

Cómo citar este trabajo: Trullenque Blanco, V., Montealegre Gracia, A.L., & Ollero Ojeda, A. (2022). Multi-temporal analysis of geomorphological processes and vegetation changes in a large gravel-bed channel: the Cinca River, Aragón (Spain). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (92). <https://doi.org/10.21138/bage.3111>

Análisis multi-temporal de los cambios geomorfológicos y de la cubierta vegetal en un cauce extenso de gravas: el río Cinca, Aragón (España)

Multi-temporal analysis of geomorphological processes and vegetation changes in a large gravel-bed channel: the Cinca River, Aragón (Spain)

Víctor Trullenque Blanco 

victortb@unizar.es

Antonio Luis Montealegre Gracia 

monteale@unizar.es

Alfredo Ollero Ojeda 

aollero@unizar.es

*Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza (España)*

Resumen

El curso medio-bajo del río Cinca ha sufrido importantes cambios en los últimos 90 años, tanto en la geomorfología de su cauce como en la vegetación que ocupa su Territorio Fluvial. En este estudio se han analizado los cambios observados entre las fotografías aéreas de nueve fechas distintas, desde 1927 a 2018, mediante fotointerpretación. Paralelamente, se ha analizado la hidrología, la extracción de gravas, la introducción de defensas y las roturaciones —entendidas

Recepción: 14.09.2021

Aceptación: 20.11.2021

Publicación: 11.03.2022

como la puesta en cultivo por primera vez de tierras eriales o montes descuajados— como factores de influencia sobre el sistema fluvial. Los resultados obtenidos evidencian una gran reducción de la superficie ocupada por el canal activo en beneficio de la vegetación riparia y de otras cubiertas antropizadas. El cauce se ha simplificado, viéndose reducida su superficie activa y pasando de tener un patrón trezado a otro divagante. Asimismo, la movilidad reciente es muy reducida y la lámina de agua ocupa la mayor parte del canal activo. En resumen, la reducción de la dinámica del amplio cauce de gravas del Cinca supone una notable pérdida de patrimonio natural en el marco hidrogeomorfológico de la Península Ibérica.

Palabras clave: geomorfología fluvial; vegetación riparia; cambio ambiental; territorio fluvial; imágenes aéreas.

Abstract

The middle to lower course of the Cinca River has undergone significant changes over the last 90 years, both in the geomorphology of its course and in the vegetation that occupies its Fluvial Territory. This study has analyzed the changes observed through the aerial photographs of 9 different years between 1927 and 2018 by means of photo-interpretation work. At the same time, hydrology, gravel mining, the introduction of defenses and ploughings —understood as the first cultivation of uncultivated or neglected land or woodlands— have been analyzed as factors that influence the river system. The results obtained demonstrate a large reduction in the area occupied by the active channel, to the benefit of riparian vegetation and other anthropized cover. The riverbed has been simplified, reducing its active surface area and moving from a braided pattern to a wandering one. Furthermore, current mobility is very low and the water surface occupies most of the active channel. In summary, the reduction in the dynamics of the wide gravel bed of the Cinca means a notable loss of natural heritage in the hydrogeomorphological framework of the Iberian Peninsula.

Key words: fluvial geomorphology; riparian vegetation; environmental change; fluvial territory; aerial images.

1 Introducción

Los sistemas fluviales son dinámicos y complejos. Específicamente, los ríos aluviales de gravas situados en el piedemonte de los sistemas montañosos presentan la máxima sensibilidad a las perturbaciones antrópicas y ambientales (Piégay et al., 2009; Ollero, 2011), por lo que su estudio evolutivo aporta una valiosa información para comprender y cuantificar el cambio global

registrado en las últimas décadas. La dificultad se encuentra en conseguir identificar y valorar las causas de los cambios observados, factores que pueden ser globales, de cuenca y locales, así como una combinación de todos ellos (Ibáñez et al., 2011).

Son abundantes los antecedentes de trabajos en los que se ha analizado la evolución de cauces dinámicos empleando imágenes aéreas y sensores remotos (e.g. Gilvear et al., 2000; Ollero, 2010; Michalková et al., 2011; Toone et al., 2014; Lallias-Tacon et al., 2017; Scorpio et al., 2018; Piégay et al., 2020; Carbonneau et al., 2020). Estos trabajos han constatado como en muchos ríos europeos se ha asistido en las últimas décadas, como consecuencia del cambio global (Goudie, 2006; Ollero, 2011; García Ruiz et al., 2015; Aristi, 2015), a un triple proceso de estrechamiento, simplificación y estabilización que suele traer consigo también la incisión (Baumgart-Kotarba, 1980; Liébault & Piégay, 2002; Manners et al., 2014; Ollero et al., 2015; Marquínez et al., 2018; Segura & Sanchís, 2018). En muchos casos la vegetación juega un papel importante en este proceso (Dufour et al., 2007; Cadol et al., 2011; Belletti et al., 2015; Surian et al., 2015), contribuyendo de forma decisiva a la estabilización sedimentaria y con ello a la simplificación geomorfológica.

Los cambios en la morfología general en planta, que también puede denominarse estilo fluvial (Brierley & Fryirs, 2005), también han sido objeto de estudio en casos muy significativos. Así, la pérdida del modelo o estilo trenzado en muchos ríos europeos ha sido puesta de relieve en numerosos trabajos (Bravard & Peiry, 1993; Surian & Rinaldi, 2003; Piégay et al., 2009), llegando a considerarse un estilo geomorfológico en peligro de extinción (Montgomery & Bolton, 2003; Wohl, 2006, 2019).

En el presente trabajo se ha seleccionado un tramo del río Cinca, afluente del río Ebro que discurre por el Pirineo y Prepirineo aragonés oriental, que ha sido objeto de estudio de numerosos trabajos de investigación hidromorfológica (Ollero et al., 2001, 2002; Escuer, 2004; Acín et al., 2005; Vilela, 2011; Muñoz-Narciso, 2014; Muñoz-Narciso et al., 2014, 2018; Llena et al., 2016, 2018, 2019, 2020; Béjar et al., 2018). Estos estudios han puesto de relieve el importante dinamismo de su cauce, el volumen de los procesos geomorfológicos registrados y los impactos de las infraestructuras hidráulicas, especialmente aguas abajo de embalses y derivaciones. Sin embargo, en estos trabajos se había prestado escasa atención a la vegetación en el cauce como indicador de la dinámica fluvial. Por otra parte, el tramo que se ha seleccionado en el presente estudio no ha sido estudiado en detalle hasta el momento (Figura 1). La característica principal de dicho tramo es la gran anchura del cauce (683 m de media),

superior a la de otros tramos del Cinca, y que alcanza 850 m de media en el sector de estudio seleccionado.

En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es cartografiar y cuantificar los cambios geomorfológicos y de la vegetación en el tramo fluvial seleccionado, de máximo interés por sus dimensiones, desde 1927 hasta 2018, tratando de explicar las causas a partir de varios factores que han podido intervenir en esta dinámica para comprobar si se ha asistido a un cambio irreversible de estilo fluvial.

2 Área de estudio

El río Cinca se encuentra en el cuadrante NE de la Península Ibérica (Figura 1), tiene una longitud de 177 km y una cuenca hidrográfica que abarca 9740 km² de superficie, siendo uno de los principales cursos fluviales de la cuenca del río Ebro. Tiene su cabecera en el circo glaciar de Pineta, a unos 2500 m de altitud y, tras atravesar la Cordillera Pirenaica, alcanza la Depresión del Ebro, donde confluye con el Segre para desembocar en el curso principal. El clima de la cuenca del Cinca es mayoritariamente de carácter mediterráneo, aunque con marcados rasgos de alta montaña en su cabecera. La precipitación media para el periodo 1940-1990, es de 850 mm/año, presentando valores entre 1323 mm/año en el norte de la cuenca y 403 mm/año en el sur. La evapotranspiración real media adopta valores de 650 mm/año en la cabecera y 800 mm/año en la desembocadura (CHE, 2008). Comparando ambos valores, se pone de manifiesto el carácter excedentario de la cabecera y deficitario en el resto de la cuenca, especialmente en la zona baja. En la cabecera del curso principal y de sus principales afluentes (Ara, Ésera) predominan los materiales silíceos alternados, mientras que aguas abajo predominan los materiales calcáreos. Ya dentro de la depresión del Ebro, los materiales por los que circula el río son sedimentarios (conglomerados, areniscas y, en menor medida, yesos).

El Cinca tiene un régimen estacional marcado, aunque muy modificado en su tramo medio y bajo por las importantes estructuras de aprovechamiento hidroeléctrico y de reserva de agua, principalmente para riegos (CHE, 2002a). Los caudales mayores se presentan en primavera y los menores en verano, concretamente en el mes de agosto (CHE, 2002a). El caudal medio diario (Q_{md}) en Fraga (estación de aforo de la parte inferior de la cuenca anterior a la confluencia con el Segre y el Ebro), es de 82 m³/s. Los caudales máximos estimados durante el siglo XX en Fraga registraron 3900 m³/s el 23 de octubre de 1907, 2600 m³/s el 29 de octubre de 1937 y 4194 m³/s el 9 de noviembre de 1982 (CHE, 2008; Serrano et al., 2013; Balasch et al., 2019). Los embalses de mayor importancia de su cuenca son los de Mediano (con una capacidad de

436 hm³) y El Grado (con una capacidad de 399 hm³) construidos en 1974 y 1969 respectivamente, sobre el propio río. También destaca el embalse de Barasona, que data de 1932 y cuenta con una capacidad de 92 hm³, y el de San Salvador, levantado en 2015 con capacidad para 135 hm³, ambos están localizados en la cuenca del río Ésera, el primero en el propio río y el segundo en derivación. Las principales derivaciones de caudal sin retorno son las del Canal del Cinca y el Canal de Aragón y Cataluña, con unos caudales de 70 m³/s y 40 m³/s, respectivamente (CHE, 2002b).

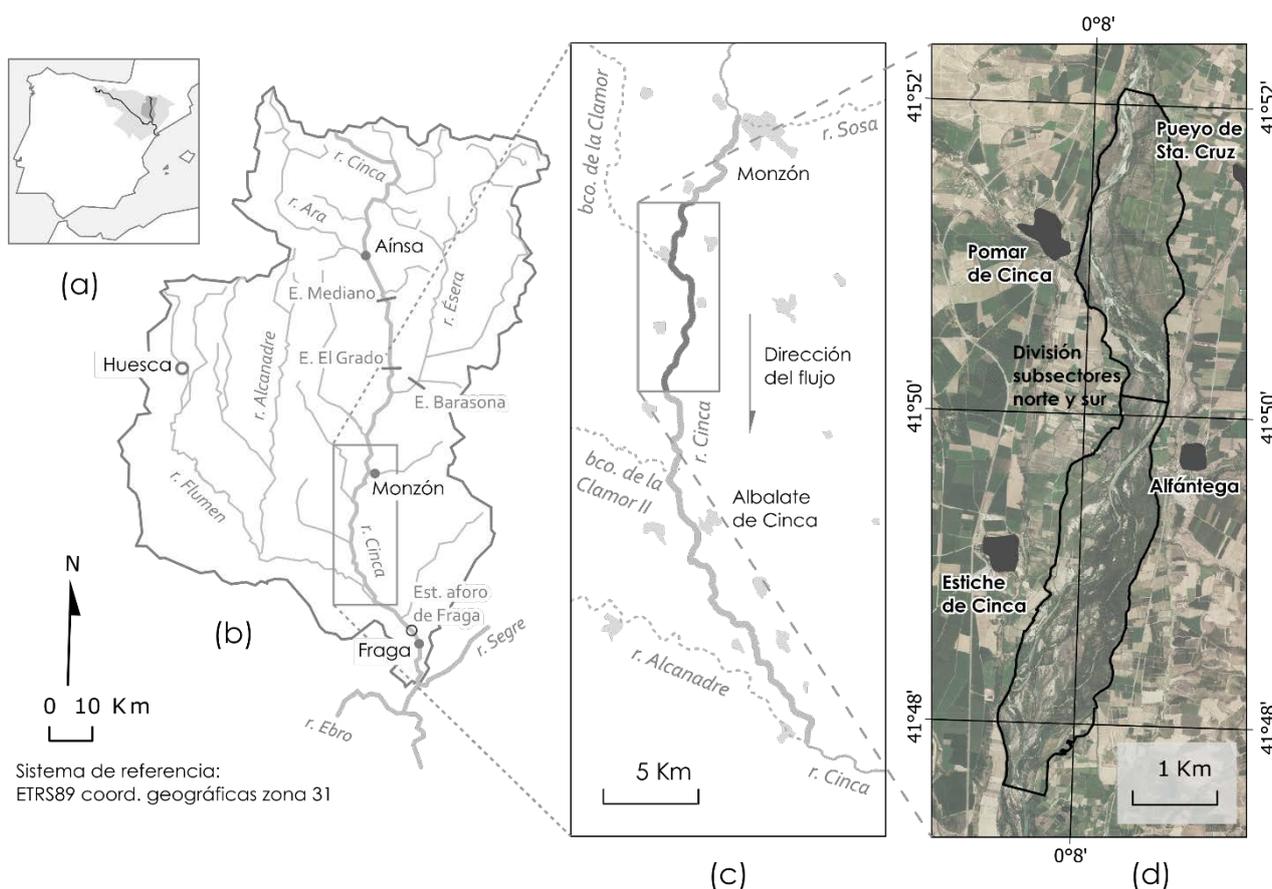
Actualmente, la vegetación de ribera del Cinca ocupa una amplia franja en los márgenes del cauce, formando una compleja comunidad que lo aísla de las zonas adyacentes, más antropizadas. Los chopos (*Populus nigra*), álamos (*Populus alba*) y una gran variedad de sauces (*Salix atrocinerea*, *S. elaeagnos*, *S. alba*, *S. babilonica*) están acompañados por zarzas (*Rubus caesius*, *Rubus ulmifolius*) y zonas con carrizo (*Phragmites australis*). La invasora caña común (*Arundo donax*) está también presente, y existen numerosas choperas de plantación (*Populus x canadiensis*) lindando con la ribera, utilizadas hasta hace poco como filtro verde (CHE, 2002b).

Más concretamente, el área de estudio se localiza en el curso medio-bajo del río Cinca, entre la confluencia del río Sosa, en la ciudad de Monzón, y la confluencia del río Alcanadre. Este tramo, ya aguas abajo de los embalses mencionados, alcanza 42 km de longitud, tiene una pendiente media de 0,004 m/m y un curso de trazado divagante en la actualidad. Hasta este tramo, el río tiene una cuenca de 4973 km², que representa un 51% de la superficie total de la cuenca. Dentro de este tramo se ha seleccionado un sector representativo, que aúna todos los impactos que se han dado en el sector medio-bajo del río Cinca, para llevar a cabo el estudio de detalle, de unos 8,7 km de longitud, 750 ha de superficie, una anchura media de 850 m y máxima de 1,3 km (Figura 1). A su vez, este sector se ha subdividido en dos subsectores (norte y sur; 59% y 41% de la superficie, respectivamente), debido al distinto grado de presión antrópica a nivel local al que han sido sometidos. Los términos municipales sobre los que se ubica son San Miguel de Cinca, Pueyo de Santa Cruz, Alfántega y Binaced. Los núcleos de población más próximos al cauce son los de Pomar de Cinca y Estiche de Cinca en la orilla derecha, y los de Pueyo de Santa Cruz y Alfántega en la izquierda (Figura 1).

En este sector se ha analizado el Territorio Fluvial, definido en la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos como el terreno dominado por un sistema fluvial en el que se incluye el cauce del río, el corredor ribereño y, total o parcialmente, la llanura de inundación (Ollero et al., 2009). Sumadas a los impactos hidrológicos que provienen de la cuenca, las principales alteraciones locales que se han producido en el interior del sector son: i) las detracciones de

caudales por medio de azudes para regar la vega del Cinca (Cortada, 1979), ii) la destrucción sistemática de la vegetación de ribera para obtener nuevas tierras de cultivo (CHE, 2002b), iii) la roturación del cauce para introducir plantaciones de chopo al amparo de la Ley de 18 de octubre de 1941, sobre repoblación forestal de las riberas de ríos y arroyos (Hernández, 1977), iv) las autorizaciones emitidas para la extracción de áridos (gravas) en las zonas de dominio público hidráulico por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), v) las obras de defensa que modifican el divagar natural del cauce del río (CHE, 2002a), así como vi) extracciones de gravas furtivas (no evaluadas en el presente trabajo por falta de información concreta para localizarlas), denunciadas por grupos ecologistas en las dos últimas décadas.

Figura 1. Localización del tramo de estudio y del sector de análisis de detalle. (a) Situación de la cuenca del Cinca respecto a la del Ebro y la España peninsular; (b) Localización del tramo de estudio respecto a la red hidrográfica; (c) Localización del sector de análisis de detalle; (d) Ortoimagen aérea del sector de análisis en agosto de 2018

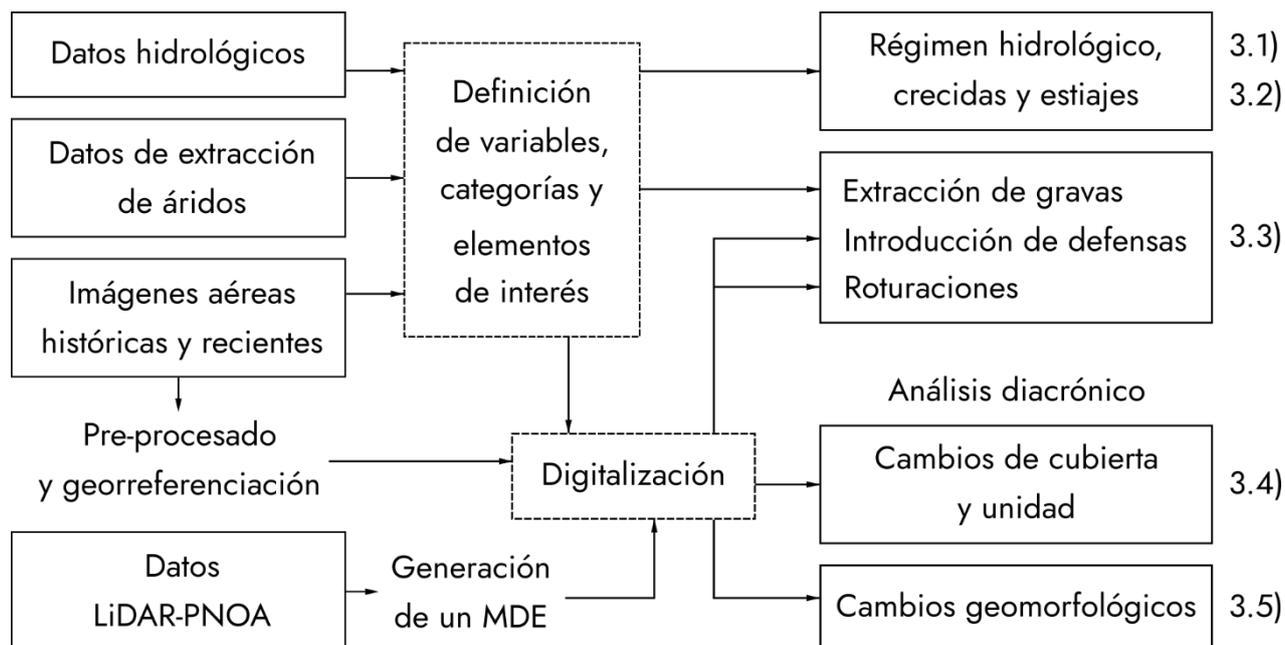


Fuente: elaboración propia a partir de CHE y CNIG

3 Materiales y métodos

En la Figura 2 se muestra el proceso metodológico para analizar la evolución geomorfológica y de las cubiertas vegetales del tramo medio-bajo del río Cinca en cada una de las fechas seleccionadas entre 1927 y 2018, poniendo en relación los cambios observados con el régimen hidrológico, la extracción de gravas, la introducción de defensas y las roturaciones.

Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada



Fuente: elaboración propia

3.1 Datos foronómicos y cálculo de variables hidrológicas

Los datos hidrológicos diarios han sido obtenidos de los registros del Servicio de Hidrología y Cauces de la CHE y del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) Ebro. A la hora de escoger el registro de aforo más adecuado al tramo, se ha tenido en cuenta su localización aguas abajo de los grandes embalses de la cuenca, la extensión temporal y años completos de la serie y la fiabilidad de las mediciones. Así, la estación de aforo del río Cinca en Fraga (A017) ha resultado la más idónea para caracterizar el área de estudio, aunque se localice fuera de ésta (aguas abajo). Su serie se inicia en 1929, contando con 89 años, de los que 52 son completos. No se han tenido en cuenta los posibles problemas de homogeneidad de la serie desde el cambio de ubicación de la estación en el año 2006, dando por correctos los datos suministrados por la CHE, que son considerados fiables por sus responsables técnicos.

Con esta información se ha analizado la influencia del sistema de regulación Mediano-El Grado (en funcionamiento desde 1974) en el régimen hídrico y en los elementos más destacables de la hidrología de cada uno de los periodos analizados de forma cuantitativa, prestando especial atención al efecto de las crecidas y los estiajes sobre la geomorfología y la cubierta vegetal del Territorio Fluvial. Para la realización de este análisis se ha tomado como referencia parte de la metodología empleada en el trabajo de Tuset et al. (2015), donde analizan la influencia de los embalses en el régimen hídrico y geomorfológico del tramo medio del río Segre.

La caracterización se ha llevado a cabo a través de dos grupos de variables. El primero está formado por el volumen anual de la esorrentía, la variabilidad de ésta, la estacionalidad mensual y el máximo caudal evacuado en un día del año (Tabla 1). Para su cálculo se ha partido de información continua, teniendo en cuenta únicamente los años hidrológicos completos disponibles pre y post embalses (Mediano-El Grado) y de los periodos analizados.

Tabla 1. Variables del régimen hidrológico con años hidrológicos completos

TEMPORALIDAD	VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Anual y mensual	Aportación	Aportación anual media ($\text{hm}^3/\text{año}$)
	Variabilidad	Diferencia entre la máxima y la mínima aportación mensual del año (hm^3)
	Estacionalidad	Meses de máxima y mínima aportación anual
	Magnitud	Media de los máximos caudales diarios anuales (Q_M)

Fuente: elaboración propia

El segundo grupo de variables corresponde a los eventos extremos (crecidas y estiajes) (Tabla 2). Al ser fenómenos puntuales en el tiempo, se ha partido del total de días con dato pre y post Mediano-El Grado y de los periodos analizados para evaluar su magnitud (sólo en el caso de las crecidas), frecuencia y duración (Tabla 2).

El nivel de *bankfull* (caudal formativo, Q_B) se ha calculado para los periodos pre y post Mediano-El Grado a través de la fórmula enunciada por Vilarroya & Xuclá (2003):

$$Q_B = (Q_M) \times [0,7 + (0,6 \times CV_{Q_M})]$$

donde Q_B es el caudal formativo, expresado en m^3/s , Q_M es la media de los máximos caudales diarios anuales, expresada en m^3/s y CV_{Q_M} es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales.

El caudal de estiaje se ha calculado como la mitad del caudal medio del mes menos caudaloso de los periodos pre y post Mediano-El Grado, teniendo en cuenta solamente para el cálculo los meses completos.

Tabla 2. Variables del régimen hidrológico con todos los días con dato

TEMPORALIDAD	VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Diario (crecidas)	Magnitud	Caudal máximo del periodo (m^3/s)
	Frecuencia	Número de días/año del periodo sobre el nivel de <i>bankfull</i>
	Duración	Máximo número de días consecutivos del periodo sobre el nivel de <i>bankfull</i>
Diario (estiajes)	Frecuencia	Número de días/año del periodo bajo el umbral de nivel de estiaje
	Duración	Máximo número de días consecutivos del periodo bajo el umbral de nivel de estiaje

Fuente: elaboración propia

También se ha analizado la capacidad reguladora de los embalses aguas arriba del área de estudio. Se han empleado los hm^3 embalsables al inicio y al final del periodo, o del periodo si es que no ha habido ningún cambio.

3.2 Extracción de gravas

La información relativa a la extracción de gravas (sedimentos del lecho fluvial, generalmente de calibre grueso) en el interior del Dominio Público Hidráulico, procede de una petición expresa a la CHE. Los datos están agrupados por licencias de autorización expedidas para cada municipio con su correspondiente volumen de extracción y año. La disponibilidad temporal abarca el periodo comprendido entre 1974 y 2018. Se ha considerado que el volumen realmente extraído y el autorizado son coincidentes y que se ha realizado en la fecha indicada. Con esta información se ha calculado la cantidad de sedimentos extraídos del cauce, tanto para el total de la serie estudiada como para cada uno de los periodos analizados.

3.3 Cartografía de cambios mediante fotografías aéreas históricas y recientes y datos LiDAR-PNOA

La cartografía de los cambios en la geomorfología y en las cubiertas vegetales del sector de estudio se ha llevado a cabo mediante imágenes aéreas procedentes del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), de la Fototeca Digital del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de la CHE. Para seleccionarlas se ha tenido en cuenta la disponibilidad de fechas, el estado del río en el momento de realización de los vuelos, la resolución espacial (calidad visual de la imagen) y la resolución espectral (B/N o RGB). El lapso temporal estudiado comprende desde el

año 1927 al 2018. En la Tabla 3 quedan recogidas las fechas, las características técnicas de las imágenes y el caudal del río en la estación de aforo de Fraga (según disponibilidad del dato). El vuelo interministerial, que capturó el área de estudio en marzo del año 1978, no ha sido utilizado debido a que, en el momento de la realización del vuelo, el río aparecía demasiado crecido.

Se han tenido que realizar operaciones de pre-tratamiento a las imágenes de 1927, 1946, 1981, 1989 y 2015 relacionadas con el recorte de bordes y marcos de los fotoplanos y fotogramas donde aparece determinada información (fecha y altura del vuelo, marcas fiduciales, etc.) y la mejora del brillo y contraste. Asimismo, ha sido necesario georreferenciar, a través de un modelo empírico, las imágenes de 1927, 1946, 1981 y 1989 mediante el programa ArcMap 10.5®. Para las dos primeras se tuvo como referencia el ortomosaico del Vuelo AMS-B de 1956 con el fin de poder encontrar un mayor número de localizaciones estables en el tiempo, y para las dos últimas se tomó el ortomosaico del Vuelo SIGPAC de 2003. El sistema de coordenadas escogido fue el ETRS89 UTM Zona 31 (EPSG 25831).

Tabla 3. Características técnicas de las fotografías aéreas históricas y recientes y datos de caudal medio diario (m^3/s) en la estación de aforo del río Cinca en Fraga para los días de vuelo

DENOMINACIÓN	FECHA			RESOLUCIÓN ESPACIAL	ESCALA	FUENTE	COLOR	Q_{md} (m^3/s)
	AÑO	MES	DÍA/S					
Fotoplanos CHE	1927*	Febrero y/o agosto	-	-	1:10 000	CHE	B/N	-
Fotogramas vuelo AMS-A	1946	Febrero	24 y 25	-	1:43 000	Fototeca Digital	B/N	-
Hojas vuelo AMS-B	1956	Agosto	1 y 17	0,5 m	1:32 000	CNIG	B/N	8 y 17
Fotogramas vuelo nacional	1981	Octubre	-	-	1:30 000	CNIG	B/N	-
Fotogramas vuelo Cinca	1989	Noviembre	-	-	1:10 000 (aprox.)	CHE	B/N	-
Hojas SIGPAC	2003	Julio	-	0,5 m	1:30 000	CNIG	RGB	-
Ortofotografías PNOA	2009	Agosto	15	0,45 m	1:30 000	CNIG	RGB	52
	2015	Mayo	29 y 30	0,45 m	1:30 000	CNIG	RGB	27 y 28
	2018	Agosto	-	0,25 m	1:15 000	CNIG	RGB	-

Leyenda: * Fecha sin confirmar.

Fuente: elaboración propia

Los puntos de control (PCs) para la georreferenciación han sido seleccionados de acuerdo con los siguientes criterios de localización:

1. En las márgenes entre parcelas agrícolas, evitando los bordes de caminos, carreteras y construcciones por ser más susceptibles de sufrir modificaciones o alteraciones (Parrizas, 2016).
2. Cercanía al límite del Territorio Fluvial (zona de interés), generando una distribución longitudinal de puntos alrededor de éste y no de forma homogénea a lo largo de toda la imagen (Hughes et al., 2006; Parrizas, 2016; Lallias-Tacon et al., 2017).
3. Distribución en zonas donde el terreno es accidentado (escarpes), para realizar un buen despliegue espacial de puntos a diferentes cotas (Parrizas, 2016).

Se han tomado entre 15 y 46 PCs por fotoplano/fotograma. La función de transformación empleada fue la de *Spline*, no polinomial, que se demuestra la más efectiva para este tipo de ambientes (Marqués, 2018). A la hora de evaluar la calidad de la georreferenciación se ha tenido en cuenta el Error Cuadrático Medio (ECM) de cada una de las coordenadas de los PCs.

Una vez procesadas las imágenes, se ha llevado a cabo la identificación visual (basada en el tono, color, textura, forma y tamaño) y la consiguiente digitalización, para cada una de las fechas, de los siguientes elementos:

1. Perímetro del Territorio Fluvial y línea divisoria de los subsectores norte y sur del sector de análisis siguiendo el criterio definido en el apartado 2.1.
2. Defensas longitudinales (motas y escolleras) y azudes, al tratarse de infraestructuras lineales de origen antrópico que afectan al cauce y son un indicador de la presión antrópica a la que es sometido el río Cinca en el sector de análisis.
3. Unidades y cubiertas que ocupan el Territorio Fluvial (Tabla 4), ya sean naturales o antropizadas. Estas categorías han sido definidas teniendo como referencia distintos trabajos (Serrano & Longares, 2010; Acín et al., 2011; Belletti et al., 2014; Lallias-Tacon, 2017), aunque con ligeras diferencias debido a las peculiaridades del área de estudio.
4. Línea ideal de flujo y secciones transversales a la misma, cauces activos (principal y secundarios) y superficie movilizada.

La escala de trabajo ha sido variable (1:750-1:2000) en función de la morfología en planta del elemento y su complejidad a la hora de distribuirse por el terreno. El perímetro del Territorio Fluvial se ha delimitado tomando como base la máxima extensión del canal activo (CA) y el corredor ribereño (CR) de todo el periodo junto a las zonas alteradas (ZA) erosionadas.

Tabla 4. Unidades y cubiertas digitalizadas sobre el Territorio Fluvial

UNIDAD	CUBIERTA		
	CÓDIGO	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
Canal activo (CA)	LAa	Lámina agua activa	Masas de agua con corriente.
	LAe	Lámina agua estancada	Masas de agua sin corriente.
	BA	Barras activas	Depósitos de sedimentos desprovistos de vegetación.
Corredor ribereño (CR)	VC	V. colonizadora	Árboles y arbustos sueltos (<i>Populus nigra</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Tamarix gallica</i>) colonizando depósitos desnudos de sedimentos.
	VCh	V. colonizadora con tapiz herbáceo seco	Árboles y arbustos sueltos (<i>Populus nigra</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Tamarix gallica</i>) sobre un tapiz herbáceo seco de cascajar.
	VHs	V. herbácea seca	Vegetación herbácea seca de cascajar (<i>Helichrysum stoechas</i> , <i>Dittrichia viscosa</i> , <i>Foeniculum vulgare</i> , <i>Xanthium echinatum</i> , etc.).
	VHg	V. higrófila (praderas / carrizal / juncal)	Combinaciones de vegetación húmeda: herbáceas ligadas al agua (<i>Paspalum paspalodes</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i> , etc.), carrizal (<i>Phragmites australis</i> , <i>Thypha latifolia</i>) y juncal (<i>Scirpus holoschoenus</i>).
	VR	V. riparia densa	Formaciones de ribera continuas (<i>Populus sp.</i> , <i>Salix sp.</i> , etc. y sotobosque de <i>Rubus sp.</i> , <i>Rosa canina</i> , etc.).
	C	Cañas	Formaciones de <i>Arundo donax</i> *.
Zonas alteradas (ZA)	Cu	Cultivos en regadío	Parcelas en regadío cultivadas o recién roturadas.
	CP	Combinación de pastos	Praderas húmedas irrigadas, pastos secos y pastos con arbolado diseminado aprovechados por ganado (ovino).
	Ch	Choperas	Plantaciones de chopo en distintas fases de su ciclo de producción y/o abandonadas.
	Rp	Repoblación de pinos	Repoblación de <i>Pinus halepensis</i> .
	EG	Extracciones de grava	Zonas de extracción de gravas.
	Ed	Edificaciones	EDAR de Pomar de Cinca y caseta de aperos forestales.

Leyenda: *Esta cubierta sólo ha sido digitalizada desde 2003 en adelante, por ser solo reconocible en fotografías aéreas en color.

Fuente: elaboración propia

Para facilitar la localización y digitalización de defensas longitudinales y azudes, se ha generado una cobertura de pendientes a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de un tamaño de celda de 1x1 m que se ha obtenido a partir de las nubes de puntos del vuelo LiDAR-PNOA de 2016. Para ello se han filtrado los puntos según su clasificación (suelo y último retorno) y se han interpolado con el método "TIN a ráster" (Vosselmann & Maas, 2010).

Para estudiar los impactos antrópicos a nivel local se han analizado las superficies y longitudes de los elementos introducidos a lo largo de los subsectores norte y sur, teniendo en cuenta el periodo durante el cual se han erigido. Los ocho periodos de análisis son: 1927–1946, 1946–1956, 1956–1981, 1981–1989, 1989–2003, 2003–2009, 2009–2015 y 2015–2018.

Una vez digitalizadas las unidades y cubiertas del Territorio Fluvial se ha analizado su evolución entre 1927 y 2018, prestando especial atención a su distribución en el espacio y a la superficie. Se han estudiado las distintas cubiertas que ocupan el Territorio Fluvial por separado y la migración que se ha dado a lo largo del tiempo entre las unidades del Territorio Fluvial a través de un análisis de superposición espacial.

A partir de los elementos digitalizados citados anteriormente, se han evaluado los cambios geomorfológicos producidos en el sector de análisis entre 1927 y 2018 considerando los siguientes parámetros:

- Superficie movilizada. Se define como la superficie modificada entre la orilla del cauce en la fotografía de inicio del período y la misma orilla del cauce en la fotografía final del período (Downward et al., 1994).
- Intensidad de trezado. Representa el cociente de la longitud del total de cauces activos entre la longitud del cauce activo principal (Muñoz-Narciso, 2014).
- Índice de recuento de cauces activos. Es el promedio de cauces activos medidos en cada sección, en este caso, por sector y subsectores (Egozi & Ashmore, 2008).
- Índices de trezado y anastomosado. En el primero de ellos se contabilizan el número de cauces activos separados por barras activas, y en el segundo los cauces activos separados por barras colonizadas por vegetación. El umbral que se debe superar para considerar a un río trezado o anastomosado es de 1,5; en caso contrario se considerarían como divagantes (MacDonald et al., 1992). Es necesario señalar que los cauces anastomosados, además de presentar una cubierta vegetal bien desarrollada, poseen una gran sinuosidad y sus sedimentos están compuestos de material fino (limos) (Makaske, 2001), lo cual no se da en el río Cinca en este tramo.
- Ratio de trezado. Es el cociente entre el área total de barras activas (BA) y el área total de la lámina de agua activa (LAa). Unos valores más altos indican una mayor presencia de barras respecto al cauce (Ozturk & Sesli, 2015), lo que evidencia la libertad del río para poder modificar su curso durante las crecidas formativas. Cuanto mayor sea la relación, mayor movilidad potencial tendrá el cauce en la fecha analizada y mayor capacidad para cambiar su patrón de drenaje.
- Índice de sinuosidad. Cuantifica el grado de sinuosidad del río (en caso de tener patrón unicanal) o del cauce principal (si tiene patrón multicanal), al realizar el cociente entre la

longitud del río o cauce principal y la línea ideal de flujo. Si se obtiene un valor inferior a 1,05 se trata de un río rectilíneo, si está entre 1,05 y 1,5 se considera sinuoso, y si es superior a 1,5 indica que es un río meandriforme (Ghosh & Mistry, 2012).

La mayoría de estos parámetros son dependientes del caudal que fluye por el río en el momento de la realización de cada fotografía aérea, pese a lo cual las tendencias globales deberían mantenerse.

4 Resultados

4.1 Análisis hidrológico pre (1948–1973) y post (1974–2018) entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado

La serie de datos de caudal medio diario (Q_{md}) comienza en 1929 y se prolonga hasta 2018, aunque solo se ha valorado de 1948 en adelante porque anteriormente solo había datos para 1929–1931, no siendo ninguno de estos años completo. Para el periodo pre y post Mediano-El Grado hay 26 y 30 años hidrológicos completos, respectivamente. Si se tiene en cuenta el número total de días con dato de ambos periodos, para el primero de ellos representan un 100% y para el segundo un 73%.

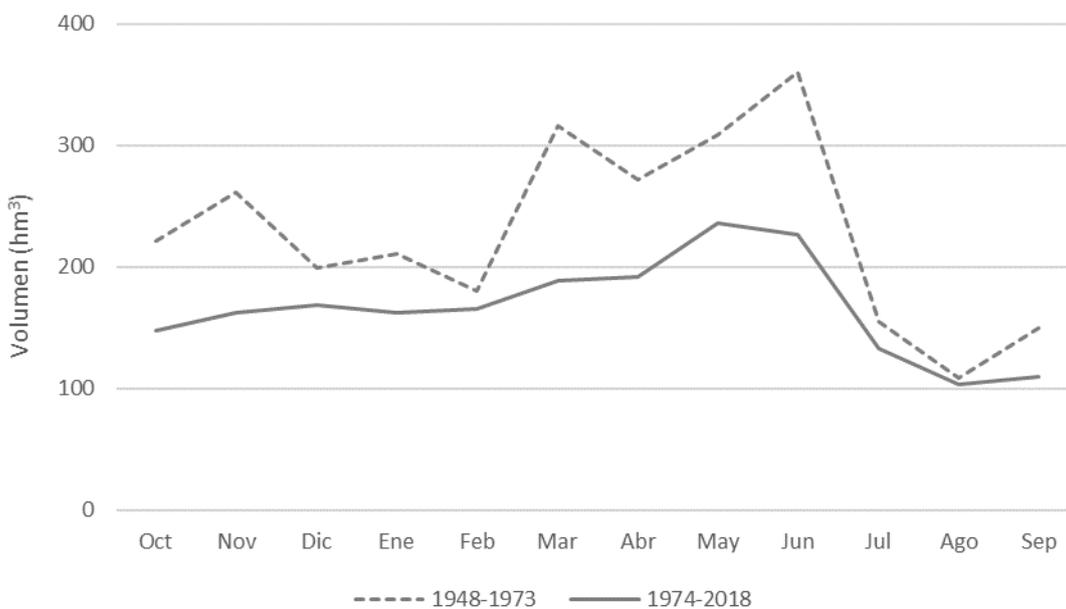
Antes de la entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado (entre 1948 y 1973), la aportación media anual del río Cinca en Fraga era de 2745 hm^3 , la variabilidad interanual era elevada (i.e. $\sigma=1089 \text{ hm}^3$, $n=26$; σ es la desviación estándar y n el número de años hidrológicos completos disponibles) y se observaba una gran diferencia entre el valor máximo y mínimo de la serie (4746 hm^3 y 483 hm^3 , respectivamente). El régimen hidrológico presentaba tres picos: dos primaverales en marzo y junio asociados a las lluvias de primavera y el deshielo, de mayor entidad, y otro en noviembre, este último de menor importancia y asociado a las precipitaciones otoñales y gotas frías de influencia mediterránea (Figura 3). Hay dos mínimos, uno estival entre julio y septiembre, y otro invernal, de diciembre a febrero, este último causado por la retención del agua en forma de nieve.

Posteriormente, entre 1974 y 2018, la aportación media anual del río Cinca en Fraga disminuyó en un 27% hasta un valor de 1997 hm^3 , la variabilidad interanual permaneció elevada, aunque algo menor que en el periodo anterior (i.e. $\sigma=815 \text{ hm}^3$, $n=30$; σ es la desviación estándar y n el número de años hidrológicos completos disponibles) y se aprecia una gran diferencia entre el valor máximo y mínimo de la serie (4221 hm^3 y 729 hm^3 , respectivamente) pese a que los valores sean menos extremos (Tabla 5). El régimen hidrológico muestra solamente un pico, en

primavera, adelantado al mes de mayo y de mucho menor volumen, y sólo un mínimo, ubicado en la época estival, que mantiene el mínimo en agosto (Tabla 5). Estos cambios de estacionalidad están asociados a la detracción de caudales por parte de los embalses (reserva de agua para la campaña de riego en los meses de abril-septiembre).

Las mínimas aportaciones mensuales absolutas de ambos periodos estudiados no son muy dispares (14 hm³ en enero de 1964 y 11 hm³ en septiembre de 1997), pero las máximas sí que se han reducido notablemente, pasando de 1184 hm³ en octubre de 1960 a 670 hm³ en junio de 1979. La variabilidad en la aportación mensual entre ambos periodos se ha reducido en un 40%, pasando de $\sigma=192$ hm³ entre 1948 y 1973 a $\sigma=116$ hm³ después. Hay un suavizado de la variabilidad anual (i.e. diferencia entre los meses de máxima y mínima aportación), que se reduce un 47%, pasando de 252 hm³ a 133 hm³ (Tabla 5). Asimismo, los caudales máximos anuales se han reducido en un 50% con la entrada en funcionamiento de los grandes embalses (Tabla 5), aunque posteriormente se da un ligero aumento de la variabilidad, $\sigma=323$ m³/s frente a $\sigma=350$ m³/s, respectivamente.

Figura 3. Hidrograma de la aportación media mensual (hm³) del río Cinca a su paso por Fraga antes (1948–1973) y después (1974–2018) de la entrada en funcionamiento del sistema Mediano-El Grado



Fuente: elaboración propia

En contraposición a la media de los caudales máximos anuales, el caudal máximo medio diario medido antes de Mediano-El Grado es menor que el de después, 1426 m³/s en octubre de

1965 frente a 2347 m³/s en noviembre de 1982 (Tabla 5). El umbral para contabilizar las crecidas formativas es superior antes de entrar en funcionamiento Mediano-El Grado ($Q_B = 754 \text{ m}^3/\text{s}$ frente a $496 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente), algo normal teniendo en cuenta que es dependiente de la media de los máximos caudales diarios anuales (Q_M). Pese a reducirse el caudal de las crecidas formativas, el número de días sobre el nivel de *bankfull* por año se reduce, pasando de 2,0 a 0,45 días/año. El mayor número de crecidas formativas al año se da antes de la entrada en funcionamiento de Mediano-El Grado, con 10 días en 1960, mientras que después de la creación de ambos embalses ese valor es menor, 4 días en el año 1977. La duración máxima de las crecidas en el periodo 1948–1973 es de 3 días consecutivos (este hecho se produce en tres ocasiones distintas); en el periodo 1974–2018 la duración máxima es de 2 días (seis ocasiones distintas), aunque es necesario señalar que las crecidas de dos días consecutivos antes de Mediano-El Grado también son más recurrentes (9 ocasiones distintas). Las crecidas formativas en 1948–1973 se dan principalmente en otoño (46% entre octubre y noviembre) y primavera (26% entre marzo y abril). Sin embargo, en 1974–2018 la estacionalidad cambia, disminuyendo la importancia otoñal (25%), desplazando el pico primaveral (pasando a junio y julio con un 25%) y concentrándose en diciembre-febrero con un 40%.

Los meses tomados como valor umbral para contabilizar los días de estiaje son enero de 1964 ($Q_{md} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1948–1973 y septiembre de 1997 ($Q_{md} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1974–2018. El estiaje antes de la entrada en funcionamiento de Mediano-El Grado es común, dándose entre los años 1948 y 1964 y caracterizándose por tener una duración máxima menor (42 días seguidos en el año 1964, entre los meses de enero y febrero) que después de la creación de estos embalses (75 días seguidos en el año 1997, entre los meses de julio a noviembre). En términos absolutos, el estiaje es más común antes (1948–1973) que después (1974–2018) (314 frente a 92 días en total) y está más repartido en el tiempo (se da entre los años 1948 y 1964 antes y solamente en dos años, 1997 y 2012, después). Antes hay periodos sucesivos de estiaje interrumpidos por episodios de crecida y estacionalmente se dan tanto en verano-otoño (el 71% de estiajes se concentran en los meses de agosto-noviembre, siendo agosto el máximo representante con 109 días) como en invierno.

Tabla 5. Análisis del régimen hidrológico y los eventos extremos (crecidas y estiajes) del régimen hídrico del río Cinca a su paso por Fraga antes (1948-1973) y después (1974–2018) de la entrada en funcionamiento del sistema Mediano-El Grado

	PERIODO 1948–1973	PERIODO 1974–2018
Aportación media anual (hm ³)	2745	1997
Meses de máxima y mínima aportación	Jun-Ago	May-Ago
Variabilidad anual (hm ³)	252	133
Media de los caudales máximos anuales (m ³ /s)	811	401
Q _{md} máximo del periodo (m ³ /s)	1426	2347
Número de días de crecida formativa/año	2,0	0,45
Número de días de estiaje/año	12,6	2,0
Máximo número de días de crecida formativa consecutivos	3 (x3)	2 (x6)
Máximo número de días de estiaje consecutivos	42	75

Fuente: elaboración propia

4.2 Análisis hidrológico por períodos

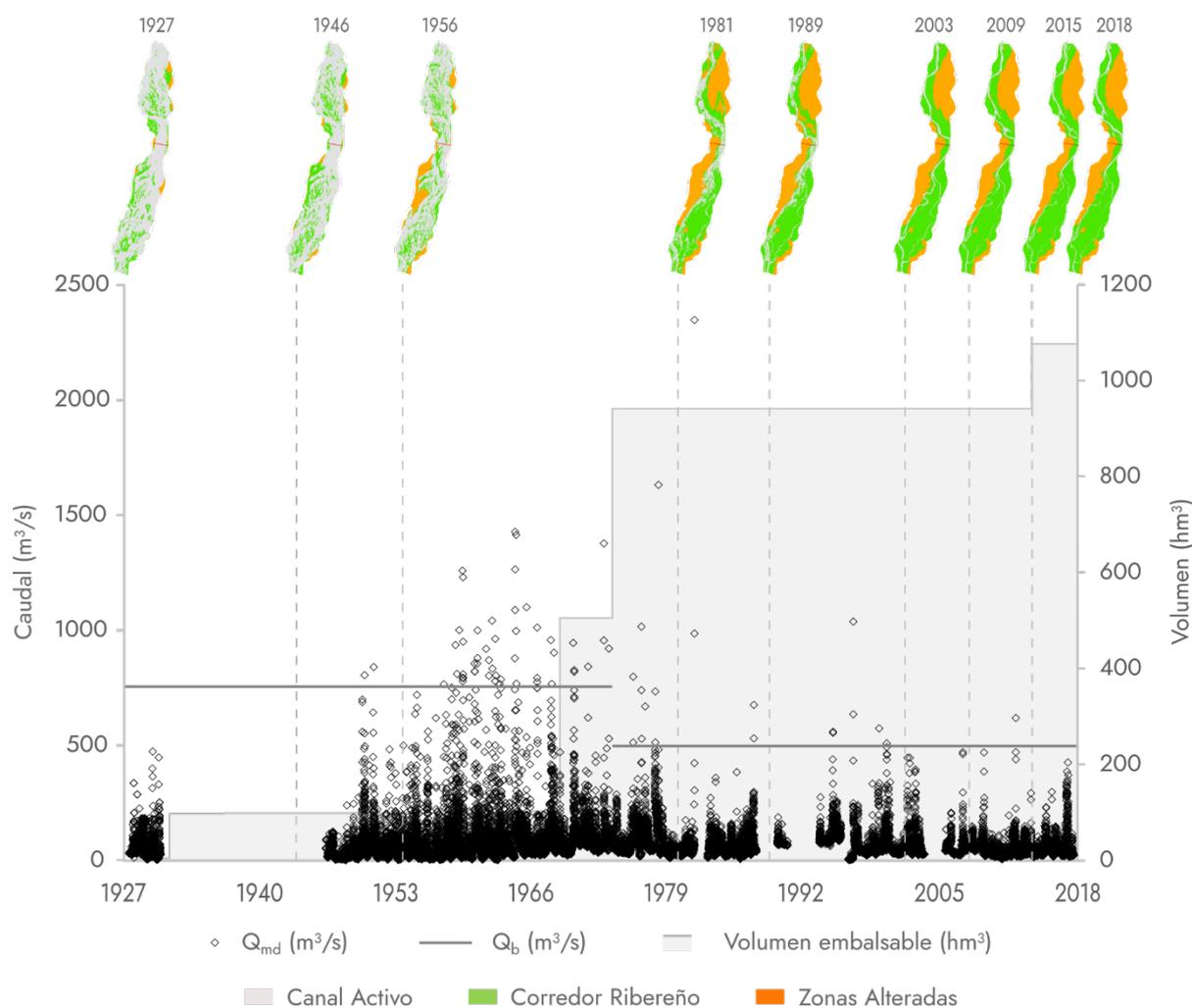
A continuación, se describen los cambios hidrológicos observados en los ocho períodos de análisis. Para valorarlos en su contexto, hay que tener en cuenta que el volumen embalsable de la cuenca hidrográfica del río Cinca aguas arriba del área de estudio pasó de menos de 1 hm³ hasta 98 hm³ en 1932 (embalse de Barasona en el río Ésera); ascendió hasta los 942 hm³ con los embalses de El Grado (1969) y Mediano (1974) en el Cinca, y alcanzó su máximo valor (1077 hm³) en 2015 con el embalse de San Salvador (aguas procedentes del Ésera, en derivación) (Figura 4).

1. Entre 1927 y 1946 solamente había datos de caudal para 1929-1931, aunque no se llegó a tomar registro de ningún año hidrológico al completo. Como mínimo, se dieron dos crecidas extraordinarias en 1937 y 1942 (Raluy, 1982; CHE, 2008).
2. Entre 1946 y 1956 (todos los días con dato a partir de 1948) la aportación media anual es de 1919 hm³. Sólo se producen dos crecidas formativas en los meses de abril y mayo de 1951 y 1952 (Figura 4) (0,2 días/año) y se producen 12,5 días de estiaje/año. Los únicos años sin episodios de estiaje son 1952, 1953 y 1955.
3. Entre 1956 y 1981, todos los días con dato, la aportación media anual es de 2979 hm³, la más elevada de toda la serie estudiada pese a entrar en funcionamiento los embalses de El Grado y Mediano. A su vez, en este periodo se produce la mayor cantidad de crecidas formativas de toda la serie, 57 (2,3 días/año), y de episodios de estiaje, 189 días (7,6 días/año), de los cuales 42 se dan de forma consecutiva en 1964.

4. Entre 1981 y 1989 (4 años hidrológicos completos) la aportación media anual disminuye hasta los 2009 hm³ y la variabilidad anual desciende considerablemente respecto al periodo anterior (pasa de 254 a 134 hm³). En este periodo no hay episodios de estiaje y el número de crecidas formativas desciende a 0,5 días/año. Pese a ello, se da la crecida de mayor magnitud de toda la serie estudiada ($Q_{md} = 2347 \text{ m}^3/\text{s}$). Los meses de máxima y mínima aportación son junio y agosto, al igual que los dos periodos anteriores.
5. El periodo 1989–2003 es el de menor porcentaje de días con dato (52%) y años hidrológicos completos de la serie (6 de 14), descontando el periodo 1927–1946. Se producen 6 crecidas formativas (0,4 días/año) y 89 días de estiaje (6,4 días/año), de los cuales 75 son consecutivos. Los meses de máxima y mínima aportación son mayo y julio.
6. Entre 2003 y 2009 (4 sobre 6 años hidrológicos completos y 67% de días con dato) no hay episodios de crecida ni estiaje. La aportación media y variabilidad anuales son de 1836 y 114 hm³ respectivamente, y los meses de máxima y mínima aportación son abril y septiembre.
7. Entre 2009 y 2015 (5 sobre 6 años hidrológicos completos y 92% de días con dato) tan sólo se produce una crecida formativa, el día 20 de junio de 2013 (0,2 días/año), y 3 días de estiaje (0,5 días/año). La aportación media y variabilidad anuales son las más bajas de la serie estudiada, con 1229 y 73 hm³ respectivamente.
8. En el periodo 2015–2018 hay dato para todos los días y se da un repunte de la aportación media y variabilidad anuales, con 1929 y 276 hm³ respectivamente. Por otro lado, no se producen crecidas formativas ni episodios de estiaje.

Por consiguiente, se puede afirmar que el régimen hidrológico del río Cinca presenta cambios de comportamiento a lo largo de la serie temporal estudiada: mayores episodios de crecida formativa, especialmente en el periodo 1956–1981, y estiaje, en los periodos 1946–1956 y 1956–1981, antes de la entrada en funcionamiento de los grandes embalses de la cuenca, y menor número de ambos eventos posteriormente (i.e. sólo se da una crecida formativa en los tres últimos periodos de la serie y el 97% de los días de estiaje se concentran en un sólo año en los 4 últimos periodos).

Figura 4. Evolución de las unidades del sector de estudio en relación con el caudal medio diario (Q_{md}) del río Cinca en Fraga entre 1927 y 2018, de los caudales de crecida formativa (Q_b) antes y después de la entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado, y del volumen embalsable de la cuenca aguas arriba del área de estudio



Fuente: elaboración propia

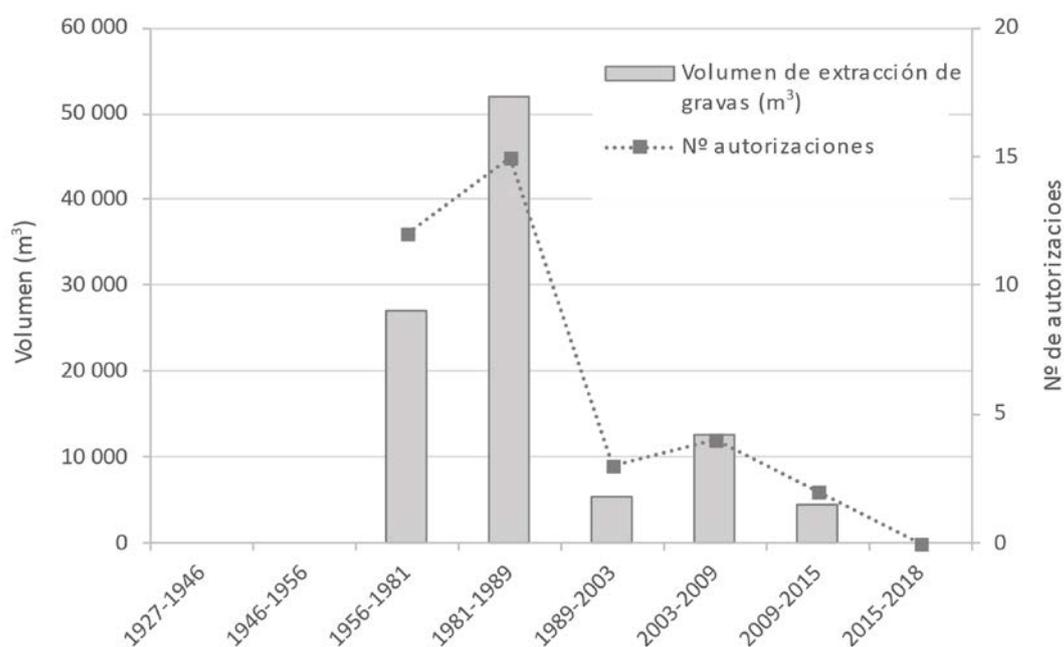
4.3 Afecciones producidas por la extracción de gravas, roturaciones e introducción de defensas y azudes

Según la información disponible, entre 1975 y 2018 se han extraído oficialmente $101\,611\,m^3$ de gravas en el sector de estudio (8,7 km aprox.). Esta cifra supone un 20% del volumen total extraído en el conjunto del tramo de estudio (42 km aprox.). La tasa de extracción media es de $2363\,m^3$ anuales, aunque la cifra anual de extracción es muy variable. El tipo de sedimento es de carácter grueso, correspondiente con la carga de fondo transportada por el río de forma natural. La extracción de unos volúmenes tan elevados hace suponer que se haya producido un

déficit en los sedimentos transportados en la cuenca, lo que podría derivar en procesos de incisión.

Los mayores volúmenes extraídos se concentran en el periodo 1981–1989, suponiendo un 51% del total extraído, donde destaca el año 1986, con 32 000 m³ repartidos en 15 autorizaciones distintas (Figura 5). También destacan los repuntes de 1979, con 8000 m³, y de 2007, con 11 865 m³. En la Figura 6 se pueden apreciar las superficies en las que se han realizado las extracciones, localizadas predominantemente en el subsector norte, con un 97% del área de extracción.

Figura 5. Extracción de gravas en el sector de estudio del río Cinca entre 1927 y 2018



Fuente: elaboración propia

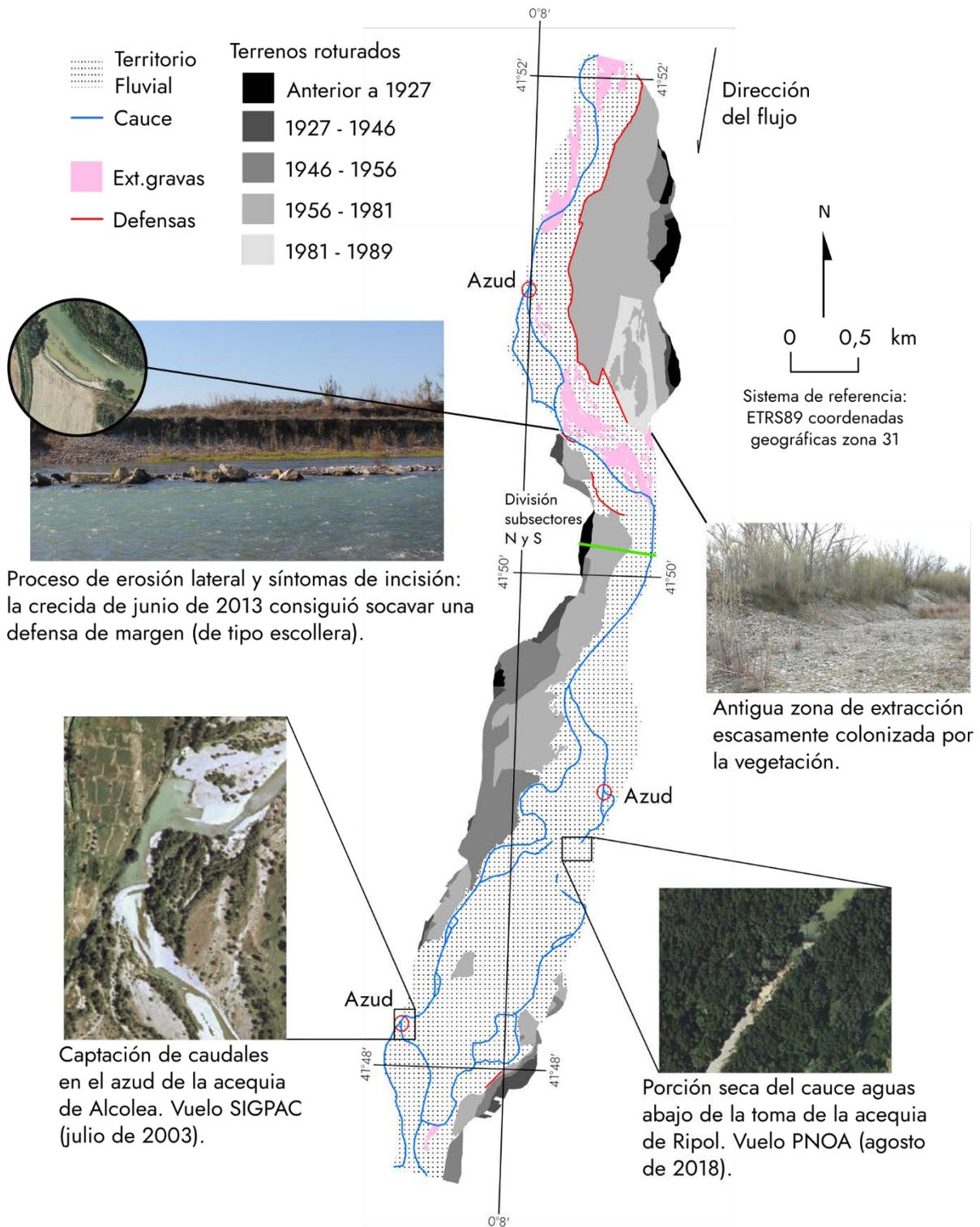
Lamentablemente no se disponen datos anteriores a 1975, pero es de suponer que con los trabajos de roturación del cauce para introducir choperas de plantación y el levantamiento de motas y escolleras para la defensa de estas, iniciadas en 1954, toda esa superficie sobre la que el río podía fluir libremente erosionando y depositando sedimento dejó de ser accesible, reduciéndose consecuentemente el volumen sedimentario movilizable.

Con anterioridad a 1927 había roturadas 22,8 ha en el interior del perímetro del Territorio Fluvial. Entre 1927 y 2018 se han roturado 290,3 ha. La superficie del subsector norte supone el 52% y la del sur el 48% restante. Los trabajos se concentraron íntegramente entre los años 1927 y 1989.

Atendiendo a los periodos de análisis, en el que más tierras de cultivo se obtuvieron fue el de 1956–1981, con 193,5 ha roturadas, con 193,5 ha roturadas en total (124,2 ha en el subsector norte y 69,3 ha en el subsector sur). A su vez, las defensas contra el río erigidas sobre el Territorio Fluvial corresponden a escolleras (protección de márgenes y taludes) y motas (protección de áreas roturadas para evitar la inundación). En las tres primeras fechas analizadas (1927, 1946 y 1956) no se ha podido apreciar a través de la fotointerpretación ningún elemento defensivo en el Territorio Fluvial. En cambio, en el año 2018 las defensas tenían una longitud de 3,6 km. Fueron construidas mayoritariamente entre 1956 y 1981 (2,8 km), asociadas a la conservación de las choperas de plantación, y entre 1981 y 1989 (1,3 km), tras la crecida de 1982. La longitud total no ha sido constante en el tiempo debido a la destrucción de algunos segmentos a causa de los eventos de crecida. Entre 1989 y 2003 se destruyeron 0,4 km y tras la riada de 2013 se inutilizaron 0,1 km (Figura 6). Las defensas se concentran mayoritariamente en el subsector norte (97% del total), que ha sido objeto de las mayores alteraciones en el Territorio Fluvial.

En el sector de estudio hay tres azudes, uno en el subsector norte (toma de la acequia de Pomar de Cinca) y dos en el subsector sur (toma de la acequia de Ripol en la margen izquierda y toma de la acequia de Alcolea en la margen derecha; Figura 6). Estos azudes deben ser reconstruidos tras cada crecida ordinaria, por lo que se puede apreciar, a través de las fotografías aéreas, que han modificado su morfología en planta, alargándose o acortándose y variando ligeramente su ubicación. En verano tienen un efecto importante, pues cuando baja poco caudal por el río y la demanda de agua para riego es alta, se producen desconexiones de la corriente (Figura 6).

Figura 6. Roturaciones, defensas y azudes que perduran hasta la actualidad junto a las áreas donde se han extraído gravas en entre 1927 y 2018 en el sector de estudio



Fuente: elaboración propia

4.4 Cambios en la cubierta vegetal

En la Figura 7 están representadas las variables hidrológicas y la superficie ocupada por las cubiertas del Territorio Fluvial para los periodos y fechas analizadas. En la Figuras 8 y 9 se pueden apreciar los cambios en las cubiertas para dos enclaves del sector de análisis, uno del subsector norte y otro del sur, para la totalidad de las fechas analizadas.

Tanto en 1927 como en 1946 y 1956, la mayor parte del Territorio Fluvial está ocupado por barras activas (BA), representando un 64, 62 y un 55%, respectivamente para el total del sector de análisis. Hubo dos crecidas extraordinarias entre 1927 y 1946 y, según los datos aportados por la CHE, dos crecidas formativas entre 1946 y 1956. La fuerte actividad sedimentaria y erosiva de estos periodos limita el asentamiento de la vegetación en general, aunque se aprecia un suave aumento de la superficie de estas cubiertas vegetales (pasando del 19 al 22% entre 1927 y 1956, +0,3%/año). Las de mayor importancia son la vegetación higrófila (VHg), la vegetación herbácea seca (VHs) y la vegetación colonizadora sobre tapiz herbáceo seco (VCh). La primera de ellas tiene una mayor importancia en el subsector sur hasta 1946, pero en 1956 sufre una importante roturación entre Pomar y Estiche de Cinca para convertirse en cultivos (Cu) (Figuras 7 y 9). Esta cubierta (Cu) presenta un incremento destacado en el subsector sur, pasando de +6,1 ha/año entre Pomar y Estiche de Cinca entre 1946 y 1956. La vegetación colonizadora (VC) y riparia densa (VRd) tienen muy poca presencia, especialmente la segunda de ellas, prácticamente inexistente en el subsector sur entre 1927 y 1956. De forma paralela se dan cambios en el patrón dibujado por los distintos cauces activos. En las Figuras 8 y 9 se pueden apreciar superficies de cultivo (Cu) erosionadas en mayor o menor medida, especialmente entre los años 1927 y 1946. También se observa una disminución de la superficie ocupada por la lámina de agua activa (LAa) en el subsector norte (Figura 8) entre 1927 y 1946 a causa de la pérdida de importancia de uno de los cauces activos del río. En este mismo periodo se da una disminución de la superficie ocupada por la VC en favor de la VCh, por desarrollarse bajo la misma un tapiz herbáceo. Este hecho es el siguiente paso en el proceso de estabilización de los depósitos sedimentarios del río.

Entre 1956 y 1981 se dan las mayores migraciones entre cubiertas de toda la serie estudiada. Es el periodo en el que hay mayor número de crecidas formativas y entra en funcionamiento el sistema de regulación Mediano-El Grado (1974), se introducen la mayor parte de defensas y roturaciones y comienza la actividad extractiva en el lecho fluvial. Durante este periodo se reduce considerablemente la superficie de las BD, pasando de un 55 a un 13% sobre el total del sector de análisis (-1,7%/año). A su vez, se da un avance exponencial de la VRd (+5 ha/año;

incrementos de 32 y 92 ha en los subsectores norte y sur respectivamente) y en menor medida de VHs (+1,6 ha/año; incrementos de 10 y 31 ha en los subsectores norte y sur respectivamente) como cubiertas vegetales naturales. El hecho de que la vegetación natural dominante pase a ser VHg entre 1927 y 1956 a VRd de 1981 en adelante, se infiere de las características de nicho ecológico de cada una de las cubiertas. La VHg (praderas, juncal y carrizal) predomina en zonas de encharcamiento más o menos periódico y tiene facilidad para dispersarse sobre nuevas localizaciones tras una alteración fluvial. En cambio, la VRd, es una asociación vegetal más madura, que necesita una inundación más permanente y léntica para poder desarrollarse. Dentro de las cubiertas antrópicas, surgen las plantaciones de chopo (Ch), +4,6 ha/año en el subsector norte, y +1 ha/año en el subsector sur. Aparece también la combinación de pastos (CP) íntegramente en el subsector sur, +3,4 ha/año, la cual viene a sustituir en buena medida a los cultivos (Cu), ya que se da una reducción de éstos de 2,2 ha/año. En este periodo aparecen las extracciones de grava (EG) que suponen 13 ha, exclusivamente en el subsector norte (Figura 8) y una repoblación de *Pinus halepensis* (RP) en el subsector sur de 2 ha. Surge en el subsector norte una pequeña edificación (Ed) entre las choperas de plantación (Ch) dedicada al almacenamiento de aperos forestales.

Entre 1981 y 1989, periodo en el cual se dio la segunda crecida del Cinca más importante del siglo XX (11 de noviembre de 1982), no se registra un aumento de la superficie ocupada por las BD, aunque sí se aprecian algunos cambios en el patrón de la lámina de agua activa (LAa), especialmente en el subsector sur (Figura 9): estrechamiento del cauce principal del segmento superior del subsector sur y división en varios brazos más al norte respecto a 1981. Las roturaciones para introducir choperas de plantación (Ch) llevadas a cabo entre 1956 y 1981, con la gran invasión del lecho del subsector norte y eliminación del brazo izquierdo del río, se culminan en este periodo con la roturación de 14 ha. Globalmente, las cubiertas correspondientes al CR siguen aumentando: incrementos de un +0,5%/año para la cubierta VC, +2,6%/año para VCh, +1%/año para VHs y +0,2%/año para VRd respectivamente, con la excepción de VHg, en la que se da un descenso del -4,3%/año (Figuras 8 y 9). En cuanto a las extracciones de grava (EG), se trasladan mayoritariamente a la orilla izquierda del segmento inferior del subsector norte, sustituyendo a las barras activas (BA). Así, las antiguas extracciones son colonizadas por vegetación herbácea seca (VHs) y, en menor medida, por vegetación riparia densa (VRd) (Figura 8). También se producen intercambios de superficie dedicada a pastos (CP), cultivos (Cu) y choperas de plantación (Ch) en el subsector sur.

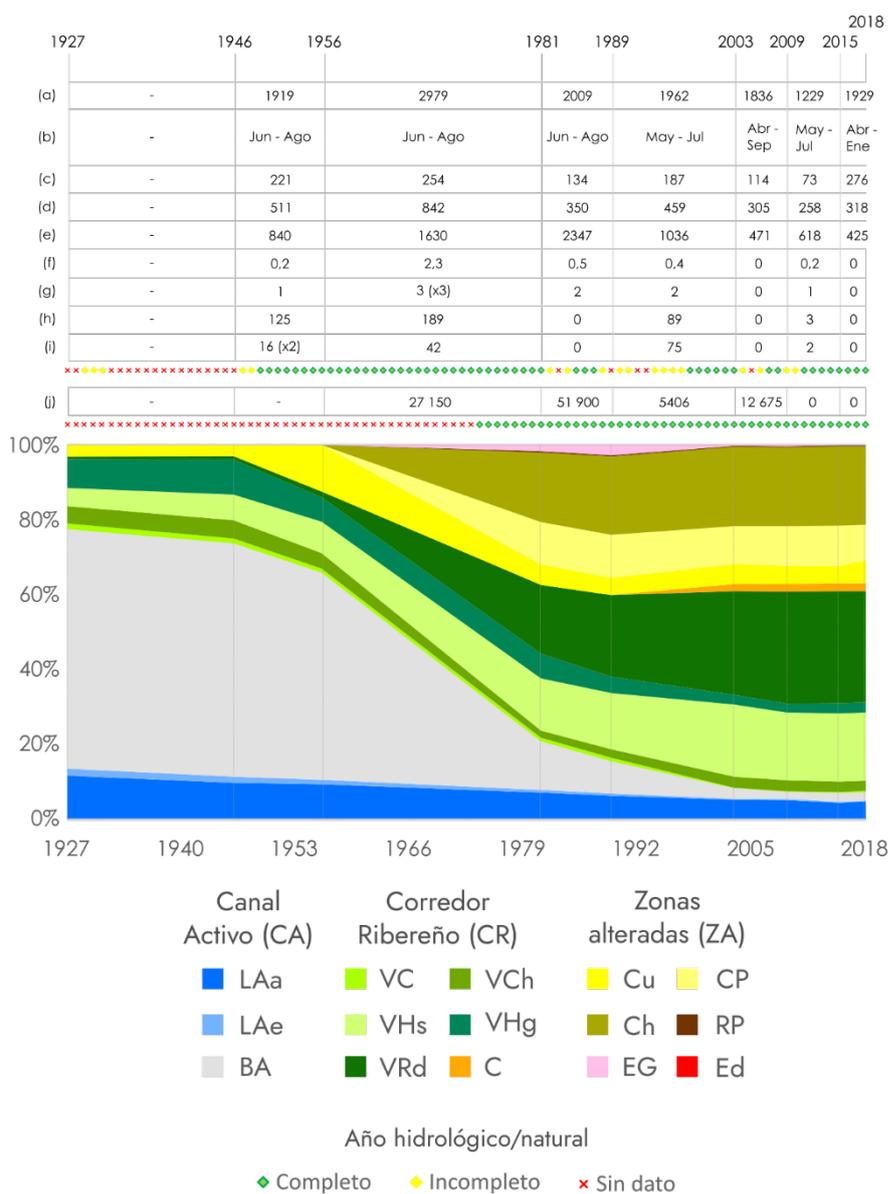
Entre 1989 y 2003 se dan ligeros cambios de trazado, especialmente en el brazo izquierdo del río del subsector sur, donde se llegan a erosionar terrenos dedicados a pasto (CP) (Figura 9). Este hecho está relacionado con las 6 crecidas formativas que se dan en este periodo (entre los años 1996–1997 y 2000–2001). Por otro lado, destaca la desaparición de pequeñas manchas de vegetación riparia densa (VRd) en ambas orillas del río en el segmento superior del subsector norte (Figura 8). Este suceso puede indicar que la incisión del río provoca, en determinadas zonas, una disminución del nivel freático al que ya no pueden acceder los árboles maduros. En cuanto a las edificaciones en el Territorio Fluvial, destaca la construcción de una Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) en el subsector sur, correspondiente a Pomar de Cinca. El resto de cubiertas antropizadas se mantienen estables. Cuantitativamente, se da una reducción en todas las cubiertas del canal activo y en las cubiertas vegetales de VC y VHg, en contraposición al avance de las cubiertas VHs, VCh y VRd (Figura 7). Como ya se ha comentado anteriormente, se produce una migración entre las cubiertas del corredor ribereño, causada tanto por la estabilización del cauce que facilita el asentamiento de vegetación, como por la madurez de la vegetación ya existente.

Entre 2003 y 2018 sólo se produce una crecida formativa (20 de junio de 2013). En estos últimos periodos analizados apenas se dan cambios significativos (Figuras 8 y 9), continúa la tendencia de desaparición de barras activas (BA) en favor de la vegetación natural en el subsector sur (-4%/año), se da un pequeño avance de las BD en el subsector norte (repunte de 9 a 12 ha), y continúa el avance de la vegetación riparia densa (VRd), con un incremento del +0,7%/año en el subsector sur y +0,1%/año en el norte. Se dan algunos cambios entre las cubiertas alteradas: migración entre la combinación de pastos (CP) y los cultivos (Cu) principalmente, y se dan cambios en el trazado del río casi exclusivamente en el segmento inferior del subsector norte. La LAa se mantiene estable en el subsector norte con 16 ha, mientras que se reduce en el subsector sur, pasando de 24 a 21 ha (-0,2 ha/año). La vegetación invasora de cañas (C) avanza +0,1 ha/año entre 2003 y 2018, representando un 40% del área ocupada en el subsector norte y el 60% restante en el sur en el año 2018. Esta superficie es proporcionalmente muy pequeña respecto al sector de análisis (en torno al 2%). Destaca su aparición en zonas que anteriormente correspondían al tipo de cubierta CP y VHg (Figura 9).

En la Figura 7 se pueden apreciar tres periodos bien diferenciados en cuanto a la superficie ocupada por las cubiertas del Territorio Fluvial se refiere. El primero, 1927–1956, correspondería a un equilibrio “natural” (aunque entre 1946 y 1956 ya gana peso el área de los cultivos) en el que predominan las cubiertas que conforman el canal activo, y donde tienen poco

peso las cubiertas del corredor ribereño y zonas alteradas. El segundo periodo abarcaría desde el año 1956 al 2003 y sería de reajuste, ya que se reducen las áreas de BA, LAa y LAe para dar paso a las cubiertas vegetales, tanto naturales como antrópicas. El tercero sería de estabilización, de 2003 a 2018, en el que apenas se dan cambios y se alcanza un nuevo equilibrio.

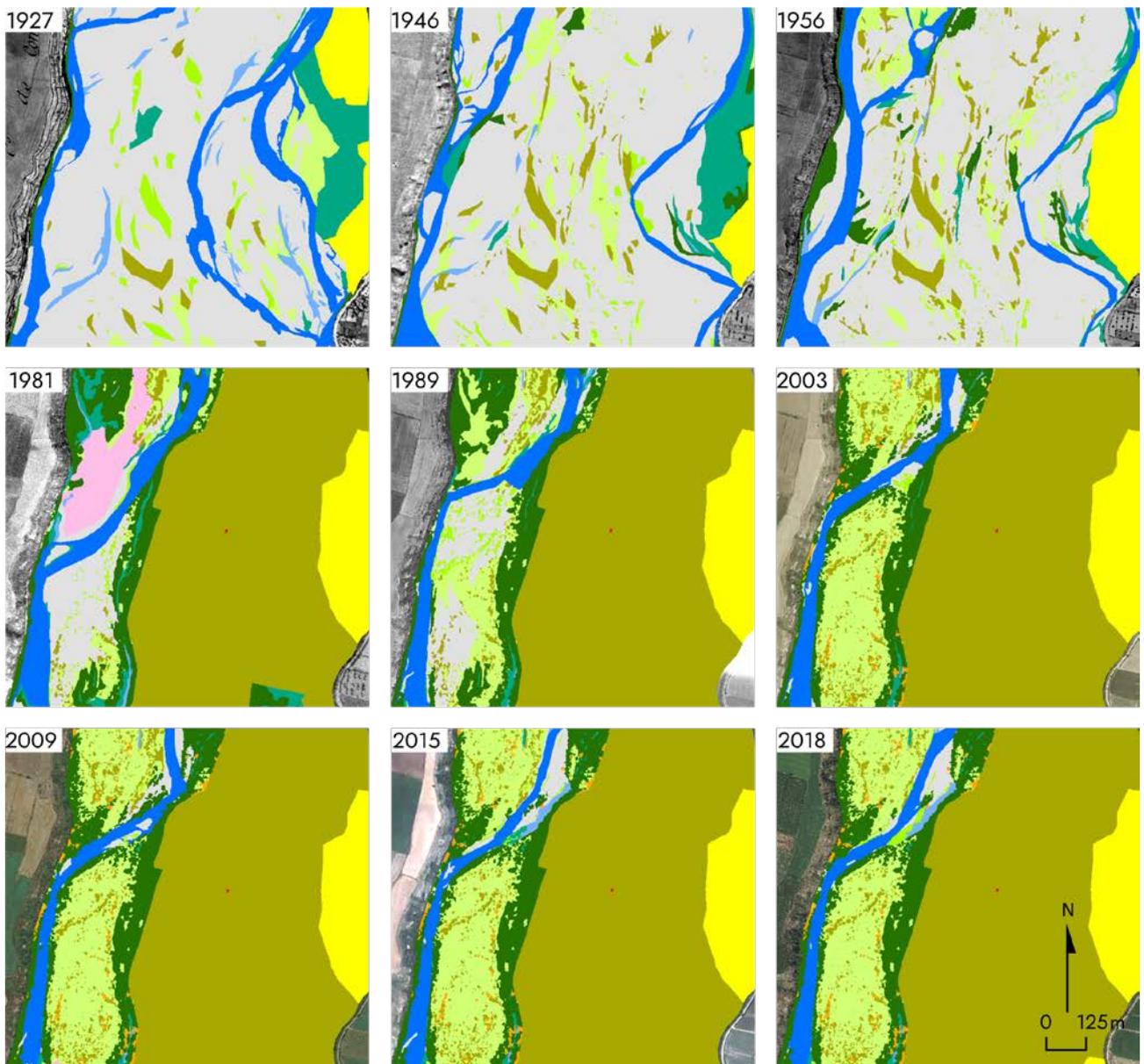
Figura 7. Evolución de las cubiertas del Territorio Fluvial junto a los parámetros hidrológicos y de extracción de gravas por periodo



Leyenda: (a) Aportación media anual, en hm^3 ; (b) Meses de máxima y mínima aportación; (c) Variabilidad anual, en hm^3 ; (d) Media de los caudales máximos anuales, en m^3/s ; (e) Q_{md} máximo, en m^3/s ; (f) Número de días de crecida formativa al año; (g) Máximo número de días de crecida formativa consecutivos; (h) Número de días de estiaje al año; (i) Máximo número de días de estiaje consecutivos; (j) Volumen de gravas extraído, en m^3 . Denominación y descripción de las categorías de cubierta en la Tabla 4.

Fuente: elaboración propia

Figura 8. Evolución morfológica y de las cubiertas del territorio fluvial entre 1927 y 2018 de un enclave del subsector norte



Canal Activo (CA)

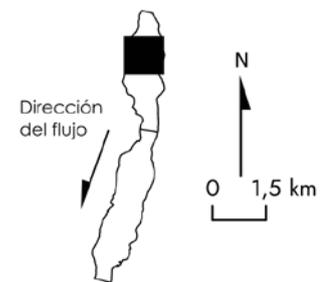
- LAa
- LAe
- BA

Corredor Ribereño (CR)

- VC
- VCh
- VHs
- VHg
- VRd
- C

Zonas alteradas (ZA)

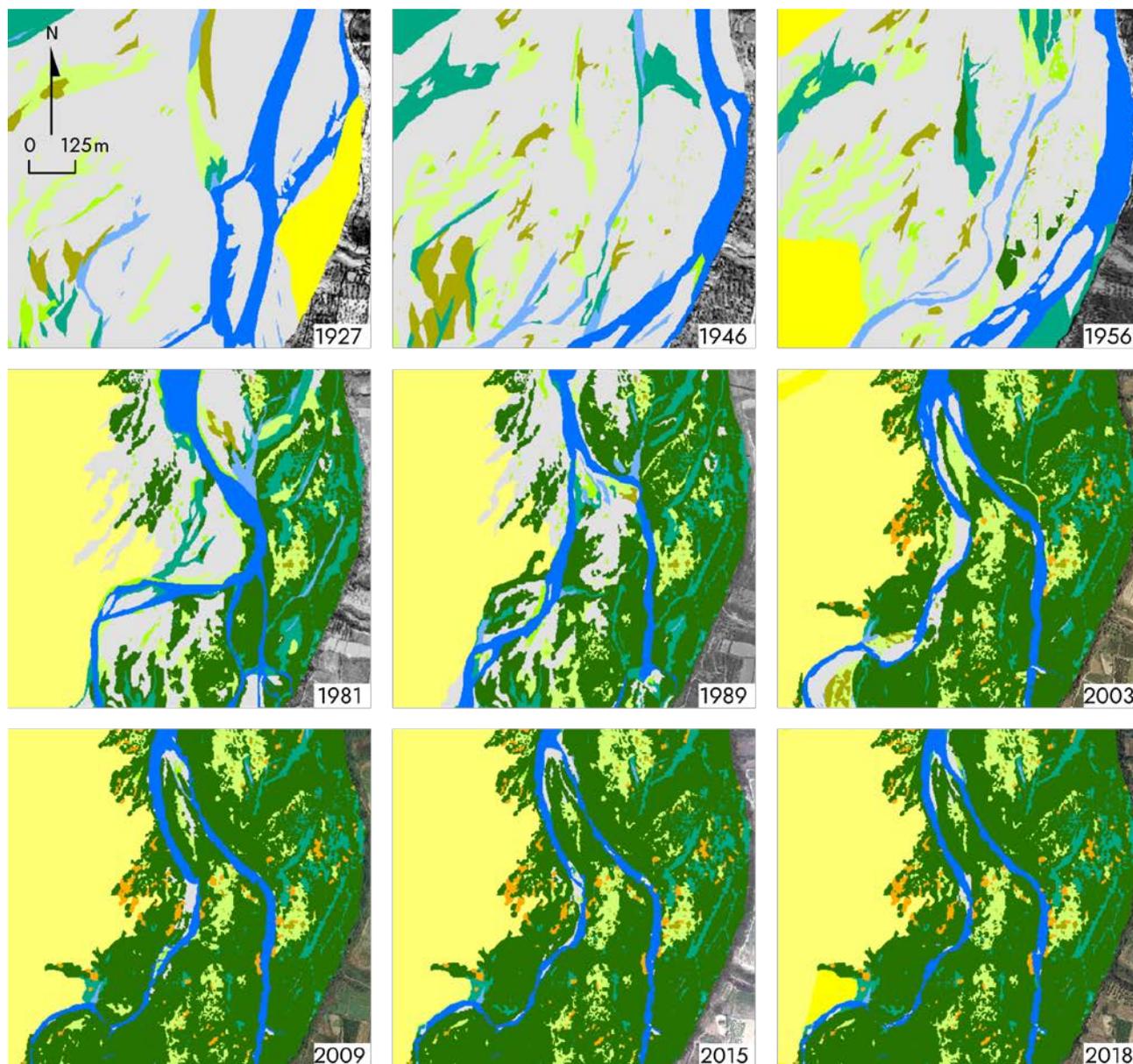
- Cu
- CP
- Ch
- RP
- EG
- Ed



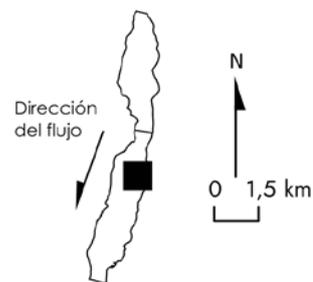
Sistema de referencia: ETRS89 coord. geográficas zona 31

Fuente: elaboración propia

Figura 9. Evolución morfológica y de las cubiertas del territorio fluvial entre 1927 y 2018 de un enclave del subsector sur



Canal Activo (CA)	Corredor Ribereño (CR)		Zonas alteradas (ZA)	
■ LAa	■ VC	■ VCh	■ Cu	■ CP
■ LAe	■ VHs	■ VHg	■ Ch	■ RP
■ BA	■ VRd	■ C	■ EG	■ Ed



Sistema de referencia:
ETRS89 coord. geográficas zona 31

Fuente: elaboración propia

En cuanto a las unidades del Territorio Fluvial, se pasa de tener un 75% de superficie ocupada por el canal activo (CA) en 1927 y 1946, a un 66% en 1956 (-0,9%/año) (Figura 10a), debido a la presencia de zonas alteradas (ZA). Entrando en detalle, entre 1927 y 1946, en ambos subsectores hay un incremento similar del corredor ribereño (CR), +1,1%/año en el subsector norte y +1,3%/año en el subsector sur, y un descenso del canal activo (CA), -1%/año en el subsector norte y -1,4%/año en el subsector sur. En cambio, las zonas alteradas (ZA) en el subsector norte disminuyen (-0,1%/año) y en el sur aumentan (+0,1%/año), aunque en ambos casos son cambios de pequeñas dimensiones. Entre 1946 y 1956, las zonas alteradas aumentan en ambos subsectores, aunque más intensamente en el sur (+1,4%/año frente a +3%/año).

Entre 1956 y 1981 se producen las mayores migraciones entre cubiertas de toda la serie estudiada. Se reduce considerablemente la superficie del canal activo (CA) a -13,4 ha/año, dando paso a un profundo avance del corredor ribereño (CR) y de las zonas alteradas (ZA), que duplica y triplica su superficie, respectivamente. Este patrón evolutivo se da en ambos subsectores sin grandes diferencias.

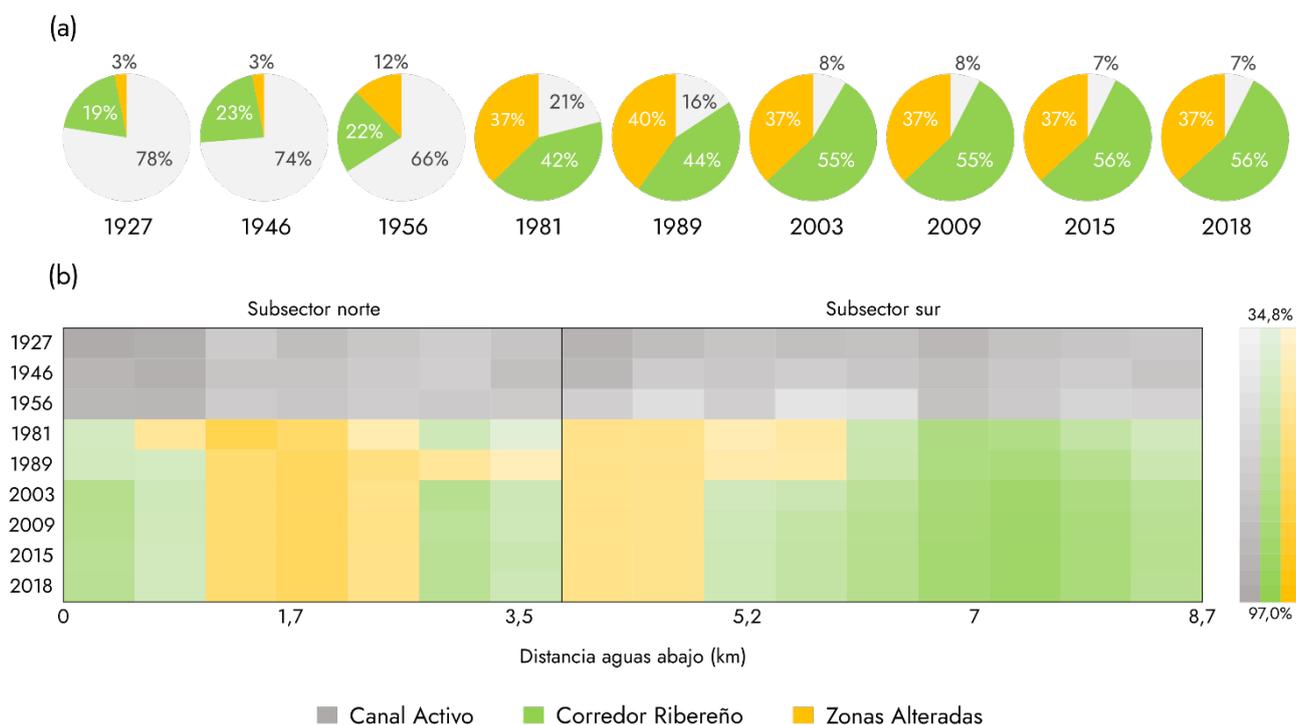
En los periodos de 1981–1989 y 1989–2003 continúa la misma dinámica, aunque de manera más suavizada. Esta etapa corresponde con un proceso de estabilización del cauce en el que no se dan grandes alteraciones en cuanto a las áreas ocupadas, por lo que el proceso de colonización del cauce por parte de la vegetación es el predominante: la superficie ocupada por el CR asciende entre 1981 y 2003 en un +1,5%/año y +1,4%/año en los subsectores norte y sur, respectivamente. Llama la atención que la crecida de 1982 no interrumpiera este proceso aumentando la superficie ocupada por el canal activo (CA) al elevar la cantidad de depósitos sedimentarios movilizados sobre el Territorio Fluvial.

En los periodos 2003–2009, 2009–2015 y 2015–2018 apenas hay migración entre unidades, a excepción de la colonización vegetal de los escasos depósitos sedimentarios existentes en el subsector sur (aumento del CR en un +0,3%/año). La práctica desaparición de crecidas formativas en estos periodos (sólo una en esta etapa; 618 m³/s en 2013) provoca que la estabilidad sea casi total.

Atendiendo a la distribución de la unidad predominante en el Territorio Fluvial por segmentos (de 540 m de aproximadamente) del sector de análisis (Figura 10b), se puede observar un dominio total del CA en las tres primeras fechas analizadas en todos los segmentos, aunque con distinto porcentaje de ocupación (los valores fluctúan entre el 97,0% del primer segmento del subsector norte en 1927 y el 46,4% en el cuarto segmento del subsector sur en 1956). A partir

de 1981, las unidades predominantes son el CR y las ZA, presentando intercambios de dominio entre sí en algunos segmentos entre 1981 y 2003, fecha a partir de la cual se da una mayor estabilidad. De 1981 en adelante, se puede apreciar una mayor importancia de las ZA en el sector central del subsector norte e inicial del subsector sur, con valores que oscilan entre el 72,4 y 39,4% y un predominio de la vegetación natural en el resto del sector de análisis (valores entre un 86,6 y 34,8%).

Figura 10. Evolución de las áreas ocupadas por las unidades del territorio fluvial entre 1927 y 2018



Legenda: (a) Porcentaje (%) de ocupación de las unidades en el Territorio Fluvial para cada una de las fechas analizadas. (b) Unidad predominante en cada uno de los segmentos del sector de análisis para cada una de las fechas analizadas. Una elevada intensidad del color, indica un mayor porcentaje (%) de ocupación de la unidad.

Fuente: elaboración propia

4.5 Cambios geomorfológicos

La superficie movilizada queda recogida en la Tabla 6 y en la Figura 11. Con el fin de intentar homogeneizar la duración temporal de los periodos para hacerlos más comparables entre sí, se han agrupado las fechas de 2003, 2009, 2015 y 2018 en un solo periodo. La superficie movilizada a lo largo de toda la serie estudiada (1927–2018) es de casi un 50% del total del Territorio Fluvial. Los periodos intermedios en los que se concentra una mayor superficie movilizada son los de 1927–1946 y 1956–1981, con unos porcentajes del 27 y 28% del

Territorio Fluvial respectivamente. En el resto de los periodos la superficie movilizada es menor, aunque entre 1946 y 1956 es superior a la de los tres últimos periodos estudiados (12% en 1946-56 frente a 6%, 4% y 3% en 1981–1989, 1989–2003, 2003–2018, respectivamente) (Tabla 6). Esto denota una influencia de la regulación de los embalses aguas arriba. Respecto a las diferencias entre los subsectores norte y sur, cabe destacar que, a excepción de los periodos 1927–1956 y 2003–2018, hay una mayor superficie movilizada en el subsector sur.

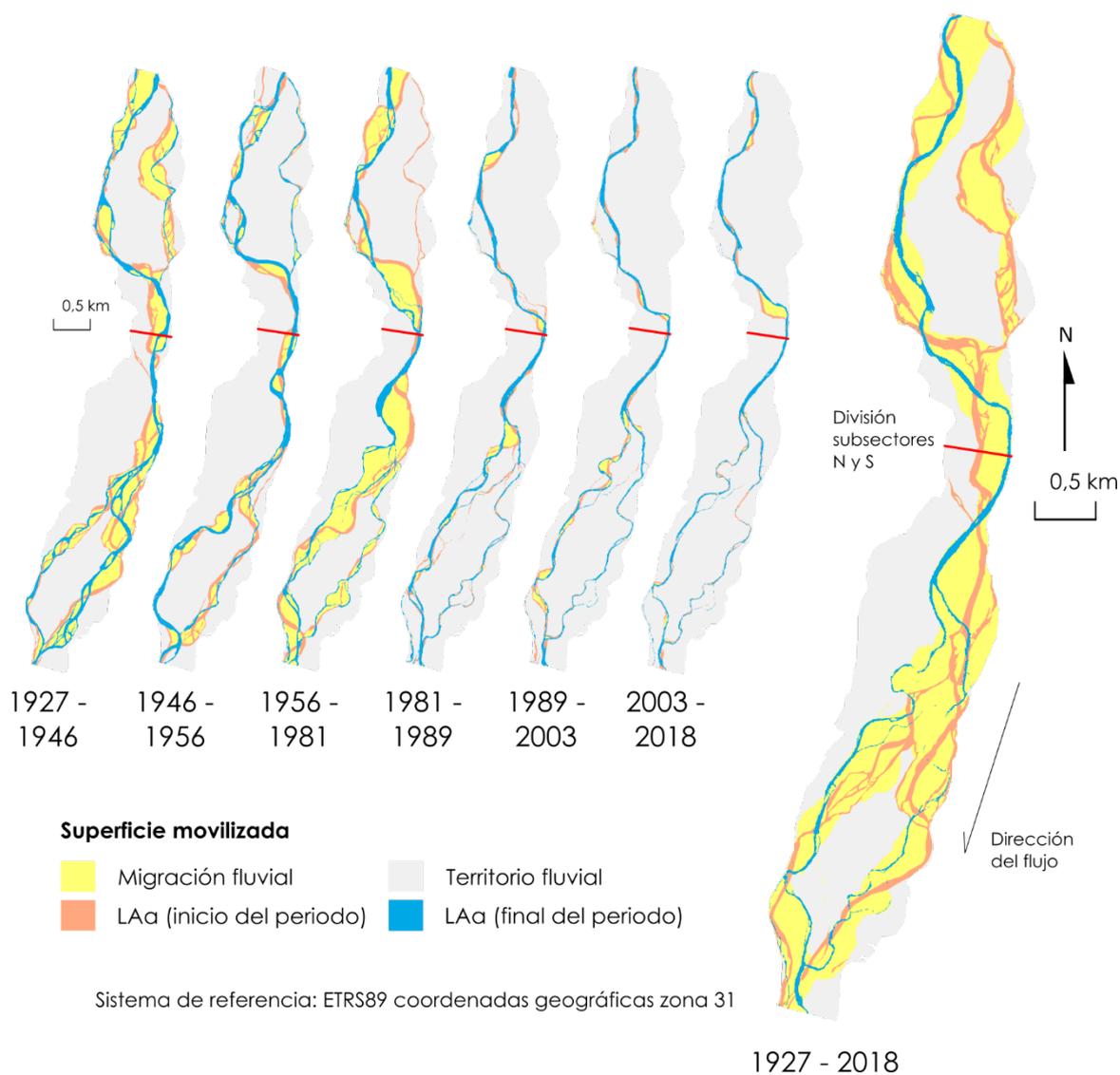
Tabla 6. Superficie movilizada (ha) entre 1927 y 2018 por periodos en el total del sector de estudio, subsector norte y subsector sur

	PERÍODOS						
	1927–1946	1946–1956	1956–1981	1981–1989	1989–2003	2003–2018	1927–2018
Total sector	201,7	90,3	204,9	48,3	30,5	24,6	365,3
Subsector norte	97,8	31,7	76,9	14,1	8,3	15,0	147,9
Subsector sur	103,9	58,6	128,0	34,2	22,2	9,6	217,4

Fuente: elaboración propia

En el sector de estudio, la intensidad de trenzado (Muñoz-Narciso, 2014) del río Cinca presenta una tendencia decreciente entre 1927 y 2018, especialmente en el subsector norte (Figura 12), pasando de un valor de 3 a 1,8. La intensidad de trenzado aumenta entre 1956 y 1981, sobre todo en el subsector sur, coincidiendo con el número de crecidas formativas más elevado de toda la serie (57). En contraposición, para ese mismo periodo, en el subsector norte se reduce, coincidiendo con la corta de uno de los cauces activos y la introducción de defensas longitudinales que protegen a las choperas de plantación, entonces recién roturadas. El otro repunte en este parámetro se da en ambos subsectores en el año 2009. Esto sucede, previsiblemente, a causa de haberse tomado dicha fotografía aérea con un mayor caudal del río (véase Tabla 3).

Figura 11. Superficie movilizada entre 1927 y 2018 por periodos en el total del sector de estudio, subsector norte y subsector sur



Fuente: elaboración propia

El índice de recuento de cauces activos está íntimamente ligado a la intensidad de trenzado y sigue una tendencia negativa análoga, aunque algo menos pronunciada (Figura 12), pasando de un valor de 2,53 en 1927, a 1,76 en 2018 para el sector de análisis. La reducción producida entre 1956 y 1981 en el subsector norte está asociada al confinamiento lateral causado por las defensas longitudinales introducidas a lo largo de este periodo. A partir de este parámetro se han calculado los índices de trenzado y anastomosado (Figura 12). Este último parámetro se ha escogido para medir el grado de colonización vegetal en relación al número de cauces activos del río. Según los resultados obtenidos, estos dos parámetros han seguido tendencias inversas: el río ha pasado de tener un patrón trenzado en 1927 a uno divagante en 2018 (reducción del trenzamiento), a su vez, el parámetro de anastomosado ha ascendido, pasando a tener un patrón

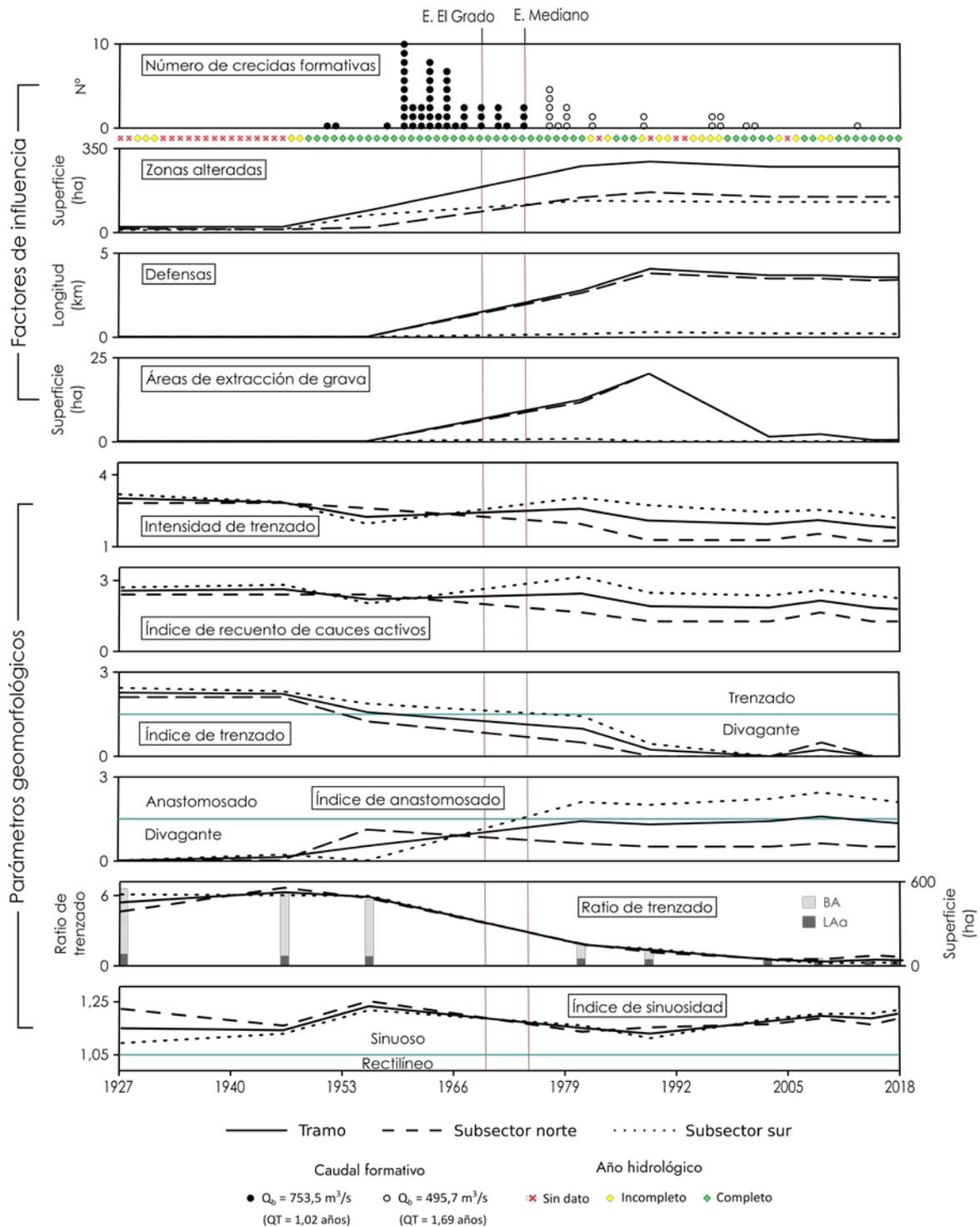
divagante en 2018, con un valor de 1,4, próximo al umbral, para el sector de análisis y anastomosado para el subsector sur (2,1) (Figura 12). Este hecho tiene origen en el proceso de colonización vegetal del cauce, producido especialmente entre 1956 y 1981. Se puede apreciar un proceso de simplificación del cauce, especialmente en el subsector norte a causa de la introducción de defensas longitudinales (véase apartado 3.3).

Entre 1927 y 2018 la ratio de trenzado ha disminuido en un 91%, pasando de un valor de 5,4 a 0,4, es decir, actualmente el río apenas modifica su trazado. Antes de la entrada en funcionamiento de Mediano-El Grado (1948–1973), la ratio oscilaba entre unos valores de 5,4 y 6,3; a partir de entonces desciende abruptamente, a 1,8 - 1,3 en 1981–1989 y, desde 2003, la ratio es inferior a 1 (las barras activas ocupan una superficie menor que la del cauce activo). Todo ello indica que hay una gran estabilidad morfológica y sedimentaria a partir de la entrada en funcionamiento de los grandes embalses. De este modo, los caudales liberados por este sistema de regulación no son capaces de movilizar la mayor parte del Territorio Fluvial y los procesos de sedimentación-erosión se dan en el propio cauce. Cuanta menor es la magnitud de caudales liberados, más se facilita el proceso de incisión. Este fenómeno se observa a lo largo de toda el área de estudio, aflorando incluso la roca madre (arenisca) en determinados puntos. Entre 1927 y 1946 se dio un notable aumento de la ratio del 30% en el subsector norte, pasando de un valor de 4,6 a 6,6, posiblemente debido a la erosión de una superficie cultivada causada por la movilidad lateral del cauce durante las crecidas de 1937 y 1942. También se aprecian diferencias entre los subsectores norte y sur en 2009, 2015 y 2018: en términos relativos la ratio del subsector norte presenta una relación 3:1 respecto a la del subsector sur (Figura 12). La superficie ocupada por la lámina de agua activa (LAA) se reduce gradualmente a lo largo de toda la serie estudiada (pasando de 88 ha en 1927 a 36 ha en 2018). En cambio, las barras activas (BA) sufren una disminución abrupta entre 1956 y 1981 (-315 ha en 25 años) y más suave entre 1981, 1989 y 2003 (-76 ha en 22 años). A partir de entonces, se da un proceso de estabilización debido a la reducción de alteraciones antrópicas en el sistema.

En el sector de análisis, el índice de sinuosidad tiene una ligera tendencia positiva entre 1927 y 2018, pasando de un valor de 1,15 a 1,2 (cauce principal sinuoso en ambos casos), aunque en ninguna de las fechas analizadas se supera el umbral de 1,5. Destaca el pico producido en 1956 (1,23), en el que la mayor sinuosidad del cauce principal indica una mayor competencia a la hora de evacuar la escorrentía en el mismo cauce principal por concentrarse en él la mayor parte del caudal circulante del lecho fluvial, con la consecuente pérdida de importancia de los canales secundarios. La sinuosidad disminuye entre 1956 y 1989 para volver a elevarse de

manera casi constante hasta 2018 (Figura 12). Las mayores diferencias entre subsectores se dan en 1927 y 1989, con una mayor sinuosidad en el subsector norte (1,22 frente a 1,1 y 1,15 frente a 1,12, respectivamente) y en 2015 con una mayor sinuosidad en el subsector sur (1,16 frente a 1,22).

Figura 12. Evolución de las variables geomorfológicas junto a las crecidas formativas del río Cinca (en Fraga), la superficie ocupada por zonas alteradas en el territorio fluvial, la introducción de defensas y las áreas de extracción de grava

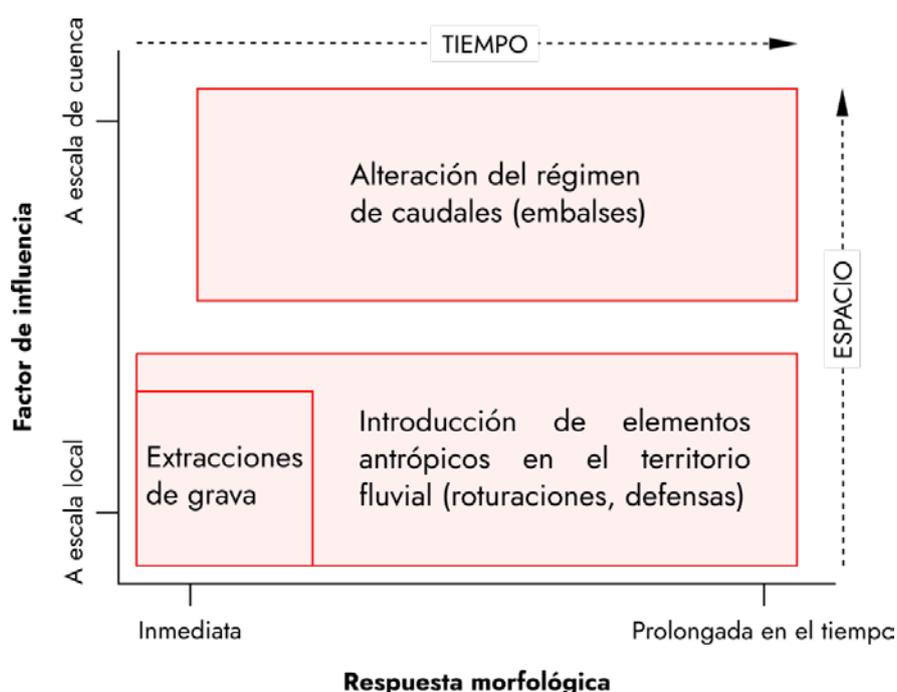


5 Discusión

La principal dificultad del análisis geomorfológico en cauces dinámicos estriba en identificar a qué factores, naturales o humanos, se deben los cambios (Downs & Piégay, 2019). La mayor parte de los cambios observados en el caso de estudio también se registran en ríos de funcionamiento más natural (Batalla et al., 2018), que no tienen algunos de los impactos del tramo analizado. Así, en sistemas fluviales sin regulación ni infraestructuras, los cambios en los usos del suelo que afectan a la cuenca de manera global también generan ajustes morfosedimentarios destacables (Scorpio & Rosskopf, 2016). La sensibilidad de un sistema fluvial a diferentes estímulos puede variar en función del carácter acumulativo e interactivo de estos (Downs & Piégay, 2019), atendiendo también a las diferencias locales y a la evolución temporal (Downs et al., 2013; Gibling, 2018).

Los impactos y los ajustes biogeomorfológicos identificados y evaluados en el presente trabajo se han registrado con diferentes pautas temporales –permanentes, puntuales, irregulares– y con tiempos de repuesta distintos (Figura 13). Así, actuaciones locales y puntuales, como las extracciones de gravas, han producido una primera respuesta rápida y a continuación un largo periodo de ajuste (Petts & Günnell, 2005).

Figura 13. Síntesis de los impactos estudiados en el presente trabajo



En la Figura 14 se muestra un ejemplo de cómo las depresiones generadas con la extracción de gravas han producido un cambio inmediato en la morfología en planta del río (visible en el año 2009), y posteriormente un reajuste más profundo, tras el episodio de avenida del año 2013.

Figura 14. Extracción de gravas producida a lo largo del año 2006 en el extremo inferior del subsector norte



Fuente: elaboración propia

Se ha podido sintetizar esta problemática en la Figura 12, que muestra la evolución en el tiempo de respuesta y ajuste en relación con las crecidas formativas. Hubo eventos relevantes, como la crecida de 1982, que pudieron avivar los procesos. Asimismo, los cambios en la cuenca generan cambios en el río Cinca, pero el impacto de las grandes presas parece diluirlos en parte, dando mayor peso a los propios efectos de la regulación.

En este contexto, se ha trabajado de forma especial la componente hidrológica en el funcionamiento del sistema. El régimen hídrico del río Cinca ha sufrido importantes alteraciones con la entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado en 1974, al igual que se ha constatado en otros trabajos aplicados en otros ríos pirenaicos (García et al., 1985; Valero et al., 1997; López & García-Ruiz, 2003; Acín, 2005; García-Ruiz et al., 2015; Tuset et al., 2015; Marqués, 2018). Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que ha

disminuido la frecuencia de las crecidas formativas (con un único rebasamiento del nivel de *bankfull* en los últimos 17 años pese a que el Q_B también se haya reducido) y ha cambiado el patrón de estiajes (mayor duración de los episodios y menor frecuencia). Además, ha bajado la aportación media anual y máxima mensual y se ha reducido la variabilidad anual. Estos tres últimos parámetros están influidos directamente por la detracción de caudales por parte del Canal del Cinca y también por el Canal de Aragón y Cataluña en el río Ésera, que entre ambos totalizan 1000 hm^3 anuales aproximadamente. En cuanto a la magnitud de las crecidas, al contrario de lo esperado, los dos mayores Q_{md} de la serie estudiada se dan con los grandes embalses en funcionamiento, en los años 1982 y 1979. En este trabajo se ha partido de datos de Q_{md} , pero sería interesante valorar el efecto de la regulación en los picos de caudal instantáneo de las crecidas, tanto en la serie de datos de la estación de aforo de Fraga, como de los aforos a la salida de los embalses de El Grado y Barasona.

Los impactos locales (extracción de gravas, roturaciones e introducción de defensas) afectan a buena parte de la superficie del Territorio Fluvial y reducen en gran medida la dinámica geomorfológica del río al disminuir el sedimento movilizable disponible y ocasionar desconexiones laterales. Este hecho se repite en distintos ríos de la cuenca del Ebro y tramos del río Cinca, tal como han estudiado varios autores (Muñoz-Narciso, 2014; Tuset et al., 2015; Llena et al., 2020). Las cubiertas correspondientes al canal activo (CA), barras activas (BA) y láminas de agua activa (LAa) y estancada (LAe) mostradas en la Figura 7, reducen su extensión de manera importante entre 1927 y 2018. Esto guarda relación con la disminución en la frecuencia de las crecidas formativas y la reducción del sedimento movilizable, al igual que señalan otros autores (Scott et al., 1996; Tuset et al., 2015). Los resultados de la Figura 7 indican que la mayor reducción se produce entre 1956 y 1981, aunque continúa dándose hasta el año 2003, a partir del cual el sistema alcanza un nuevo punto de equilibrio. En él apenas hay episodios disruptivos (una crecida formativa en 17 años, Figura 4), confirmándose la existencia de impactos puntuales con tiempos de ajuste prolongados. Esto sucede también en otros tramos del río Cinca, tanto aguas arriba (Muñoz-Narciso et al., 2018; Llena et al., 2018) como aguas abajo (Acín et al., 2005). Los depósitos sedimentarios son progresivamente colonizados por la vegetación o bien son ocupados por otros usos (cultivos, choperas, pastos, etc.), que producen un avance del corredor ribereño (CR) y de las zonas alteradas (ZA) (Figuras 8 y 9). Este hecho está asociado, al igual que comentan otros autores (Tuset et al., 2015), con la estabilización del cauce, que da lugar a una reducción de las superficies activas. Aquí se registra una interacción de difícil evaluación, pues la estabilización se debe a acciones humanas directas, de ocupación, e

indirectas, procedentes de aguas arriba. Determinar la importancia relativa de cada una de ellas no es posible solo desde la cuantificación de los cambios.

Respecto a la superficie de lámina de agua (LAa y LAe), se ha visto reducida de forma cuasilineal desde 1927 a 2018 (Figura 7). Este hecho no se traduce en una menor cantidad de agua evacuada por el río. Los ríos de amplios lechos de grava, ya sean de tipo trenzado o divagante, tienen una mayor ratio de anchura-profundidad del canal (Rădoane et al., 2013), lo que indica que, aunque lleven un caudal similar, ocuparán una mayor área. Cuando fueron tomadas las fotografías aéreas de 1956, el caudal del río Cinca medido en la estación de aforo de Fraga era menor que para las del año 2015 (Tabla 3), pero la superficie ocupada por la lámina de agua activa (LAa) y estancada (LAe) fue de 79 ha en 1956 y de 36 ha en 2009. Este hecho confirma lo expuesto por Rădoane et al. (2013).

Las cubiertas vegetales que han experimentado una mayor expansión entre 1927 y 2018 han sido la VRd, con 215 ha, seguida de la VHs, con 100 ha. Teóricamente, cuanto mayor sea la recurrencia de las crecidas formativas, menor capacidad tendrá la vegetación de asentarse en el lecho fluvial. El periodo comprendido entre 1956 y 1981 es en el que mayor número de veces se supera el nivel de *bankfull* (2,3 días/año) y, a su vez, es el periodo en el que mayor avance se da del CR (duplica su superficie) y especialmente de la vegetación de ribera densa (incremento de 124 ha que representa una cifra de 1000%), que sería la vegetación madura. Esto sucede a causa de los impactos de carácter local, como la introducción de defensas longitudinales que reducen la conectividad lateral del cauce y facilitan que el río lleve a cabo procesos de incisión, dejando así vía libre a la vegetación para que se asiente sobre los terrenos descolgados. Este fenómeno se da a lo largo de toda el área de estudio. A ello se le une la extracción de gravas, que provoca que el río profundice más en el lecho por la disminución de sedimentos. La incisión detectada es menos pronunciada que la registrada en el río Gállego (Martín Vide et al., 2010), pero responde a un proceso hidrogeomorfológico similar.

La crecida de 1982 en los ríos Cinca, Noguera Ribagorzana, Segre, etc., tan destructiva en el bajo Cinca, no provocó en el sector de estudio un cambio en la tendencia de la ocupación del Territorio Fluvial. Este hecho contrasta con el del tramo medio del Segre, donde se dio un aumento de la superficie del cauce activo y de las unidades sedimentarias asociadas (Tuset et al., 2015). Hay que señalar que, en el caso de los embalses que regulan el río Cinca aguas arriba del área de estudio, la ratio de retención es de 0,34 en el caso de Mediano y 0,28 para El Grado, en el periodo 1988–2000 (López & García Ruiz, 2003), mientras que el embalse de Oliana, en el Segre, presenta un valor de 0,1 (Tuset et al., 2015). La falta de una imagen aérea

posterior a la crecida y próxima a ella ha imposibilitado realizar un análisis más directo de sus efectos.

En cuanto a la superficie movilizada por el río (Figura 11 y Tabla 6), al igual que en el tramo bajo del río Cinca (Granado et al., 2011) se reduce intensamente entre 1927 y la actualidad. El desarrollo de la vegetación es capaz de alterar la morfología de un sistema fluvial disminuyendo la superficie movilizada, estrechando el cauce y favoreciendo cortas en los brazos del río, estabilizando barras activas y alterando los patrones de erosión y sedimentación (Tal & Paola, 2010). En el sector de análisis, principalmente en el subsector sur, el bosque de ribera del brazo izquierdo del río ha contribuido a la casi total ausencia de movilización de la superficie desde 1981 en adelante. Tal como señala Marqués (2018), es necesario apuntar que la divagación real del río entre dos fechas puede haberse extendido más allá de las posiciones inicial y final del cauce, de modo que los cambios cuantificados pueden haber sido infraestimados, especialmente entre 1956 y 1981, periodo largo sin fotos que es en el que más cambios se han registrado. El mismo fenómeno se ha podido dar en la migración entre cubiertas y unidades del Territorio Fluvial.

El patrón morfológico del cauce se ha visto modificado desde 1927 a 2018, pasando de ser de tipo trenzado a divagante. Este hecho guarda relación con el nuevo régimen de crecidas (magnitud y frecuencia), que provoca que los caudales de baja frecuencia (sobre el nivel de *bankfull*) sean infrecuentes. También está relacionado con la disponibilidad de sedimento movilizable, mucho menor en la actualidad por las infraestructuras introducidas en el lecho fluvial y la extracción de gravas. Estos factores disminuyen la actividad geomorfológica y facilitan el desarrollo de la vegetación de ribera, que a su vez reduce la disponibilidad de sedimento. El proceso guarda paralelismos con el registrado en otros afluentes pirenaicos del Ebro, principalmente el Gállego (Peña et al., 2020).

Los resultados del presente estudio evidencian que el sector del río Cinca analizado ha sido objeto de intensas alteraciones, tanto a nivel de cuenca (cambios en el régimen hidrológico) como a nivel local (extracción de gravas, introducción de defensas y roturaciones), que han provocado cambios en la ocupación de su Territorio Fluvial, facilitando el desarrollo de las cubiertas vegetales naturales, reduciendo la superficie de su canal activo y simplificando su patrón de drenaje. Las principales alteraciones corresponden al periodo 1956–1981, coincidiendo, en parte, con la época del “Desarrollismo” español y con lo que algunos autores (Zalasiewicz et al., 2017) marcan como la fase de arranque del Antropoceno, muy clara y generalizada en el funcionamiento fluvial (Ollero et al., 2021).

Los cambios identificados y analizados en el río Cinca en el presente trabajo muestran patrones espaciales y temporales y relaciones causa-efecto muy próximos a los registrados en otros ríos pirenaicos, como el Segre o el Gállego, tal como se ha ido señalando. Por tanto, el trabajo realizado confirma un comportamiento hidrobiogeomorfológico común y paralelo en el tiempo en los sistemas fluviales de la vertiente meridional pirenaica, como se ha constatado también en otros estudios (Ollero et al., 2021). Será de sumo interés prolongar esta investigación para identificar diferencias entre los diferentes afluentes pirenaicos del Ebro y profundizar en los factores, impactos, respuestas y ajustes y sus procesos acumulativos y *feedbacks*, como principal reto científico a desarrollar en el futuro.

6 Conclusiones

Se ha llevado a cabo un análisis multi-temporal de los cambios geomorfológicos y de la cubierta vegetal de un cauce extenso de gravas. Se ha hecho uso de datos de caudal, de información sobre extracción de gravas y de fotografías aéreas históricas y recientes tomadas por distintos organismos públicos. La metodología se ha aplicado al tramo medio-bajo del río Cinca, situado en Aragón, de elevada dinámica fluvial y en un sector concreto que no había sido estudiado y que ha sido sometido a importantes cambios durante la segunda mitad del siglo XX debido a alteraciones, tanto naturales (aportación, crecidas y estiajes) como antrópicas (regulación, extracción de gravas, introducción de defensas e invasión del lecho fluvial).

Los resultados obtenidos han demostrado que se pueden cuantificar, cartografiar y explicar, a partir de la metodología empleada, los impactos sobre el sistema fluvial y sus respuestas locales (estado vegetal y morfológico) entre 1927 y 2018, obteniéndose las siguientes conclusiones:

1. El régimen de caudales se ha visto profundamente modificado con la entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado en 1974, especialmente en lo que, a aportación media anual, máxima mensual, variabilidad anual de la aportación y frecuencia de las crecidas formativas y patrón de episodios de estiaje se refiere.
2. La introducción de elementos antrópicos en el Territorio Fluvial ha sido decisiva a la hora de explicar la ocupación del mismo y la dinámica geomorfológica del río. La ocupación del Territorio Fluvial se ha visto modificada sustancialmente desde 1927 hasta la actualidad, con la pérdida de importancia del canal activo en favor del corredor ribereño y las zonas alteradas, especialmente en el periodo 1956–1981. Destaca el aumento de la vegetación de ribera más madura, representada por la categoría VRd y la combinación de pastos (CP) y choperas de plantación (Ch).

3. La dinámica geomorfológica del río Cinca en su tramo medio-bajo se ha visto reducida entre 1927 y 2018, especialmente a partir de 1981, con la entrada en funcionamiento del sistema de regulación Mediano-El Grado y la introducción de defensas y roturaciones en el lecho fluvial, que han supuesto una estabilización y simplificación del cauce, todavía presente en la actualidad.

El conocimiento que se desprende de esta investigación, además de confirmar los procesos observados en otros cursos fluviales pirenaicos y europeos, puede resultar muy útil en procedimientos de gestión de cuencas y de cara a abordar estudios de planificación territorial en áreas de influencia fluvial con problemas de inundaciones o erosión lateral, integrando el análisis diacrónico histórico con la ordenación de usos presentes y futuros del suelo.

Agradecimientos: Las/os autoras/es agradecen a José Ramón Sánchez del área de hidrología y cauces de la CHE por proporcionar los datos de caudal y aconsejar en la selección de datos de partida, a Javier Herráiz, responsable de las autorizaciones de extracción de áridos de la CHE, por facilitar la información sobre dichas autorizaciones en el DPH, y a José Ángel Losada, responsable del área de Sistemas de Información Geográfica de la CHE, por el suministro de los fotoplanos de 1927 y fotogramas del vuelo de la CHE de 1989. El análisis hidrológico de la presente investigación se ha realizado en el marco del proyecto CGL2017-83866-C3-1-R: El clima del último siglo en la España peninsular. El primer autor firmante ha obtenido una ayuda del Centro de Estudios de Monzón y Cinca Medio (CEHIMO) para profundizar en esta línea de investigación.

Declaración responsable: Las/os autoras/es declaran que no existe ningún conflicto de interés en relación con la publicación de este artículo. Las tareas se han distribuido de la siguiente manera: V. Trullenque Blanco ha realizado la revisión bibliográfica, el análisis de los datos, la producción cartográfica y la redacción del artículo; A.L. Montealegre Gracia y A. Ollero Ojeda han llevado a cabo el diseño metodológico, la revisión y la redacción de determinadas partes del artículo. Todas/os las/os autoras/es están de acuerdo en la publicación del manuscrito.

Bibliografía

Acín, V., Ollero, A., & Sánchez Fabre, M. (2005). *Evaluación del riesgo de inundación en Fraga por crecidas del Cinca. Propuesta de soluciones* (Unpublished report). Premio de investigación Félix de Azara, Diputación de Huesca.

Acín, V., Granado, D., Díaz, E., Ibisate, A., & Ollero, A. (2011). Análisis de la evolución de los usos del suelo en llanuras de inundación y delimitación del territorio fluvial a través de SIG vectorial. In *I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial*. León.

Aristi, I. (2015). *Effects of global change on the functioning of Mediterranean Rivers* (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco, UPV/EHU, Spain). https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/15973/TESIS_IBON_ARISTI_DE%20LA%20HOZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Baumgart-Kotarba, M. (1980). Braided channel changes at chosen reaches of the Białka river. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, XIV, 113-133.

Balash, J.C., Pino, D., Ruiz-Bellet, J.L., Tuset, J., Barriendos, M., Castelltort, X., & Peña, J.C. (2019). The extreme floods in the Ebro River basin since 1600 CE. *Science of the Total Environment*, 646, 645-660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.325>

Batalla, R.J., Iroumé, A., Hernández, M., Llena, M., Mazzorana, B., & Vericat, D. (2018). Recent geomorphological evolution of a natural river channel in a Mediterranean Chilean basin. *Geomorphology*, 303, 322-337. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.006>

Béjar, M., Vericat, D., Nogales, I., Gallart, F., & Batalla, R.J. (2018). Efectos de las extracciones de áridos sobre el transporte de sedimentos en suspensión en ríos de montaña (alto río Cinca, Pirineo Central). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44(2), 641-658. <https://doi.org/10.18172/cig.3256>

Belletti, B., Dufour, S., & Piégay, H. (2014). Regional assessment of the multi-decadal changes in braided riverscapes following large floods (Example of 12 reaches in South East of France). *Advances in Geosciences*, 37, 57-71. <https://doi.org/10.5194/adgeo-37-57-2014>

Belletti B., Dufour, S., & Piégay, H. (2015). What is the relative effect of space and time to explain the braided river width and island patterns at a regional scale? *River Research and Applications*, 31(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/rra.2714>

Brierley, G.J., & Fryirs, K.A. (2005). *Geomorphology and river management. Applications of the River Styles Framework*. Oxford. <https://doi.org/10.1002/9780470751367>

Bravard, J.P., & Peiry, J.L. (1993). La disparition du tres-sage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement de cours d'eau (19–20ème siècle). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 88, 67-79.

Cadol, D., Rathburn, S.L., & Cooper, D.J. (2011). Aerial photographic analysis of channel narrowing and vegetation expansion in Canyon de Chelly National Monument, Arizona, USA, 1935–2004. *River Research and Applications*, 27(7), 841-856. <https://doi.org/10.1002/rra.1399>

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (2002a). *Atlas del río Cinca. Estudio de la calidad ecológica integral de los tramos fluviales más importantes del río Cinca*. Comisaría de Aguas (Ministerio de Medio Ambiente).

<http://www.chebro.es/contenido.streamFichero.do?idBinario=3360>

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (2002b). *Informe de Síntesis río Cinca. Estudio de la calidad ecológica integral de los tramos fluviales más importantes del río Cinca*. Comisaría de Aguas (Ministerio de Medio Ambiente).

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (2008). *Borrador del Plan Hidrológico del río Cinca. Versión V.1*. Gobierno de Aragón, Ministerio de Medio Ambiente; Generalitat de Catalunya.

Cortada, F.C. (1979). Política hidráulica de templarios y sanjuanistas en el valle del Cinca (Huesca). *Cuadernos de Historia Jerónimo Zurita*, 35-36, 381-445. <https://ifc.dpz.es/recursos/publicaciones/04/09/8castillon.pdf>

Downs, P.W., Dusterhoff, S.R., & Sears, W.A. (2013). Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: lower Santa Clara River, California, USA. *Geomorphology* 189, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.023>

Downs, P.W., & Piégay, H. (2019) Catchment-scale cumulative impact of human activities on river channels in the late Anthropocene: implications, limitations, prospect. *Geomorphology*, 338, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.021>

Downward, S.R., Gurnell, A.M., & Brookes, A. (1994). A methodology for quantifying river channel change using GIS. In L.J. Oliva, R.J. Loughran & J.A. Kesby, *Variability in stream erosion and sediment transport* (pp. 449-456). International Association of Hydrological Sciences. http://hydrologie.org/redbooks/a224/iahs_224_0449.pdf

Dufour, S., Barsoum, N., Muller, E., & Piégay H. (2007). Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drôme (SE

- France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1244-1256. <https://doi.org/10.1002/esp.1556>
- Egozi, E., & Ashmore, P. (2008). Defining and measuring braiding intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 2121-2138. <https://doi.org/10.1002/esp.1658>
- Escuer, J.L. (2004). *El Cinca a Fraga: una reflexió sobre dinàmica fluvial i activiat humana*. Institut d'Estudis del Baix Cinca.
- García Ruiz, J. M., Puigdefábregas, J., & Creus, J. (1985). *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Instituto de Estudios Altoaragoneses, Diputación Provincial de Huesca.
- García Ruiz, J.M., López Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente, S.M., González Sampérez, P., Valero, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal, E., Lana-Renault, N., & Gómez Villar, A. (2015). Los efectos geocológicos del cambio global en el Pirineo Central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 170, <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>
- Ghosh, S., & Mistri, B. (2012). Hydrogeomorphic significance of sinuosity index in relation to river instability: A case study of Damodar River, West Bengal, India. *International Journal of Advances in Earth Sciences*, 1(2), 49-57. <https://doi.org/10.13140/2.1.4424.6089>
- Gibling, M.R. (2018). River systems and the Anthropocene: a Late Pleistocene and Holocene timeline for human influence. *Quaternary*, 1(3), 21. <https://doi.org/10.3390/quat1030021>
- Gilvear, D., Winterbottom, S., & Sickingabula, H. (2000). Character of channel planform change and meander development: Luangwa River, Zambia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(4), 421-436. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200004\)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q)
- Goudie, A.S. (2006). Global warming and fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 79, 384-394. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.023>
- Granado, D., Acín, V., Díaz, E., Ibisate, A., & Ollero, A. (2011). Análisis diacrónico de la migración de cauces fluviales mediante técnicas de SIG vectorial. In *I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial* (pp. 296-304). MARM, CHD y CIREF. https://www.researchgate.net/publication/263307390_Analisis_diacronico_de_la_migracion_de_cauces_fluviales_mediante_tecnicas_de_SIG_vectorial#read
- Hernández, M. (1977). Las riberas del río Cinca en Monzón (Huesca). *Montes*, 189, 243-247.

- Hughes, M.L., McDowell, P.F., & Marcus, W.A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>
- Ibáñez, A., Ollero, A., & Díaz, E. (2011). Influence of catchment processes on fluvial morphology and river habitats. *Limnetica*, 30(2), 169-182. <https://doi.org/10.23818/limn.30.14>
- Lallias-Tacon, S., Liébault, F., & Piégay, H. (2017). Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterising the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses. *Catena*, 149, 742-759. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.038>
- Liébault, F., & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers and streams of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444. <https://doi.org/10.1002/esp.328>
- Llena, M., Vericat, D., Cavalli, M., Crema, S., & Smith, M.W. (2019). The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. *Science of the Total Environment*, 660, 899-912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.479>
- Llena, M., Vericat, D., & Martínez, J.A. (2016). Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca, periodo 1927-2014. In *Actas XIV Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 339-347). S.E.G.
- Llena, M., Vericat, D., & Martínez, J.A. (2018). Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1-2), 53-73. <https://doi.org/10.17735/cyg.v32i1-2.60410>
- Llena, M., Vericat, D., Martínez Casasnovas, J.A., & Smith, M.W. (2020). Geomorphic adjustments to multi-scale disturbances in a mountain river: a century of observations. *Catena*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104584>
- López, J., & García Ruiz, J.M. (2003). Influencia de los embalses sobre el régimen fluvial en los Pirineos centrales. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29, 7-21. <https://doi.org/10.18172/cig.1055>
- MacDonald, T.E., Parker, G., & Leuthe, D.P. (1992). *Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota* (Report). St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. <https://hdl.handle.net/11299/108225>
- Makaske, B. (2001). Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth-Science Reviews*, 53(3-4), 149-196. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00038-6)

Manners, R.B., Schmidt, J.C., & Scott, M.L. (2014) Mechanisms of vegetation-induced channel narrowing of an unregulated canyon river: Results from a natural field-scale experiment. *Geomorphology*, 211, 100-115. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.12.033>

Marqués, A.L. (2018). Alteraciones hidrogeomorfológicas en el Bajo Gállego a partir del registro instrumental (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza, Spain). <https://zaguan.unizar.es/record/69597/files/TESIS-2018-032.pdf>

Marquínez, J., Fernández, E., & Menéndez, R. (2018). Transformaciones geomorfológicas en ríos aluviales cantábricos (NO España): modificaciones antrópicas vs cambio global. In C. Garcia, L. Gómez-Pujol, E. Morán-Tejeda & R.J. Batalla (Eds.), *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos* (pp. 359-362). UIB, SEG. https://www.researchgate.net/profile/Celso_Garcia/publication/329322409_Geomorfologia_del_Antropoceno_Efectos_del_cambio_global_sobre_los_procesos_geomorfologicos/links/5d9093fd92851c33e946b54f/Geomorfologia-del-Antropoceno-Efectos-del-cambio-global-sobre-los-procesos-geomorfologicos.pdf

Martín Vide, J.P., Ferrer-Boix, C., & Ollero, A. (2010). Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117(3-4), 261-271. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.019>

Michalková, M., Piégay, H., Kondolf, G.M., & Greco, S.E. (2011). Lateral erosion of the Sacramento River, California (1942–1999), and responses of channel and floodplain lake to human influences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2), 257-272. <https://doi.org/10.1002/esp.2106>

Montgomery, D.R., & Bolton, S.M. (2003). Hydrogeomorphic variability and river restoration. In R.C. Wissmar & P.A. Bisson (Eds.), *Strategies for restoring river ecosystems: sources of variability and uncertainty in natural and managed systems* (pp. 39-80). American Fisheries Society. https://people.wou.edu/~taylors/g407/restoration/Montgomery_Bolton_2003_Hydrogeomorph_restoration.pdf

Muñoz-Narciso, E. (2014). Aplicación de fotogrametría digital automatizada en geomorfología: dinámica morfo-sedimentaria en ríos de gravas (Master's Thesis, Universidad de Zaragoza, Spain). <https://core.ac.uk/download/pdf/289977185.pdf>

Muñoz-Narciso, E., Béjar, M., Tena, A., Vericat, D., Ramos, E., Brasington, J., Gibbins, C.N., & Batalla, R.J. (2014). Generación de modelos topográficos a partir de fotogrametría digital automatizada en un río de gravas altamente dinámico. In S. Schnabel & A. Gómez (Eds.),

Avances de la Geomorfología en España 2012-2014 (pp. 335-338). XIII Reunión Nacional de Geomorfología. https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Tarrio/publication/327561446_Comparacion_entre_las_tasas_de_transporte_estimadas_con_clastos_trazadores_y_las_obtenidas_con_ecuaciones_teoricas_Rio_Pigueena_Vertiente_Norte_de_la_Cordillera_Cantabrica/links/5b96bb06299bf147393ddb98/Comparacion-entre-las-tasas-de-transporte-estimadas-con-clastos-trazadores-y-las-obtenidas-con-ecuaciones-teoricas-Rio-Pigueena-Vertiente-Norte-de-la-Cordillera-Cantabrica.pdf

Muñoz-Narciso, E., Vericat, D., Smith, M., & Batalla, R.J. (2018). Cambios morfológicos (1956-2012) en un río de gravas afectado por múltiples impactos antrópicos (río Cinca, Pirineos Centrales). In C. Garcia, L. Gómez-Pujol, E. Morán-Tejeda, R.J. Batalla (Eds.), *Geomorfología del "Antropoceno": efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos* (pp. 253-256). XV Reunión Nacional de Geomorfología, Universitat de les Illes Balears, Mallorca. https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Tarrio/publication/327561446_Comparacion_entre_las_tasas_de_transporte_estimadas_con_clastos_trazadores_y_las_obtenidas_con_ecuaciones_teoricas_Rio_Pigueena_Vertiente_Norte_de_la_Cordillera_Cantabrica/links/5b96bb06299bf147393ddb98/Comparacion-entre-las-tasas-de-transporte-estimadas-con-clastos-trazadores-y-las-obtenidas-con-ecuaciones-teoricas-Rio-Pigueena-Vertiente-Norte-de-la-Cordillera-Cantabrica.pdf

Ollero A. (2010). Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology* 117(3-4), 247-260. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.015>

Ollero, A. (2011). Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: propuesta metodológica. *Zubía*, monográfico 23, 189-202. https://www.researchgate.net/publication/283516995_Los_cauces_fluviales_como_indicadores_de_cambio_global_propuesta_metodologica#read

Ollero, A., Miguélez, E., Sánchez-Navarro, R., & Elosegi, U. (2002). Análisis, diagnóstico y propuestas para la gestión del río Cinca en el tramo Presa de El Grado-Confluencia del Vero. *Somontano*, 7, 7-31. <http://www.cesomontano.es/images/pdf/Somontano7.pdf>

Ollero, A., Cadiñanos, J.A., Díaz, E., Elosegi, U., García, F., Ibisate, A., Meaza, G., Ormaetxea, O., & Sáenz de Olazagoitia, A. (2001). Análisis y diagnóstico del sistema fluvial y propuestas para la gestión de un tramo regulado en el río Cinca (Huesca). In *Actas XVII Congreso de Geógrafos Españoles* (pp. 185-188). Asociación Española de Geografía.

- Ollero, A., Ibisate, A., & Elso, J. (2009). El territorio fluvial y sus dificultades de aplicación. *Geographica*, 56, 37-62. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.200956804
- Ollero, A., Ibisate, A., Granado, D., & Real de Asua, R. (2015). Channel responses to global change and local impacts: perspectives and tools for floodplain management (Ebro River and tributaries, NE Spain). In P.F. Hudson & H. Middelkoop (Ed.), *Geomorphic approaches to integrated floodplain management of lowland fluvial systems in North America and Europe* (pp. 27-52). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2380-9_3
- Ollero, A., García, J.H., Ibisate, A., & Sánchez Fabre, M. (2021). Updated knowledge on floods and risk management in the Middle Ebro River: the “Anthropocene” context and river resilience. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47(1), 73-94 <https://doi.org/10.18172/cig.4730>
- Ozturk, D., & Sesli, F.A. (2015). Determination of temporal changes in the sinuosity and braiding characteristics of the Kizilirmak River, Turkey. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(5), 2095-2112. <https://doi.org/10.15244/pjoes/58765>
- Parrizas, M. (2016). *Modelización tridimensional mediante técnicas SFM de vuelos fotogramétricos antiguos. Evaluación de posibilidades aplicadas al vuelo de 1957* (Undergraduate Final Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Spain). <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68378/PARRIZAS%20-%20Modelizaci%3b%20tridimensional%20mediante%20t%3a9cnicas%20SFM%20%20de%20vuelos%20fotogram%3a9tricos%20antiguos.....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peña, J.L., Longares, L.A., Rubio, V., Sampietro, M.M., & Sánchez Fabre, M. (2020). Dynamic changes in the lower Gállego river (Ebro basin, NE Spain) and their relationship with anthropic activities and the quaternary substrate. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2), 371-393. <https://doi.org/10.18172/cig.4409>
- Petts, G.E., & Gurnell, A.M. (2005). Dams and geomorphology: research progress and future directions. *Geomorphology*, 71(1-2), 27-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.02.015>
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L., & Bourdin, L. (2009). Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71, 371-388. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>
- Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., Dufour, S., Liébault, F., Ruiz Villanueva, V., & Slater, L. (2020). Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 157-188. <https://doi.org/10.1002/esp.4787>

Rădoane, M., Perțoiu, I., Cristea, I., & Chiriloaei, F. (2013). River channel planform changes based on successive cartographic data. A methodological approach. *Revista de Geomorfologie*, 15, 69-88.

https://www.researchgate.net/profile/Noomene_Fehri/publication/283714431_Extension_urbaine_et_risque_d'inondation_autour_de_l'extremite_septentrionale_du_Jebel_Bou_Garnine_Grand_Tunis_-_Tunisie_Revista_de_Geomorfologie_Roumanie_vol_15_p_13-26/links/5644545808aef646e6ca7ad2/Extension-urbaine-et-risque-dinondation-autour-de-l'extremite-septentrionale-du-Jebel-Bou-Garnine-Grand-Tunis-Tunisie-Revista-de-Geomorfologie-Roumanie-vol-15-p-13-26.pdf#page=69

Raluy, R. (1982). *Monzón mi Ciudad 1920-1950*. Tipo Línea

Scorpio, V., & Roskopf, C.M. (2016). Channel adjustments in a Mediterranean river over the last 150 years in the context of anthropic and natural controls. *Geomorphology* 275, 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.017>

Scorpio, V., Surian, N., Cucato, M., Dai Prá, E., Zolezzi, G., & Comiti F. (2018). Channel changes of the Adige River (Eastern Italian Alps) over the last 1000 years and identification of the historical fluvial corridor. *Journal of Maps*, 14(2), 680-691. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1531074>

Scott, M.L., Friedman, J.M., & Auble, G.T. (1996). Fluvial process and the establishment of bottomland trees. *Geomorphology*, 14(4), 327-39. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00046-8](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00046-8)

Segura, F., & Sanchís, C. (2018). Estrechamiento de cauces y cambio de patrón en cursos fluviales mediterráneos como consecuencia del cambio global en las últimas seis décadas: indicadores geomorfológicos. In C. Garcia, L. Gómez-Pujol, E. Morán-Tejeda & R.J. Batalla (Eds.), *Geomorfología del "Antropoceno": Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos*. XV Reunión Nacional de Geomorfología (pp. 395-398). Universitat de les Illes Balears. https://www.researchgate.net/profile/Celso_Garcia/publication/329322409_Geomorfologia_del_Antropoceno_Efectos_del_cambio_global_sobre_los_procesos_geomorfologicos/links/5d9093fd92851c33e946b54f/Geomorfologia-del-Antropoceno-Efectos-del-cambio-global-sobre-los-procesos-geomorfologicos.pdf

Serrano, R., & Longares, L.A. (2010). Valoración de áreas faunísticas en el Aiguabarreig del Segre, Cinca y Ebro. *Geographicalia*, 57, 85-106. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201057811

- Serrano, R., Mora, D., Ollero, A., Sánchez, M., & Saz, M. A. (2014). Respuesta hidrológica al evento de precipitación de junio de 2013 en el Pirineo central. *Investigaciones Geográficas*, 62, 5-21.
- Surian, N., & Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50, 307–326. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00219-2)
- Surian, N., Barban, M., Ziliani, L., Monegato, G., Bertoldi, W., & Comiti, F. (2015). Vegetation turnover in a braided river: frequency and effectiveness of floods of different magnitude. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 542-558. <https://doi.org/10.1002/esp.3660>
- Tal, M., & Paola, C. (2010). Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(9), 1014-2028. <https://doi.org/10.1002/esp.1908>
- Toone, J., Rice, S.P., & Piégay, H. (2014). Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drôme River, southeast France: contingent responses to external and internal controls. *Geomorphology*, 205, 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.033>
- Tuset, J., Vericat, D., & Batalla, R.J. (2015). Evolución morfo-sedimentaria del tramo medio del río Segre. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, 41(1), 23-62. <https://doi.org/10.18172/cig.2707>
- Valero, B.L., Navas Izquierdo, A., Navas Izquierdo, A., & Machín Gayarre, J. (1997). Una aproximación sedimentológica al aterramiento de embalses y la erosión en cuencas de montaña: el embalse de Barasona y la cuenca de Esera-Isábera (Pirineos centrales, Huesca). *Cuadernos Información Geográfica*, 22-23, 7-31.
https://digital.csic.es/bitstream/10261/4791/1/NavasA_CuadernosInvGeog_.pdf
- Vilela, I. (2011). Caracterización del curso bajo del Cinca entre Velilla de Cinca y Fraga (Master's Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain).
- Villarroya, C., & Xuclá, R.S. (2003). *La delimitación del dominio público hidráulico y de sus zonas inundables: el proyecto Linde*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Vosselmann, G., & Maas, H.G. (2010). *Airbone and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing. <https://b-ok.asia/dl/2359769/7c9886?dsource=recommend>

Wohl, E. (2006). Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79(3-4), 217-248. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.020>

Wohl, E. (2019). Forgotten legacies: understanding and mitigating historical human alterations of river corridors. *Water Resources Research*, 55, 5181-5201. <https://doi.org/10.1029/2018WR024433>

Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Summerhayes, C., Wolfe, A.P., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Crutzen, P., Ellis, E.C., Fairchild, I.J., Galuszka, A., Haff, P., Hajdas, I., Head, M.J., Ivar do Sul, J., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Neal, C., Odada, E., Oreskes, N., Steffen, W., Syvitski, J.P.M., Wapreisch, M., & Williams, M. (2017). The Working Group on the 'Anthropocene': summary of evidence and recommendations. *Anthropocene*, 19, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.09.001>