento de las tierras de cultivo, surge también una nueva tipología como son las infraestructuras agrícolas y de almacenamiento, con una superficie de 4,83 hectáreas, estando éstas deslocalizadas en el área de estudio. Como segunda tipología aparecen las producciones madereras de chopos, localizadas en los bordes del cauce principal que se asientan en zonas donde otras actividades agrícolas no podrían hacerlo debido a las inundaciones anuales del río. Las choperas ocupaban una superficie de 323,34 hectáreas, es decir, un 16,43% de toda el área de estudio. En este año, la extensión de áreas naturales terrestres se ve cada vez más reducida ante el incremento de las dos tipologías anteriores y la vegetación de ribera que ocupa un mayor espacio en los márgenes del cauce.

Figura 20. Mapa de usos del suelo de 2021

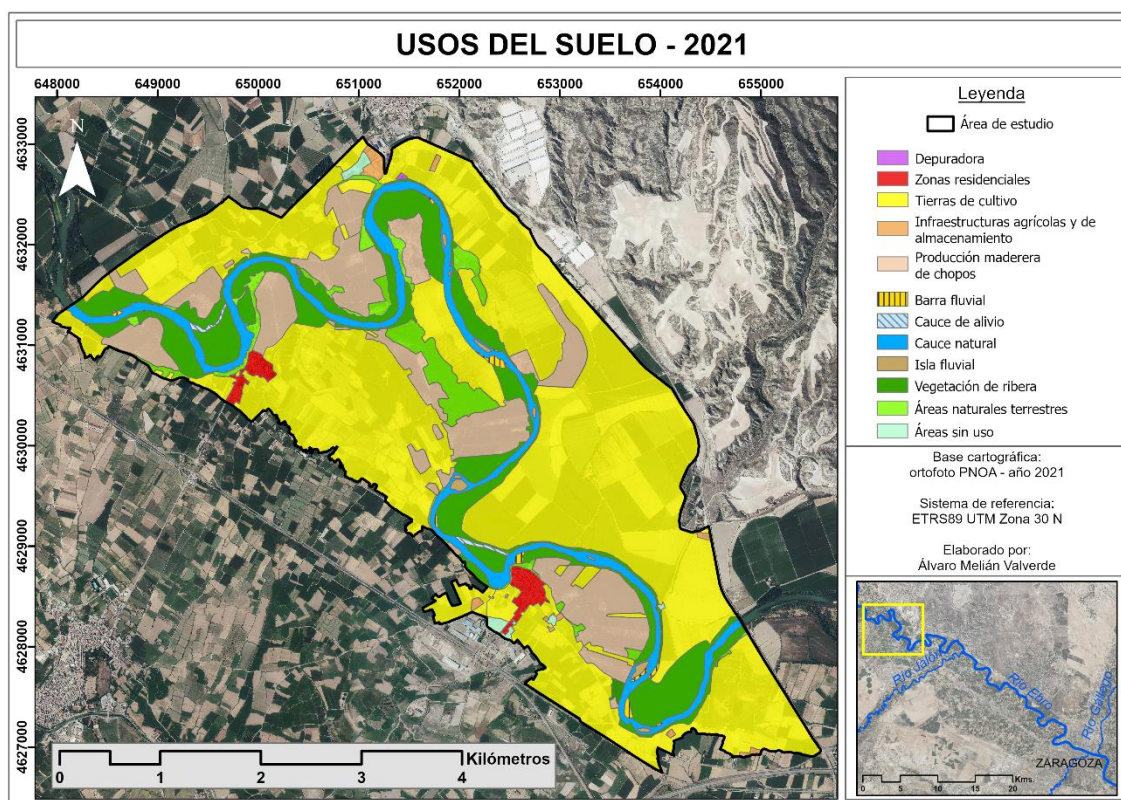


Tabla 10. Usos del suelo – 2021

Superficie de usos del suelo - 2021		
Tipo de uso	Superficie (Ha.)	Superficie (%)
Tierras de cultivo	1.182,90	60,07
Producción maderera de chopos	286,19	14,53
Vegetación de ribera	253,66	12,88
Cauce principal	118,05	5,99
Áreas naturales terrestres	73,05	3,71
Zonas residenciales	21,65	1,10
Infraestructuras agrícolas y de almacenamiento	11,79	0,60
Áreas sin uso	7,65	0,39
Barra fluvial	5,61	0,28
Isla fluvial	4,90	0,25
Cauce de alivio	3,45	0,18
Depuradora	0,43	0,02

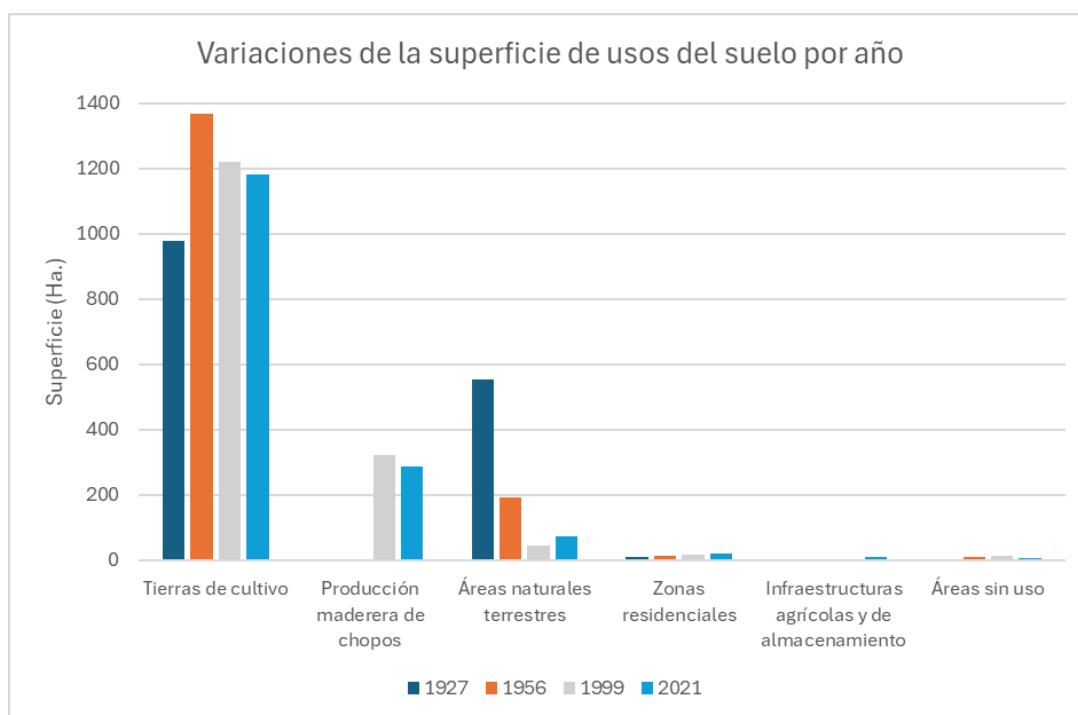
Fuente: elaboración propia

Por un lado, en 2021 se observa una disminución en la superficie ocupada por las tierras de cultivo y las zonas de producción maderera de chopos con respecto a 1999, aunque continúan siendo las tipologías de mayor extensión y presión sobre el territorio,

respectivamente. Por otro lado, la superficie de elementos bióticos (vegetación de ribera y áreas naturales terrestres) se ha visto incrementada en 253,66 y 73,05 hectáreas, respectivamente, con respecto a 1999. Elementos antrópicos como son las zonas residenciales y las infraestructuras agrícolas y de almacenamiento también ven aumentada su superficie, mostrando una clara presión antrópica sobre el territorio.

Por otra parte, resulta interesante una comparación algo más detallada sobre las variaciones en los usos del suelo desde 1927 hasta 2021. Por ello, se comenta la Figura 21 a modo de ejemplificación de dichas variaciones producidas en el área de estudio, mostrando las tipologías de uso del suelo que representan variaciones importantes en la dinámica natural del territorio estudiado, además de verse afectadas por inundaciones en momentos de crecida del río.

Figura 21. Variaciones en las tipologías de usos del suelo



Fuente: elaboración propia

A simple vista se observa una clara dominancia de las tierras de cultivo en los años estudiados, siendo en 1956 cuando se alcanza la mayor superficie de éstos. Ciertamente es que a partir de 1999 aparecen las choperas como nueva tipología dentro del área de estudio, que se segrega de las tierras de cultivos, al tratarse de una actividad forestal completamente diferente de las actividades agrícolas tradicionales. Al tratarse de dos tipologías que pertenecen al sector primario, en suma, alcanzaría en 1999 y 2021 una superficie de más de 1.500 hectáreas, si se

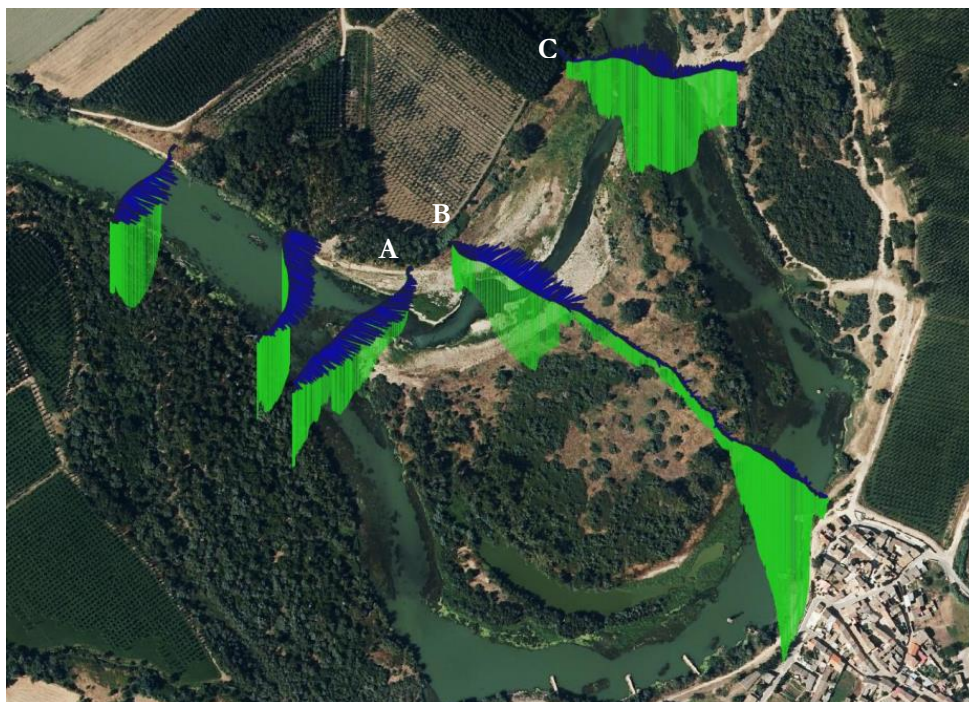
consideraran como tierras de cultivo en conjunto. Por tanto, en los dos últimos años de estudio alrededor de un 75% del territorio estaría destinado a un uso agrícola.

Por otro lado, las áreas naturales terrestres han visto reducida de forma drástica su superficie desde 1927 hasta la actualidad tal y como se observa en la Figura 21. Estas áreas conformaban amplios espacios de continuidad vegetal que, a día de hoy, se han visto fragmentados por las actividades antrópicas. También las zonas residenciales como son los núcleos de población de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro han visto aumentada su superficie al largo de los años debido a su crecimiento urbano. Este crecimiento también ha conllevado una mayor exposición de bienes como personas, vehículos, edificios, etc. al riesgo por inundación. Asimismo, las áreas sin uso, las cuales están asociadas a posibles crecimientos urbanos dada la proximidad a los núcleos de población, podrían provocar un mayor aumento de los bienes expuestos durante las inundaciones.

4.3 Análisis de los datos obtenidos con el sistema doppler ADCP

Tras la toma de datos a través del sistema doppler ADCP, se han escogido tres transectos (Imagen 10) que fueron realizados durante la crecida por la relevancia que arrojan los datos.

Imagen 10. Transectos realizados en la zona de Alcalá de Ebro con sistema doppler ADCP y GPS RTK

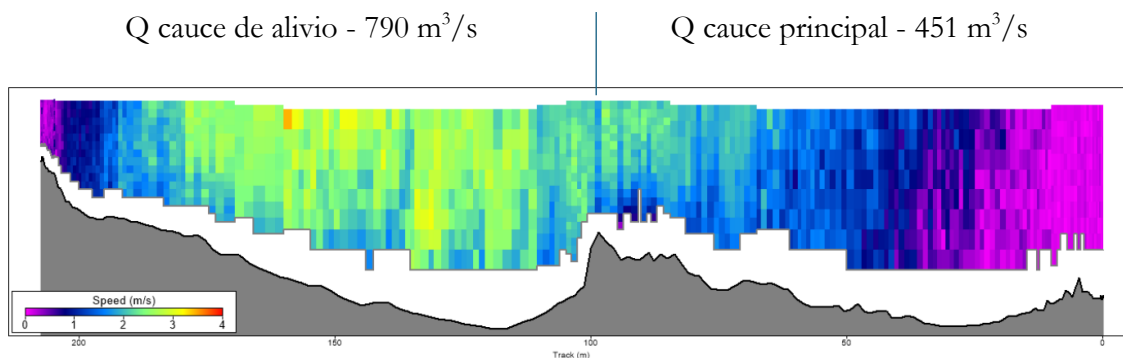


Fuente: Ebro NAUTAS

En primer lugar, el transecto A (Figura 22) se realiza en la bifurcación entre el cauce principal y el cauce de alivio con una longitud aproximada de 200 metros. En el momento

de la toma de datos en crecida, este transecto tenía un caudal total de $1.241 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose de forma muy clara que gran parte de la masa de agua circulaba por la parte derecha del transecto, es decir, en el comienzo del cauce de alivio con un caudal de $790 \text{ m}^3/\text{s}$ frente al cauce principal por donde circulaba un caudal de $451 \text{ m}^3/\text{s}$.

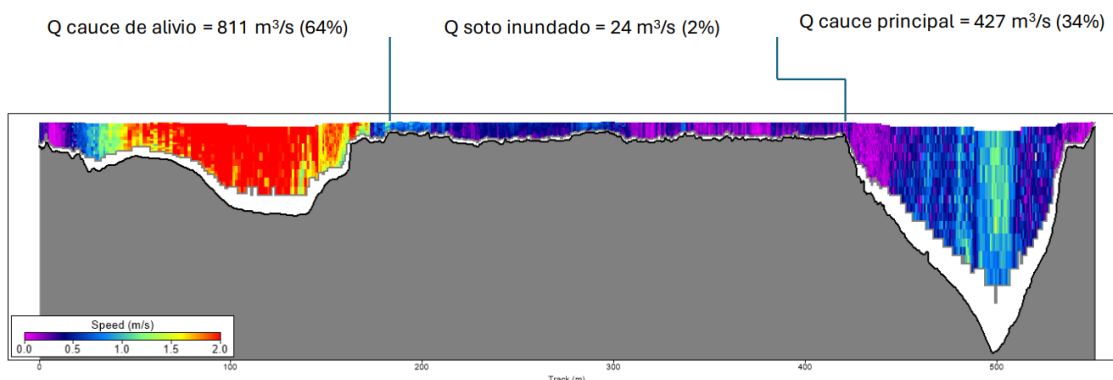
Figura 22. Aforamiento de caudal en el transecto A – bifurcación cauce de alivio



Fuente: Ebro NAUTAS

En segundo lugar, en el transecto B (Figura 23) se realiza una nueva medición del caudal desde la margen izquierda del cauce de alivio hasta la margen derecha del cauce principal, con una longitud aproximada de 550 metros; pasando por el soto de ribera que, actualmente, forma una isla colonizada. Durante el momento de la medición, este transecto tenía un caudal total de $1.262 \text{ m}^3/\text{s}$. Los datos que se obtienen indican que, en el momento de la crecida, por el cauce de alivio estaban pasando $811 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, es decir, un 64% del caudal total. Y, por el soto de ribera y por el cauce principal, $24 \text{ m}^3/\text{s}$ y $427 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Figura 23. Aforamiento de caudal en el transecto B

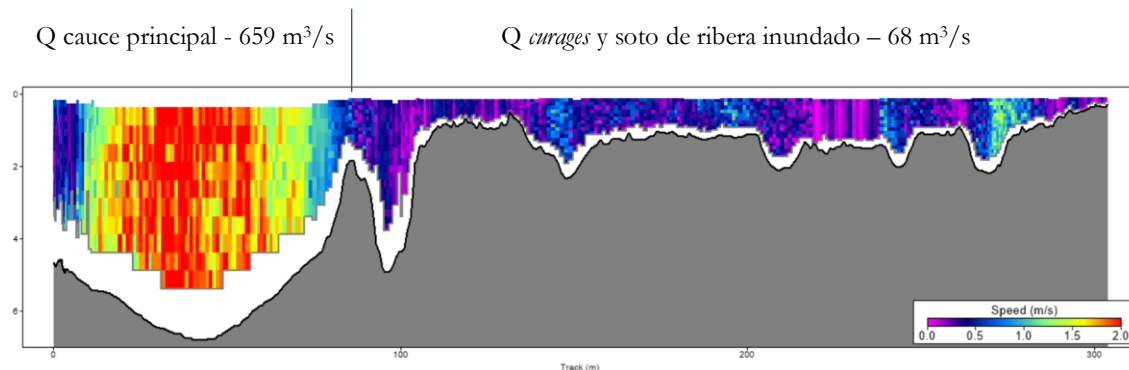


Fuente: Ebro NAUTAS

Por último, se realiza el transecto C con una longitud aproximada de 300 metros en el cauce principal y en los *curages* que se encuentran después del pueblo de Alcalá de Ebro (Figura 24). Durante el momento de la medición, este transecto tenía un caudal total de 727

m³/s. Asimismo, se observa que en este transecto gran parte del caudal discurre por el cauce principal con un caudal de 659 m³/s y que la zona donde se encuentran los *curages* y el soto de ribera actúa como área de inundación con un caudal de 68 m³/s.

Figura 24. Aforamiento del caudal en el transecto C



Fuente: Ebro NAUTAS

4.4 Análisis granulométrico y morfométrico de los sedimentos

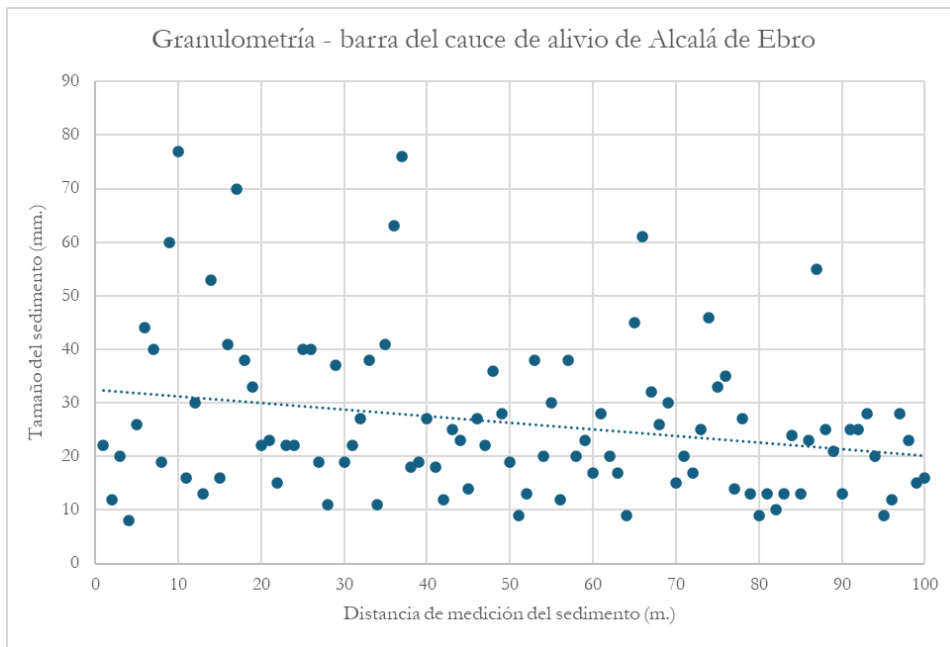
Tras la realización de trabajo de laboratorio para la medición y pesaje de las muestras, así como trabajo de gabinete para el procesamiento e interpretación de la información obtenida en campo, se obtienen los siguientes resultados:

- Granulometría

En lo que se refiere a la disposición de los sedimentos de las barras muestreadas, en la Figura 25 se muestra una granulometría de tipo granodecreciente en la barra del cauce de alivio de Alcalá de Ebro. Esta barra presenta una pendiente negativa de -0,1237, que implica una disminución del tamaño del sedimento a medida que aumenta la distancia. Y, en la Figura 26 se muestra una granulometría de tipo granocreciente con una pendiente de la barra de 0,075, que nos señala el crecimiento progresivo de los sedimentos aguas abajo.

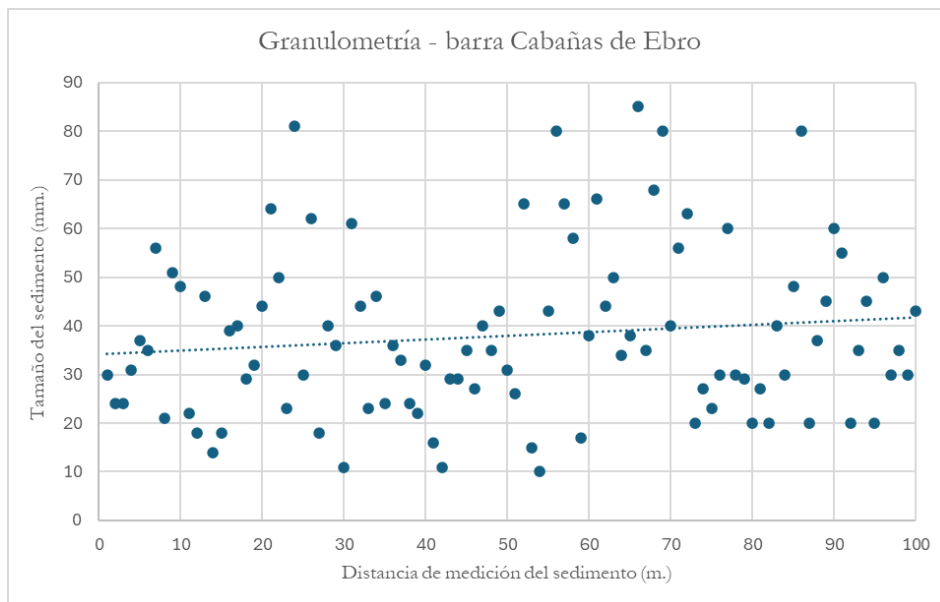
En cuanto al tamaño medio de los sedimentos medidos, la barra de Alcalá de Ebro presenta un tamaño de 26,27 milímetros y la barra de Cabañas de Ebro un tamaño de 34,30 milímetros. Por tanto, el tamaño medio de los sedimentos medidos en la barra fluvial de Cabañas de Ebro resulta ser mayor con respecto a la de Alcalá de Ebro.

Figura 25. Granulometría de la barra del cauce de alivio de Alcalá de Ebro



Fuente: elaboración propia

Figura 26. Granulometría de la barra en la margen opuesta a la salida del cauce de alivio en Cabañas de Ebro



Fuente: elaboración propia

Para obtener una mayor información sobre el transporte de sedimentos en ambas barras, se midieron las muestras de las 5 piedras más grandes (Tabla 13). En este caso, el tamaño medio de las piedras de la barra de Cabañas de Ebro resulta más grandes que las piedras de la barra de Alcalá de Ebro, además del centilo (bloque de mayor tamaño encontrado sobre las barras fluviales muestreadas), respectivamente.

Tabla 13. Las 5 piedras más grandes de las zonas de muestreo

Alcalá de Ebro

	Las 5 piedras más grandes (mm.)
CENILO	124
	120
	116
	115
	114
Media	117,80

Cabañas de Ebro

	Las 5 piedras más grandes (mm.)
CENILO	162
	120
	118
	116
	115
Media	126,2

Fuente: elaboración propia

Con respecto al acorazamiento de los sedimentos, resulta fundamental su conocimiento para comprobar la eficacia fluvial en las funciones de transporte y clasificación de los sedimentos. Tras el trabajo llevado a cabo en laboratorio se obtienen los siguientes resultados (Tabla 14 y 15) de las corazas y subcorazas de las barras muestreadas.

Tabla 14. Coraza de la barra del cauce de alivio de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro

Alcalá de Ebro

Coraza			
Cantos	Gramos	520	27.300
	Media	52,5	
Gravas	Gramos	1.739	34.780
	Media	20	
		2.259	62.080
TAMAÑO MEDIO (mm.)		27,48	

Cabañas de Ebro

Coraza			
Cantos	Gramos	4.084	263.826,40
	Media	65	
Gravas	Gramos	1.081	32.430
	Media	30	
		5.165	296.256,40
TAMAÑO MEDIO (mm.)		57,36	

Fuente: elaboración propia

Tabla 15. Subcoraza de la barra del cauce de alivio de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro

Alcalá de Ebro				Cabañas de Ebro			
Subcoraza				Subcoraza			
Gravas	Gramos	2.472	37.080	Cantos	Gramos	600	32.400
	Media	15			Media	54	
Arena	Gramos	132	66	Gravas	Gramos	2.272	34.080
	Media	0,5			Media	15	
Fino	Gramos	14	0,07	Arena	Gramos	33	16,50
	Media	0,005			Media	1	
		2.618	37.146	Fino	Gramos	3	0,02
					Media	0,01	
		2.908	66.496,52	TAMAÑO MEDIO (mm.)			
		14,19		22,87			

Fuente: elaboración propia

En primer lugar, existe una gran diferencia de tamaño en las corazas muestreadas, en donde la barra de Alcalá de Ebro presenta un tamaño medio de 27,48 milímetros y la barra de Cabañas de Ebro con un tamaño medio de 57,36 milímetros, duplicando el tamaño medio de la barra de Alcalá de Ebro. En segundo lugar, la subcoraza de Alcalá de Ebro presenta un tamaño medio de 14,19 milímetros y la barra de Cabañas de Ebro, con un tamaño medio algo superior, de 22,87 milímetros. Por último, el índice de acorazamiento (cociente entre coraza y subcoraza) obtiene un resultado de **1,94** para la barra de Alcalá de Ebro y de **2,51** para la barra de Cabañas de Ebro.

Los resultados del índice de acorazamiento pueden estar directamente relacionados con la potencia específica (vatios/m²), que resulta un indicador muy útil para comparar tramos fluviales y relacionar la energía del río con las morfologías del cauce (Ollero et al, 2021). La fórmula utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$\Omega = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot S) / w$$

La ρ es la masa volumétrica del agua (1.000 kg. /m³), la g es la aceleración de la gravedad (9,8 m/s²), la Q es el caudal (m³/s), la S es la pendiente local y la w la anchura del cauce en metros. En primer lugar, se calcula la potencia específica en el cauce de alivio de Alcalá de Ebro que presenta una pendiente de 0,00094 m/m, una anchura de cauce de 150 metros y un caudal bankfull de 811 m³/s a partir de los datos obtenidos con el ADCP. Por ello, la potencia específica en el cauce de alivio es de **48,81** vatios/m². Y, en segundo lugar, el cauce principal en Alcalá presenta una pendiente de 0,00035 m/m, una anchura de 141 metros y un caudal bankfull de 1.600 m³/s a partir de caudal calculado por Ollero (1992). Así, la potencia específica es de **38,92** vatios/m² para el cauce principal. Por otro lado, se ha

calculado la potencia específica del cauce principal en Cabañas de Ebro que presenta una pendiente de 0,00029 m/m, según la pendiente calculada por Ollero (1992), una anchura de cauce de 80 metros en la parte más estrecha del cauce a su paso por Cabañas y un caudal bankfull de 1.600 m³/s. Así, la potencia específica en Cabañas es de **56,84** vatios/m².

De esta manera, podemos observar que en la zona de Alcalá de Ebro, en el cauce de alivio, existe una mayor capacidad de transporte del sedimento respecto al cauce principal en momentos de crecida. Esta relación sobre la energía del río no puede realizarse en Cabañas de Ebro por la falta de datos en crecida sobre el caudal que circula por el cauce de alivio.

- Morfometría

Después de realizar las mediciones de 20 piedras recogidas en las dos barras muestreas, los tamaños (en mm.) se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 16. Mediciones morfométricas en la barra de Alcalá de Ebro

Morfometría				
ID	L (lado mayor)	l (lado menor)	E (espesor)	R (radio)
1	49	41	25	14
2	37	31	11	6
3	45	22	7	12
4	64	40	25	10
5	55	45	34	12
6	38	29	11	8
7	36	31	19	12
8	42	24	6	10
9	54	38	6	10
10	34	34	18	10
11	45	43	30	14
12	50	37	4	16
13	43	30	21	10
14	58	51	32	30
15	65	45	23	12
16	71	49	16	16
17	60	56	16	14
18	60	41	16	20
19	54	29	16	8
20	38	27	15	12
Media	49,90	37,15	17,55	12,80

Fuente: elaboración propia

Tabla 17. Mediciones morfométricas en la barra de Cabañas de Ebro

Morfometría				
ID	L (lado mayor)	l (lado menor)	E (espesor)	R (radio)
1	65	42	26	22
2	34	42	19	12
3	82	38	16	12
4	55	44	15	10
5	58	41	12	14
6	54	39	18	20
7	64	51	17	10
8	80	56	27	26
9	102	58	27	28
10	60	59	19	20
11	82	59	25	26
12	52	42	16	10
13	92	47	25	12
14	72	44	16	10
15	74	61	36	20
16	67	60	23	30
17	44	38	14	20
18	31	43	20	14
19	59	33	12	10
20	66	40	19	12
Media	64,65	46,85	20,1	16,9

Fuente: elaboración propia

Los promedios obtenidos de las mediciones nos serán útiles para el cálculo de diferentes índices morfológicos (Tabla 18 y 19) que nos ayuden a obtener una mayor información sobre la deposición de los sedimentos en el tramo de estudio.

Tabla 18. Índices morfométricos para Alcalá de Ebro

Índices morfométricos	
Desgaste	0,51
Aplanamiento	2,48
Esfericidad	0,64

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Índices morfométricos para Cabañas de Ebro

Índices morfométricos	
Desgaste	0,52
Aplanamiento	3,30
Esfericidad	0,58

Fuente: elaboración propia

En primer lugar, el índice de desgaste para ambas localizaciones nos arroja un resultado prácticamente idéntico debido a que se encuentran a pocos kilómetros de distancia y, por tanto, la abrasión que sufren los sedimentos transportados no difiere entre un lugar y otro. En segundo lugar, el índice de aplanamiento resulta mayor en Cabañas de Ebro con respecto a Alcalá de Ebro. Y, en tercer lugar, el índice de esfericidad mostrando una mayor erosión en las gravas y cantos localizados en Alcalá de Ebro.

5. DISCUSIÓN

A partir de lo expuesto en los apartados previos, en este punto se discutirán y argumentarán los resultados obtenidos ya expuestos.

En primer lugar, podemos afirmar la alteración de la dinámica fluvial desde 1927 hasta 2021, de manera que no solo se observan cambios en la sinuosidad del cauce principal si no la reducción de la superficie de barras e islas fluviales a través de las cartografías realizadas. Las variaciones en la superficie de los sedimentos se deben, entre otros muchos factores (como el incremento de la temperatura por el cambio climático y de la cantidad de nutrientes procedentes de la agricultura de regadío adyacente), al efecto causante de los embalses aguas arriba del tramo de estudio, permitiendo así la colonización de las riberas del cauce y alterando la dinámica natural del río por este tipo de acciones antrópicas, confirmando así lo expuesto por Ollero et al (2015) sobre las alteraciones que provocan barreras horizontales como presas o embalses en todos los sistemas fluviales. Gracias a la aplicación del IDBF en este trabajo se evidencia la pérdida de superficie de barras fluviales desde el primer año de estudio hasta 2021, que ha sido del 92,18%. Desde 1927 hasta 1956 se observa un cambio en las superficies de barras que prácticamente carecen de vegetación, disminuyendo en superficie y aumentando los procesos de colonización vegetal en las barras, estando esto relacionado con el incremento significativo de la superficie de tierras de cultivo en el año 1956. Ya en el periodo 1999-2021 la dinámica sedimentaria se ve altamente reducida con densidades muy bajas en casi todas las topologías de barras, lo que provoca alteraciones sobre el equilibrio natural del río y aumentando los riesgos de erosión.

En todo ello, entra en juego otro de los análisis realizados en este trabajo, como es la modificación de los usos del suelo. Con los resultados obtenidos, la variación de las superficies de algunas tipologías de uso como las tierras de cultivo y las áreas naturales terrestres confirman la presión antrópica que ha recibido el área de estudio desde 1927 con

un claro retroceso de las importantes zonas naturales que existían previamente y que han sido cartografiadas. Del mismo modo, y gracias a la cartografía creada para este estudio, se ha observado y medido cómo antiguas barras fluviales sin vegetación o poco colonizadas han sido ocupadas por tierras de cultivos, lo que genera un estrechamiento del cauce y por ende un aumento en el riesgo de inundación sobre las localidades cercanas.

En segundo lugar, tras el análisis espacial de los cambios en los usos del suelo se constata y relaciona la antropización del territorio como factor condicionante en el aumento del riesgo de inundación para los núcleos de población de Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro. Durante casi el siglo estudiado, las actividades antrópicas han ido en aumento y con ello el desarrollo de las superficies urbanas de ambas localidades. Este hecho provoca que la exposición y vulnerabilidad ante el riesgo de inundación vaya creciendo a medida que han pasado los años. Esto ha conllevado a la construcción de defensas que constriñen y alteran el cauce, poniendo en grave peligro tanto a las localidades ya mencionadas como a las propias actividades económicas que se desarrollan en el territorio. De ahí que en los proyectos Ebro Resilience y SEDEXCHARE cobre una especial relevancia la recuperación del territorio fluvial, es decir, devolver espacio al río. Muchas han sido las actuaciones realizadas por Ebro Resilience desde 2015 en el área de estudio con la finalidad de lograr lo anterior y reducir el riesgo de inundación sobre Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro. Prueba de ello lo tenemos en los datos obtenidos mediante el trabajo realizado con el sistema doppler ADCP en el meandro de Alcalá de Ebro donde afirmamos que ha logrado reducir, considerablemente, el caudal durante una crecida en el cauce principal a su paso por la localidad gracias a la creación del cauce de alivio que corta el meandro. Al transportar más de la mitad del caudal en crecida se logra reducir la erosión lateral que ha sufrido la margen derecha, así como el encajamiento del cauce de unos 12 metros de profundidad a la altura de Alcalá de Ebro. A esto debemos de sumarle los datos de potencia específica calculados donde observamos una mayor energía y movilización del sedimento en el cauce de alivio, confirmados además por un bajo acorazamiento (1,94) que demuestra que la movilización de gravas es eficaz con caudales altos. Por otro lado, la técnica de *curage* da continuidad a las aguas que circundan por el cauce de alivio reduciendo la presión ejercida del agua sobre la mota de la parte norte de Alcalá de Ebro (Cuartero et al, 2022).

Cabe destacar que en la zona cercana a Cabañas de Ebro no se realizó ninguna medición a través del sistema doppler ADCP que ayudara a afirmar la utilidad de las actuaciones llevadas a cabo en el entorno por Ebro Resilience. Es por ello que sería preciso la realización

de esta misma técnica para Cabañas de Ebro, con el fin de aportar un mayor conocimiento e información ante las futuras actuaciones que se encuentran proyectadas dada la laguna de conocimiento que existe al respecto.

En tercer lugar, el análisis granulométrico y morfológico de los sedimentos ha servido para su caracterización dentro del área de estudio. Es cierto que no todos los datos obtenidos han servido para ser relacionados y explicados con otros. Sin embargo, resulta útil su conocimiento para poder establecer comparaciones de sedimentos en futuros trabajos, como los que se llevarán a cabo en el marco del proyecto SEDEXCHARE, y entender la dinámica sedimentaria dentro de este tramo del Ebro. Así, uno de los índices obtenidos a partir del análisis morfométrico de los sedimentos adquiere especial importancia al ofrecernos el estado de estabilización de las barras muestreadas, como es el índice de acorazamiento. Gracias a los datos obtenidos, se observa cómo las barras de Alcalá y Cabañas presentan un acorazamiento relativamente bajo. De esta manera, se encuentran en proceso de estabilización todavía débil, lo que facilita la movilidad de los sedimentos. Resultaría interesante realizar seguimientos en el largo plazo de estas barras con la finalidad de conocer si su estabilización sigue avanzando, ya que si esto ocurriese es muy probable que con el paso de los años estas barras se conviertan en barras colonizadas por la vegetación, como se ha comenzado a observar en la barra de Cabañas. En los dragados realizados en 2010 en esta barra se constató que la reposición de material posterior fue muy rápida, resultando inútiles las acciones ejecutadas y reconstruyéndose la barra en solo unos meses con las mismas características granulométricas y morfométricas (Ollero et al., 2017). En la actualidad la movilidad sigue siendo efectiva, y no termina de formarse una coraza destacada (acorazamiento de 2,51) aunque la tendencia a que la colonización vegetal progrese es evidente.

Aunque no haya sido objeto de estudio en este trabajo, existe una componente fundamental que engloba a todas las ideas y no es otra que la Ordenación del Territorio como herramientas de prevención y adaptación. La interacción entre las actividades llevadas a cabo por los seres humanos en un territorio determinado convierten al espacio geográfico en un territorio de riesgo donde las actuaciones antrópicas no han tenido en cuenta los factores físicos, ambientales y/o sociales del medio en el que se encuentran. En los últimos 40 años, el riesgo ha crecido debido, sobre todo, a la aproximación y ocupación directa de los cauces fluviales, lo que provoca un incremento significativo de la vulnerabilidad y exposición ante las inundaciones dando lugar a la creación de paisajes de riesgo (Olcina, 2022). Además de

todo ello, debemos tener en cuenta el contexto de cambio global en el que vivimos, en el que el incremento de eventos atmosféricos extremos junto a la acción del ser humano sobre el territorio generan aún más riesgo. De esta manera, surge la necesidad de crear territorios resilientes que tengan la capacidad de recuperarse a la mayor brevedad de los efectos negativos provocados por las inundaciones (Olcina, 2020). La reducción del riesgo de inundación fluvial pasa por realizar una planificación territorial donde rija la sostenibilidad, se tengan en cuenta los escenarios de cambio climático, se empleen métodos y herramientas de análisis espacial para el diseño de actuaciones, se desarrollen indicadores para la evaluación de las acciones llevadas a cabo y una cultura de prevención del riesgo tanto a nivel social como administrativo que permita mejorar la respuesta ante este tipo de fenómenos.

Alcalá y Cabañas siguen siendo dos localidades muy expuestas al riesgo que deben seguir siendo atendidas con estrategias y protocolos que salvaguarden a su población, pero al menos las acciones realizadas, y especialmente el cauce de alivio de Alcalá, han logrado reforzarlas y aumentar su resiliencia frente a las crecidas del Ebro, que seguirán registrándose en el futuro.

Para concluir con este apartado, se ha de poner de manifiesto algunos aspectos que podrían haber sido relevante en este trabajo y que no han podido ser profundizados por falta de tiempo o porque no se ajustaban a los objetivos establecidos. Primeramente, la aplicación del sistema doppler ADCP en el entorno de Cabañas de Ebro durante la crecida ordinaria de finales de febrero de 2024. Su uso hubiese servido para enriquecer aún más este trabajo y ofrecer información sobre caudales en crecida y perfiles batimétricos tanto en el cauce principal como en el cauce de alivio. En segundo lugar, crear una metodología cuantitativa para establecer rangos de cobertura vegetal tanto en barras como en islas fluviales. De esta manera, se obtendría una mayor precisión y comparación sobre las cartografías creadas. Por último, podría haberse incluido información a través de ortomosaicos creados con dron sobre los cambios biogeomorfológicos de algunos de los elementos cartografiados, como pueden ser las barras e islas fluviales, antes y después de la crecida para comparar superficies o cualquier otro aspecto a analizar. Debido a la falta de tiempo, por no ajustarse a los objetivos del trabajo y ante la imprevisión de una crecida, dicho análisis podría dar pie a la realización de otra investigación que tenga como base el presente documento.

6. CONCLUSIONES

Llegados a este punto del trabajo, se concluye que los objetivos inicialmente propuestos para este Trabajo Fin de Máster han sido cumplidos conforme a los criterios establecidos. En primer lugar, se ha logrado crear una cartografía detallada de los elementos biogeomorfológicos y usos del suelo entre los años 1927 y 2021 a través de fotointerpretación. En segundo lugar, se han aplicado métodos y herramientas aprendidos durante el desarrollo del máster para la caracterización de los sedimentos. En tercer lugar, se ha empleado y se han obtenido resultados relevantes con la aplicación del sistema doppler ACDP en una zona concreta del área de estudio que ha permitido conocer las funcionalidades de las actuaciones llevadas a cabo por Ebro Resilience. Y, por último, se ha logrado establecer una relación entre los usos del suelo y la dinámica fluvial pudiéndose observar que el aumento de las actividades antrópicas en el área de estudio ha conllevado una alteración del equilibrio natural del río.

Finalmente, se extraen conclusiones claves que facilitan la comprensión del contenido de este documento:

1. Tanto el aumento de las actividades antrópicas como factores y naturales antrópicos externos han influenciado en los cambios de la dinámica del río Ebro en el tramo estudiado.
2. Las actuaciones llevadas a cabo en el subtramo Alcalá – Remolinos han logrado reducir la erosión lateral en crecida sobre el pueblo de Alcalá de Ebro y devolver espacio al río a través de la retirada de defensas y motas.
3. Se precisa una integración en cuanto a la gestión del riesgo con aspectos ambientalmente sostenibles y la Ordenación del Territorio.
4. La gestión y restauración fluvial y la Ordenación del Territorio como medios estratégicos para lograr la resiliencia del territorio ante el riesgo por inundación.

7. BIBLIOGRAFÍA

Corenblit, D., Baas, A. C. W., Bornette, G., Darrozes, J., Delmotte, S., Francis, R. A., Gurnell, A. M., Julien, F., Naiman, R. J., & Steiger, J. (2011). Feedbacks between Geomorphology and Biota Controlling Earth surface processes and landforms: A review of foundation concepts and current understandings. *Earth-Science Reviews*, 106, 307-331. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.03.002>

- Cruz Palacios, R. D. (2017, septiembre). *Aplicación de un Sistema Perfilador Acústico Doppler (ADCP) para la obtención de perfiles hidrológicos y de caudal de ríos en el distrito metropolitano de Quito*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19006/1/CD-8403.pdf>
- Cuartero, N., Moral, R., Ollero, A. y Pirchi V.N. (2022). *Evaluación hidromorfológica tras la aplicación de la técnica curage en el curso medio del Ebro*. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.
- Ebro Resilience. (s. f.). *El proyecto*. <https://www.ebroresilience.com/proyecto-life-p1/el-proyecto/>
- Ebro Resilience. (2020a, noviembre). *Estudio de detalle Tramo 8. Ebro en Cabañas de Ebro*. <https://ebroresilience.com/wp-content/uploads/2020/11/tramo-8-cabamas-de-ebro-resumen.pdf>
- Ebro Resilience. (2020b, diciembre). *Estudio de detalle Tramo 7. Ebro en Alcalá de Ebro y Remolinos*. <https://ebroresilience.com/wp-content/uploads/2020/12/tramo-7-alcala-de-ebro-remolinos-resumen.pdf>
- Giménez-Font, P. (2009). Cartografía histórica y alteración de cursos fluviales en la España Mediterránea [Universidad de Alicante, Ministerios de Ciencia e Innovación]. En *Desastre natural, vida cotidiana y religiosidad popular en la España moderna y contemporánea* (392–432). Armando Alberola y Jorge Olcina. https://www.researchgate.net/publication/318469164_Cartografia_historica_y_alteracion_de_cursos_fluviales_en_la_Espana_mediterranea
- Gobierno de Aragón. (2023, 25 febrero). *Río Ebro. Escarpes del río Ebro, Remolinos, Torres de Berrellén y Sobradíel. Puntos de interés fluvial*. <https://www.aragon.es/-/rio-ebro-escarpes-del-rio-ebro-remolinos-torres-de-berrellen-y-sobradiel#anchor1>
- Instituto Geográfico Nacional. (s. f.). *Ocupación del suelo*. <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Ocupacion-Suelo.pdf>
- INE (2024). *Cifras oficiales de población de los municipios españoles*. Recuperado de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística.
- León, M.P. y Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(2), 215-240. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732010000200003>
- Najes, L., Ollero, A., & Sánchez Fabre, M. (2019). Evolución y dinámica geomorfológica actual del río Ebro en la Reserva Natural Dirigida de los Sotos y Galachos (Zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología*, 33(1-2), 47-63.

- Pirchi, V.N. (2023). *Dinámica fluvial y estado hidrogeomorfológico del curso bajo del río Gállego (término municipal de Zuera): diagnóstico para su restauración* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza]. <https://fundacionodondebuen.com/wp-content/uploads/2024/08/TFM-VALERIA-PIRCHI.pdf>
- Olcina, J. (2020). Ordenación del territorio para la gestión de inundaciones: propuestas. En López Ortiz, M.^a Inmaculada; Melgarejo Moreno, Joaquín (Eds.). *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes*, 465-475. Alacant: Universitat d'Alacant. <http://hdl.handle.net/10045/109065>
- Olcina, J. (2022). Paisajes de riesgo. Aspectos conceptuales, potencialidad didáctica en el aula y utilidad práctica en la planificación territorial /Risk landscapes. Conceptual aspects, didactic potentiality in the classroom and practical utility in spatial planning. *Ería*, 42(2), 173-185. <https://doi.org/10.17811/er.42.2022.173-185>
- Ollero, A. (1992). *Los meandros libres del Ebro medio (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. [Tesis doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza].
- Ollero, A. (1996). Dinámica de meandros y riesgos hidrogeomorfológicos en Alcalá de Ebro y Cabañas de Ebro (Zaragoza). *IV Reunión Nacional de Geomorfología, Cadernos do Laboratio Xeolóxico de Laxe*. 21: 431-443
- Ollero, A., Ibisate, A., Horacio, J., Ferrer, C., Martín Vide, J. P., Acín, V., Ballarín, D., Díaz Bea, E., Granado, D., Mora, D., & Sánchez Fabre, M. (2011). *Indicadores geomorfológicos para el seguimiento de la restauración fluvial*. I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial, León. https://www.researchgate.net/publication/259977501_Indicadores_geomorfológicos_para_el_seguimiento_de_la_restauración_fluvial
- Ollero, A., Ballarín, D. y Mora, D. (2015). Cambios en el cauce y el llano de inundación del río Ebro (Aragón) en los últimos 80 años. *Geographicalia*, (50), 87–109. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2006501126
- Ollero, A., Ibisate, A., Acín, V., Ballarín, D., Granado, D., Horacio, J., Mora, D., Nadal, E., Sánchez Fabre, M., Sebastián, M., Segura, F., Valls, A. (2017). Dynamique fluviale, changement global et presión anthropique dans le bassin, le cours et le delta de l'Ebre. *Sud-Ouest Européen*, 44: 41-54.

- Ollero, A., Ibisate, A., Ferrer-Boix, C., Martín Vide, J. P., Ballarín, D., Castillo Pascual, P., ... Sánchez Fabre, M. (2024). El curso medio del río Ebro: bases preliminares para su diagnóstico hidromorfológico y perspectivas de gestión y restauración. *Cuadernos De Geografía De La Universitat De València*, 1(112), 131–149. <https://doi.org/10.7203/CGUV.112.29564>
- Proyecto SEDEXCHARE (s. f.). Observatorio del río Ebro. <https://observaebro.hypotheses.org/>
- Salas, S. (2015). *Propuesta de buenas prácticas en gestión de inundaciones para el municipio de Alcalá de Ebro (Zaragoza)*. [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/47264>
- Sánchez Fabre, M., Ballarín, D., Mora, D., Ollero, A., Serrano Notivoli, R., Saz, M.A. (2015). Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R. y Rodrigues, M. (Eds.) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 1853-1862. Universidad de Zaragoza y Asociación de Geógrafos Españoles.
- SITEbro. (s. f.). *Presentación*. <https://iber.chebro.es/sitebro/presentacion.htm#:~:text=presenta%20en%20este%20portal%20el,el%20medio%20hídrico%20de%20la>