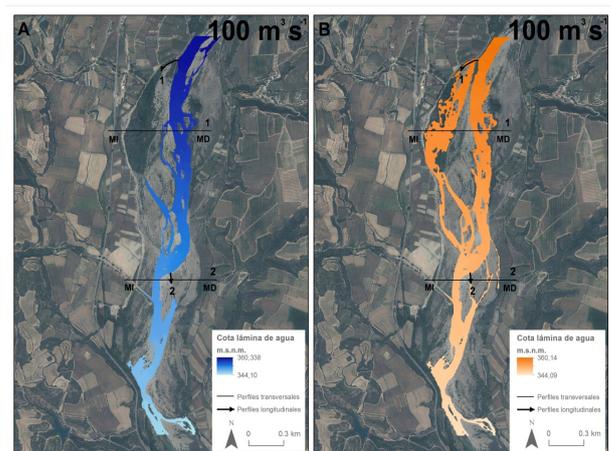
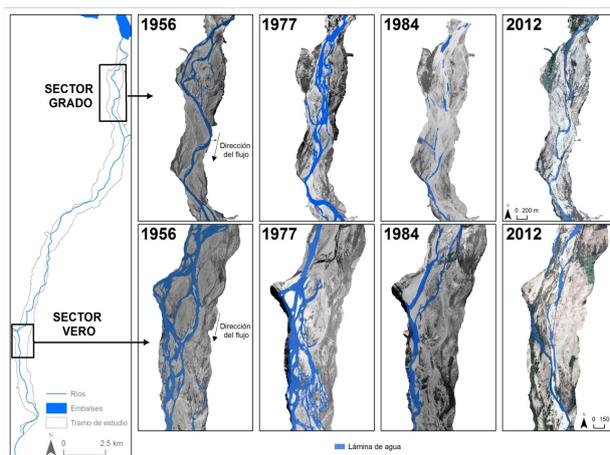




# DISEÑO DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO: APLICACIÓN EN EL RÍO CINCA







---

# DISEÑO DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO: APLICACIÓN EN EL RÍO CINCA

---

**PROMOTOR:**

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO



**ÁREA:**

Comisaría de Aguas. Área de Calidad de las Aguas

**DIRECCIÓN DEL PROYECTO:**

Javier San Román Saldaña

**EMPRESA CONSULTORA:**

RIUS: Fluvial Dynamics Research Group,  
Universitat de Lleida



**EQUIPO DE TRABAJO:**

Ramon Batalla, Damià Vericat, Alvaro Tena

**PRESUPUESTO DE LA ADJUDICACIÓN:**

10.079,30 Euros (IVA incluido)

**CONTENIDO:**

MEMORIA/ANEJOS/CARTOGRAFÍA/CD

**AÑO DE EJECUCIÓN:**

2018

**FECHA ENTREGA:**

Enero 2019



REFERENCIA IMÁGENES PORTADA:

Superior izquierda: Gravas cubiertas por biofilm debido a la escasa circulación del agua en el sector de *Grado* (Alvaro Tena)

Superior derecha: Presencia de mota en la sección del *Vero* (Alvaro Tena)

Inferior izquierda: Evolución histórica del número de canales activos en los sectores de estudio de *Grado* y *Vero* (Alvaro tena)

Inferior derecha: Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios (Alvaro Tena)

CITA DEL DOCUMENTO: Confederación Hidrográfica del Ebro (2018). Diseño de crecidas de mantenimiento: aplicación en el río Cinca. 2018, 81 pág. Disponible en PDF en la web: <http://www.chebro.es>

El presente informe pertenece al Dominio Público en cuanto a los Derechos Patrimoniales recogidos por el Convenio de Berna. Sin embargo, se reconocen los Derechos de los Autores y de la Confederación Hidrográfica del Ebro a preservar la integridad del mismo, las alteraciones o la realización de derivados sin la preceptiva autorización administrativa con fines comerciales, o la cita de la fuente original en cuanto a la infracción por plagio o colusión. A los efectos prevenidos, las autorizaciones para uso no científico del contenido deberán solicitarse a la Confederación Hidrográfica del Ebro.



## DISEÑO DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO: APLICACIÓN EN EL RÍO CINCA

---

### Resumen

*Este informe presenta el planteamiento metodológico llevado a cabo para el diseño de crecidas de mantenimiento con objetivos de rehabilitación a partir de datos públicos y de herramientas de libre acceso. En este caso concreto, esta integración metodológica, se centra en el medio y bajo Cinca, pero puede ser aplicada en cualquier río de la cuenca del Ebro, ya que son numerosos los ríos en la cuenca que plantean situaciones de impactos similares a largo plazo.*

*La implementación de un programa de crecidas de mantenimiento en el río Cinca aguas abajo del sistema de embalses Mediano-El Grado basado en criterios hidráulicos, geomorfológicos y ambientales, junto con otras medidas de rehabilitación fluvial como la mejora de la conectividad lateral, contribuyen a la mejora del estado morfológico del tramo de estudio, y por ende, del funcionamiento y la estructura de todo el ecosistema asociado. El diseño de la crecida de mantenimiento tipo se basa en hidrogramas de crecidas naturales registradas en este tramo de río, si bien con una magnitud y duración inferiores. Con una duración de 15 horas, una magnitud de  $350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y una tasa de incremento de caudal de  $14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{h}^{-1}$ , la crecida tipo permite la movilización parcial de los sedimentos del lecho y la reconexión del canal principal con sus canales secundarios y con su llanura de inundación. Para poder mantener el pico de la crecida y que ésta sea efectiva en tramos más distantes a la presa de El Grado será necesaria la aportación de caudales de crecida desde la presa de Joaquín Costa (río Ésera). Esta medida, además, mejorará el estado morfológico del tramo situado aguas abajo de la presa de Joaquín Costa, que presenta un claro deterioro hidro-morfológico.*

*La aplicación de un programa de crecidas de mantenimiento en un sistema tan complejo como el fluvial requiere una continua re-evaluación para que estas medidas se adapten en cada momento a las necesidades del sistema (i.e. gestión adaptativa). Es por esto que la monitorización y la toma de datos en el campo es fundamental, tanto en los momentos previos a la crecida, para la mejora de los datos disponibles, como en los momentos posteriores a la crecida, para validar los datos obtenidos mediante el modelo, evaluar los efectos de la crecida y verificar que la crecida no haya generado impactos no deseados en el cauce.*

*El diseño, implementación y seguimiento de estas acciones de restauración fluvial se prevén fundamentales para que las confederaciones hidrográficas y las agencias del agua alcancen los objetivos de mejora del estado de las masas de agua presentes en sus demarcaciones.*

## FLUSHING FLOW DESIGN: APLICATION TO THE CINCA RIVER

---

### Abstract

*This report presents the methodological approach carried out for the design of flushing flows with rehabilitation objectives based on public data and open access tools. In this specific case, this methodological integration focuses on the middle and lower Cinca, but it can be applied in any river in the Ebro basin, since there are numerous rivers in the basin that are object of similar long-term impacts.*

*The implementation of a flushing flow program in the Cinca River downstream of the Mediano-El Grado reservoir system based on hydraulic, geomorphological and environmental criteria, together with other river rehabilitation measures such as the improvement of lateral connectivity, contribute to the improvement of the morphological state of the study section, and therefore, of the functioning and structure of the entire associated ecosystem. The design of the type flushing flow is based on hydrographs of natural floods recorded in this river reach, although with a lower magnitude and duration. With 15 hours duration,  $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  of magnitude and a ramping rate of  $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , the designed hydrograph allows partial mobilization of bed sediments and secondary channel reconnection. In order to maintain the flood peak and to be effective in sections more distant from the El Grado dam, the contribution of flood flows from the Joaquín Costa dam (Ésera river) will be necessary. This measure will also improve the morphological state of the section downstream of the Joaquín Costa dam, which suffers a clear hydro-morphological deterioration.*

*The application of a flushing flow program in a system as complex as the fluvial, requires continuous re-evaluation so that these measures are always adapted to the needs of the system (i.e. adaptive management). This is why monitoring and field data collection is essential, both before the flood implementation, for the improvement of the available data, and after the flood, to validate the data obtained through the model, evaluate the effects of the flood and verify that the flood has not generated undesirable impacts on the channel.*

*The design, implementation and monitoring of these river restoration actions are essential for water basin managers and water agencies to achieve the objectives of improving the state of water bodies present in their demarcations.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DISEÑO DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO: APLICACIÓN EN EL RÍO CINCA .....</b>	<b>1</b>
<b>DISEÑO DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO: APLICACIÓN EN EL RÍO CINCA .....</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>2 LA CUENCA DEL CINCA.....</b>	<b>16</b>
<b>3 DISEÑO DEL TRABAJO .....</b>	<b>18</b>
<b>4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
4.1 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE CRECIDAS DEL RÍO CINCA EN BASE A LOS REGISTROS DISPONIBLES EN ESTACIONES DE AFORO .....	21
4.2 DIAGNÓSTICO MORFO-SEDIMENTARIO DEL CINCA MEDIO Y BAJO A PARTIR DE ANÁLISIS DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS HISTÓRICAS Y ACTUALES.....	23
4.3 DEFINICIÓN DE POSIBLES OBJETIVOS DE MEJORA AMBIENTAL EN BASE A LOS RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO.....	25
4.4 PROPUESTA DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO PARA SU FUTURA IMPLEMENTACIÓN DENTRO DEL PROGRAMA DE CAUDALES AMBIENTALES EN LA CUENCA DEL CINCA EN BASE A LOS OBJETIVOS DE MEJORA PROPUESTOS.....	27
4.4.1 Definición del hidrograma de crecida para su aplicación en el tramo bajo del río Cinca.....	27
4.4.2 Modelización hidráulica .....	28
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
5.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE CRECIDAS .....	30
5.1.1 Aportaciones medias anuales .....	31
5.1.2 Caudales medios mensuales .....	32
5.1.3 Caudales medios diarios .....	34
5.1.4 Análisis de crecidas.....	38
5.2 DIAGNÓSTICO MORFO-SEDIMENTARIO .....	42
5.3 CONDICIONES DE CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA ACTUAL .....	47
5.4 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE MEJORA AMBIENTAL.....	49



5.5	<i>DEFINICIÓN DEL HIDROGRAMA DE CRECIDA DE MANTENIMIENTO</i> .....	52
5.6	<i>EVALUACIÓN DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS: MEJORA DE LA CONECTIVIDAD LATERAL</i> .....	54
5.6.1	<i>Sector Grado</i> .....	54
5.6.2	<i>Sector Vero</i> .....	58
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES</b> .....	<b>62</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Tabla sintética de las series de datos utilizadas para el análisis hidrológico del Cinca .....	22
Tabla 2. Tabla resumen de las series utilizadas para el análisis hidrológico .....	31
Tabla 3. Percentiles representativos de las series de caudal .....	35
Tabla 4. Variación en % de los percentiles representativos de las series de caudal .....	36
Tabla 5. Tabla resumen de los caudales asociados a periodos de retorno $Q_i$ (en $m^3s^{-1}$ ).....	39
Tabla 6. Tabla resumen de los caudales asociados a $Q_{>25}$ .....	40
Tabla 7. Tabla resumen de los caudales asociados a $Q_{5-25}$ .....	40
Tabla 8. Tabla resumen de los caudales asociados a $Q_{1-15}$ .....	41
Tabla 9. Principales características del diseño de crecida de mantenimiento.....	53

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1:(A), Localización de las cuencas del Ebro y del Cinca en la península Ibérica, (B), localización de la cuenca del Cinca en la cuenca del Ebro y (C), detalle de la cuenca del Cinca en el que se muestran los principales ríos y embalses. El cuadro rojo delimita el área de estudio. ....	17
Figura 2. Flujo de trabajo seguido en la elaboración del estudio .....	20
Figura 3. Tramo de estudio en (A), 1956 y (B), 2012.....	24
Figura 4. (A), Tramo y sectores de estudio, (B), sector Grado y (C), sector Vero.....	25
Figura 5. En el <i>sector Grado</i> se pueden distinguir los siguientes impactos: (A), Colonización de la vegetación de canales secundarios, (B), presencia de mota, (C), presencia de aguas estancadas, y acorazamiento por movilidad selectiva y sostenida. ....	26
Figura 6. En el <i>sector Vero</i> se pueden distinguir los siguientes procesos: (A) Barras colgadas por incisión del canal, (B) aguas estancadas y presencia de mota, (C) estabilización de la llanura aluvial como consecuencia de las motas, y, (D) colonización de la vegetación de zonas anteriormente activas....	26
Figura 7. Alteración del régimen hidrológico del río Cinca en las estaciones de Grado (A) y de Fraga (B). Las barras verticales muestran el error típico. ....	32
Figura 8. Alteración del régimen hidrológico del río Ésera. Pre se refiere al caudal entrante y Post al caudal saliente del embalse Barasona. Las barras verticales muestran el error típico. ....	33
Figura 9. Alteración del régimen hidrológico del río Alcanadre.....	34
Figura 10. Curvas de Frecuencia de caudales para las estaciones de aforo de (A), Grado, (B), Fraga, (C), Ésera (aguas arriba y aguas abajo de la presa de Barasona), y (D), Alcanadre.....	37
Figura 11. Ejemplo de crecida en el río Cinca y sus principales afluentes .....	42
Figura 12. Evolución del número de canales activos en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	43
Figura 13. Evolución de la anchura del cauce activo en todo el tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012.....	44
Figura 14. Evolución del estado (activo en color marrón y estable en color verde) de las unidades morfológicas en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.....	44
Figura 15. Evolución de las superficies activas y estabilizadas en la totalidad del tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012.....	45

Figura 16. Evolución de las unidades morfológicas (barras) en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Está figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	46
Figura 17. Evolución del tipo de barras en la totalidad del tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012. ....	46
Figura 18. Ejemplo de colonización de vegetación en áreas anteriormente activas entre (A) 1956 y (B) 2012. ....	47
Figura 19. Cota de lámina de agua (LA) asociada a caudales de crecida representativos. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	48
Figura 20. Perfiles transversales en (A), una antigua zona trezada del río en el sector Grado y (B), zona del río afectada por una mota en el sector del Vero. Lámina de agua en A, asociada a $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Lámina de agua en B asociada a un caudal de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Ver localización de los perfiles en la figura 19. ....	49
Figura 21. (A), Sector Grado en 1956, y (B), Sector Grado en 2012 mostrando la ubicación de la mota y los brazos secundarios a reconectar. ....	50
Figura 22. (A), Sector Vero en 1956, y (B), Sector Vero en 2012 mostrando la mota y las zonas a derruir. ....	51
Figura 23. Diseño de hidrograma de crecida de mantenimiento. ....	52
Figura 24. Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 1 de la figura 25). ....	54
Figura 25. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	55
Figura 26. Calados asociados a un caudal de $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios (ver figura 25 para su localización). ....	56
Figura 27. Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 2 de la figura 25). ....	56
Figura 28. Calados asociados a un caudal de $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios. ....	57
Figura 29. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	58
Figura 30. Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 1 de la figura 31). ....	59



Figura 31. Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios aislados por una mota en el sector Vero. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	59
Figura 32. Calados asociados a un caudal de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de un brazo secundario desconectado por una mota en el sector del Vero. ....	60
Figura 33. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios aislados por una mota en el sector del Vero. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos. ....	61
Figura 34. Calados asociados a un caudal de $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de un brazo secundario desconectado por una mota en el sector del Vero. ....	62
Figura 35. Diseño de hidrograma y principales características de crecida de mantenimiento .....	64

## ÍNDICE ANEXOS

---

Figura A1. Evolución del número de canales activos en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. ....	70
Figura A2. Evolución del estado (activo y estable) de las unidades morfológicas en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012.....	71
Figura A3. Evolución de las unidades morfológicas (barras) en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. ....	72
Figura A4. Cota de lámina de agua asociada a caudales de crecida representativos. ....	73
Figura A5. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado. ....	74
Figura A6. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado. ....	75
Figura A7. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado. ....	76
Figura A8. Cota de lámina de agua asociada a un caudal de $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado. ....	77
Figura A9. Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero. ....	78
Figura A10. Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero. ....	79
Figura A11. Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero. ....	80
Figura A12. Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero. ....	81





## 1 INTRODUCCIÓN

Los ríos conducen el agua de los continentes (escorrentía superficial) a los océanos, convirtiéndose así en el principal mecanismo para el transporte de los materiales resultantes de la meteorización y denudación del relieve (sedimentos). En condiciones naturales, los ríos tienden a mantener un equilibrio morfo-sedimentario a largo plazo, por lo que la cantidad de sedimento procedente de las zonas de erosión es equivalente a la cantidad recibida en las zonas de sedimentación. Este equilibrio entre los elementos morfológicos (distribución granulométrica, disposición, estructura del lecho, movilidad, etc.) y la hidráulica del flujo de agua circulante son responsables de la creación de las condiciones necesarias para el sustento de las comunidades bentónicas y de ribera.

Este equilibrio en la dinámica morfo-sedimentaria ha sido alterado de una manera pronunciada en los últimos siglos. La presión antrópica ha ocasionado una alteración de dicho equilibrio, afectando entre otras cosas a la continuidad longitudinal del río (singularmente por presas y azudes) y la conectividad lateral (por motas y escolleras), fragmentando el corredor fluvial e impidiendo en ocasiones la conexión entre el cauce y su llanura de inundación. Esta desconexión fluvial, tanto longitudinal como lateral afecta, no sólo a los procesos como el transporte de sedimentos, fundamentales en la creación y mantenimiento de hábitats, sino también a procesos migratorios de multitud de especies, principalmente de peces, con importantes repercusiones tanto ecológicas como económicas.

La mayor parte de los cursos de la cuenca del Ebro están afectados por este tipo de alteraciones, y uno de los aspectos a mejorar para alcanzar las exigencias ecológicas derivadas de la implantación de la Directiva Marco del Agua a través del Plan de Cuenca es la continuidad fluvial. Es por eso que se hace necesaria la aplicación de medidas de rehabilitación que se basen en recuperar la dinámica morfo-sedimentaria de los ríos, tales como la eliminación de barreras laterales y la reconexión de brazos secundarios, entre otras medidas. Sin embargo, la implementación de estas medidas puede no alcanzar los objetivos deseados si no se toman otras medidas complementarias que intenten paliar los efectos de las barreras transversales (e.g. déficit de sedimentos aguas abajo), como pueden ser aquellas medidas basadas en las crecidas de mantenimiento y la rehabilitación del régimen ambiental de caudales.

Un ejemplo de implementación de crecidas de mantenimiento lo podemos encontrar en el tramo bajo del río Ebro. Para paliar los impactos causados aguas abajo del sistema de presas de Mequinenza-Ribarroja-Flix, en los programas de restauración fluvial se ha generalizado el

uso de crecidas de mantenimiento. Estas crecidas artificiales han sido diseñadas con el objetivo de reproducir la acción de las crecidas naturales en tramos localizados aguas abajo de las presas, en los que su ocurrencia se ha visto reducida drásticamente, con la voluntad de controlar el exceso de macrófitos (Batalla y Vericat, 2009; Tena et al., 2012). En este contexto, científicos de la Universidad de Lleida, en colaboración con la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y Endesa Generación SA han estado trabajando desde 2002 en el diseño, implementación, monitorización y modelización de crecidas de mantenimiento para mejorar el estado morfológico y ecológico del tramo bajo del río Ebro.

En este mismo contexto, el río Cinca es un ejemplo de río en el que su dinámica morfo-sedimentaria ha sido fuertemente alterada. Aguas abajo del sistema de embalses de Mediano-El Grado se han detectado una serie de cambios hidromorfológicos que incluyen la alteración del régimen de caudales y de la frecuencia y magnitud de las crecidas, estrechamiento del canal, incisión, y estabilización de la vegetación ribereña, lo que habitualmente comporta una degradación del ecosistema fluvial, tanto en estructura como en funcionamiento. Sin embargo, a la vez que las presas pueden causar impactos en los tramos aguas abajo de estas, también pueden ser utilizadas para revertir la situación, pudiendo ser empleadas como herramientas para la mejora hidromorfológica del río mediante programas de crecidas de mantenimiento.

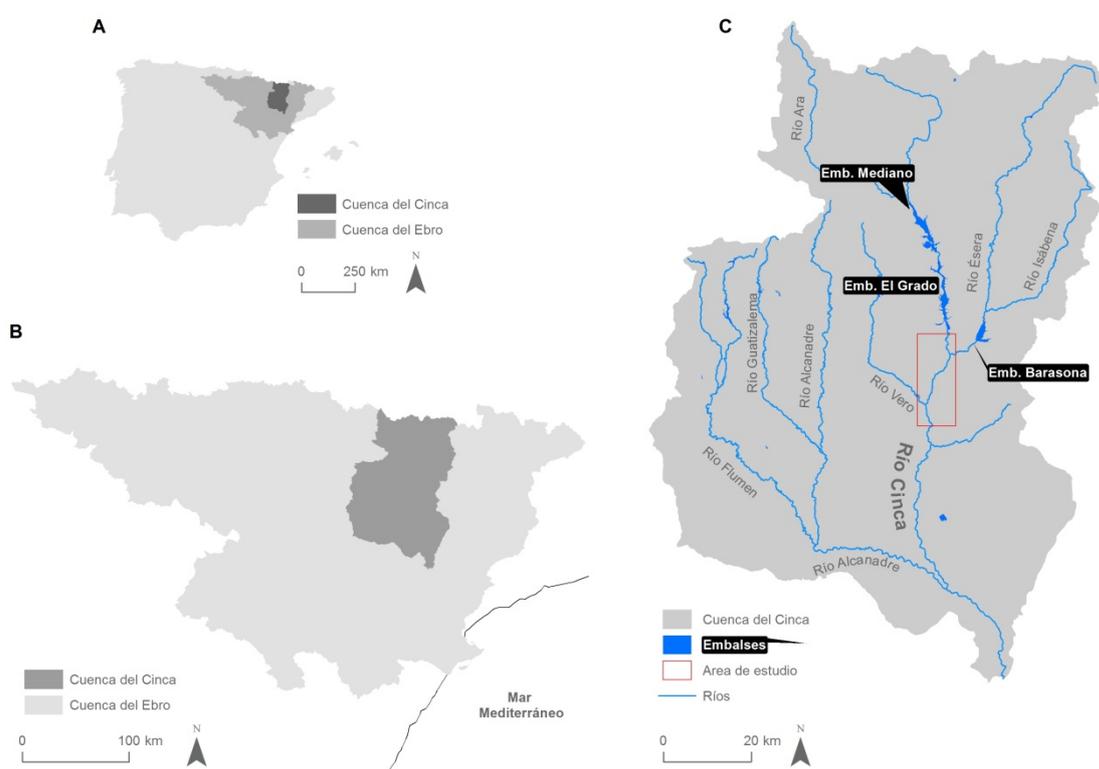
El objetivo de este trabajo es avanzar en el diseño de un programa de crecidas de mantenimiento para su implementación en el río Cinca aguas abajo del sistema de embalses Mediano-El Grado en base a criterios hidráulicos, geomorfológicos y ambientales, que, junto con otras medidas de rehabilitación fluvial, contribuyan a mejorar la dinámica morfo-sedimentaria y con ello ecosistémica de dicho tramo.

El diseño, implementación y seguimiento de éstas acciones de restauración fluvial se prevén fundamentales para que las confederaciones hidrográficas y las agencias del agua alcancen los objetivos de mejora del estado de las masas de agua presentes en sus demarcaciones.

## **2 LA CUENCA DEL CINCA**

Con una cuenca vertiente de 9740 km<sup>2</sup>, la del Cinca es una de las sub-cuencas más importantes dentro de la cuenca del Ebro. El río Cinca cuenta con un alto gradiente topográfico desde su cabecera en el lago de Marboré (2500 msnm) hasta la desembocadura en el Segre (75 msnm) en Massalcoreig, pocos kilómetros antes de su confluencia con el Ebro en Mequinzenza. A lo largo de sus 191 km, el Cinca recoge las aguas de terrenos agrestes con profundos barrancos, pero también de grandes ríos, siendo el Ara, el Ésera-Isábena, y más tarde el Alcanadre, sus principales afluentes (Figura 1C).

El río Cinca presenta un régimen nivo-pluvial, con un máximo en primavera y un caudal relativamente constante en verano. La precipitación media anual en la cuenca varía de 1500 mm en las partes altas, a menos de 380 mm en la depresión del Ebro. La estación de aforo localizada más aguas abajo se encuentra en Fraga, donde el caudal medio anual es de  $81 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , y la escorrentía media anual es de  $2500 \text{ hm}^3$  (1948-2018). El caudal máximo histórico alcanzó los  $3900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en 1907, aunque algunos cálculos recientes estiman que durante la crecida de 1982 se alcanzaron los  $4194 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (CEDEX).



**Figura 1:**(A), Localización de las cuencas del Ebro y del Cinca en la península Ibérica, (B), localización de la cuenca del Cinca en la cuenca del Ebro y (C), detalle de la cuenca del Cinca en el que se muestran los principales ríos y embalses. El cuadro rojo delimita el área de estudio.

La cuenca del río Cinca está regulada por tres grandes presas, con dos de ellas regulando directamente el caudal del río Cinca; la presa de Mediano ( $436 \text{ hm}^3$ ; Figura 1C) y la presa de El Grado ( $400 \text{ hm}^3$ ; Figura 1C). Unos kilómetros aguas abajo de la presa de El Grado se encuentra la confluencia con el sistema Ésera-Isábena, regulado por la presa del embalse de Barasona, llamada de Joaquín Costa ( $92 \text{ hm}^3$ ; Figura 1C). En total, estos embalses regulan el 35% de la aportación hídrica de la cuenca. La regulación altera el régimen hidrológico y de manera significativa reduce los caudales máximos. La retención de sedimentos por parte de estos embalses también es remarcable. Según la curva de Brune (1953), la capacidad de retención de

sedimentos por parte de los embalses de Mediano y Barasona es del 86 y el 94%, respectivamente (Batalla y Vericat, 2011). Hay que destacar sin embargo la notable contribución hídrica y sedimentaria (mayoritariamente sedimento fino) del río Alcanadre al no existir ninguna presa en su curso principal. La alteración del régimen hidrológico (y de crecidas) y la retención de sedimentos en las presas han causado una serie de ajustes morfológicos aguas abajo de las presas. En el tramo localizado aguas abajo de la presa de El Grado se observan procesos tales como la estabilización de la llanura de inundación por la invasión de la vegetación, y el estrechamiento e incisión del canal, todo ello favoreciendo la transformación de un río trezado a sinuoso y desconectando el canal principal de su llanura aluvial.

En este estudio se ha tenido en cuenta el tramo de río localizado aguas abajo del embalse de El Grado. Este tramo incluye el Cinca medio y bajo, así como sus afluentes principales, los ríos Ésera y Alcanadre. La pendiente media de este tramo es de 0,029%. La longitud del cauce es de 107,8 km, mientras que la longitud del valle en línea recta es de 83 km, por lo que el índice de sinuosidad es de 1,28, valor que corresponde ya a un canal de tipo sinuoso (Schumm, 1979). En el tramo de estudio se pueden encontrar tramos con varios brazos secundarios que, sin embargo, sólo conectan con el cauce principal durante caudales elevados (crecidas). En muchos de los casos los brazos sólo se conectan con caudales de elevada magnitud cuya frecuencia es muy baja, hecho que facilita la estabilización de éstos mediante la colonización de la vegetación de ribera.

### 3 DISEÑO DEL TRABAJO

La elaboración de este estudio se ha basado en un flujo de trabajo que integra: i) la obtención de datos, ii) el análisis hidrológico, iii) el análisis morfo-sedimentario, y iv) el diseño de crecidas de mantenimiento (Figura 2). Los datos recopilados en los diferentes repositorios y en campo son la base para alimentar tanto el análisis hidrológico como el morfológico, mientras que los resultados obtenidos en estos análisis son, a su vez, el punto inicial para selección de tramos y objetivos de rehabilitación que serán la base para el diseño de las crecidas de mantenimiento. Finalmente, la integración de los resultados permite el diseño de las crecidas en base a los objetivos de rehabilitación. Así, se trata de medidas basadas en objetivos específicos (*objective-based*), lo que indica que no son medidas transversales que pueden ser aplicadas en otros tramos o en otras cuencas. Aun así, el flujo de trabajo para el diseño de éstas sí que se considera transversal y puede ser aplicado en otras cuencas.

Para el **análisis hidrológico** ha sido fundamental la obtención de las series de caudales máximos instantáneos, caudales diarios y caudales con frecuencia de 15 minutos en los

repositorios digitales (e.g. Sistema Automático de Información Hidrológica y Anuario de aforos). Los principales objetivos de este bloque son: a) Analizar el régimen hidrológico del bajo Cinca (aportaciones anuales, régimen mensual, contribuciones de afluentes e impacto de embalses en los aspectos mencionados previamente), y b) Analizar una serie de crecidas en el total de las series hidrológicas para caracterizar la forma y magnitud de éstas y poder determinar algunos factores importantes para el diseño de las crecidas de mantenimiento a aplicar en los sectores de estudio (i.e. magnitud, frecuencia, volumen, forma, contribuciones de afluentes e impacto de embalses en los aspectos mencionados previamente).

Para el **análisis morfo-sedimentario** han sido esenciales tanto las fotografías aéreas obtenidas en el Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire y el Centro Nacional de Información Geográfica, como los datos recopilados en el campo (granulometrías y fotografías para constatar los cambios morfológicos detectados en las fotos aéreas). El principal objetivo de este bloque es el estudio de los cambios morfológicos acaecidos en el tramo de estudio como consecuencia de la puesta en marcha de los diferentes embalses (pérdida de áreas activas, intrusión de vegetación, estabilización, incisión, desconexión del cauce y su llanura aluvial). Todos los datos recopilados en el campo (distribuciones granulométricas, fotografías de campo) son esenciales para corroborar los procesos detectados en las fotografías aéreas.

El análisis hidrológico junto con el diagnóstico morfo-sedimentario ha permitido la **identificación de dos sectores centinela o experimentales** afectados por diferentes procesos tras la puesta en marcha de los embalses de Mediano y El Grado para su potencial **rehabilitación**.

En función de las características de las alteraciones detectadas en cada sector, se plantean **medidas** de rehabilitación (potenciales) para alcanzar los **objetivos** de rehabilitación planteados. En este caso el objetivo es aumentar conectividad entre los ríos y su llanura de inundación por medio de i) la reconexión de brazos secundarios y ii) la eliminación parcial de motas.

Así, para la consecución de los objetivos será necesario combinar actuaciones en el cauce con la generación de crecidas de manteamiento. Toda la información generada en el análisis hidrológico y de crecidas ha sido empleada para el **diseño de un hidrograma de crecida de mantenimiento que permita alcanzar los objetivos de rehabilitación** indicados anteriormente, y sin el cual las medidas estructurales citadas no llegarían a cumplir los objetivos de rehabilitación ecosistémica deseados. El diseño de estas crecidas también se apoya de los resultados de la modelización hidráulica. En este sentido, los datos recogidos tanto en el campo (granulometrías) como en los repositorios digitales (modelos digitales del terreno, mapa de usos

del suelo, etc.) se han utilizado para la creación de modelos hidráulicos, cuyas simulaciones de las condiciones actuales generan información sobre variables hidráulicas (profundidad del agua, caudal, velocidades de flujo, tensión de corte) que son claves para el diseño de los escenarios de rehabilitación propuestos en este trabajo. Posteriormente, en base a estos diseños, i) se modifica la información topográfica para facilitar la conectividad de brazos secundarios y con la llanura de inundación (objetivos de las medidas de rehabilitación); y ii) se crean los nuevos modelos hidráulicos con la nueva información topográfica. Si los resultados son óptimos se procede al diseño final del hidrograma de crecida. A continuación, se detallan las tareas seguidas en cada uno de los bloques metodológicos.



**Figura 2.** Flujo de trabajo seguido en la elaboración del estudio

## 4 METODOLOGÍA

En este apartado se describen los métodos empleados para la consecución de las diferentes tareas del trabajo.

### 4.1 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE CRECIDAS DEL RÍO CINCA EN BASE A LOS REGISTROS DISPONIBLES EN ESTACIONES DE AFORO

El objetivo de esta tarea es realizar un análisis del régimen hidrológico y de crecidas, y la determinación de parámetros hidrológicos (volumen de escorrentía, picos, forma del hidrograma, recurrencia, competencia) de las crecidas en régimen natural y modificado (antes y después de la construcción de los embalses) en el tramo medio y bajo del río Cinca. Actualmente, las estaciones operativas con información hidrológica del río Cinca en este tramo son la A 293 (río Cinca en el puente de la Pilas) y la A 017 (río Cinca en Fraga). Sin embargo, para poder realizar un análisis hidrológico más completo, se han tenido en cuenta estaciones históricas que no se encuentran actualmente en funcionamiento (por ejemplo, la del Grado, A 016, actualmente afectada por la regulación del embalse con el mismo nombre), así como el papel de otros afluentes que, sin duda, tienen un impacto tanto en el régimen hidrológico del río, como en las crecidas. En particular, se ha recabado toda la información disponible sobre caudales en las estaciones de los ríos Vero y Alcanadre (Figura 1), así como la de la estación histórica del río Ésera en Barasona (actualmente afectada por la regulación del embalse del mismo nombre). La información de caudal disponible para estas estaciones es de dos tipos: a) Información *histórica* (anterior al 1997) y, b) Información *reciente* (posterior al 1997).

- A. La **información histórica** se ha descargado del anuario de aforos (<http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>). La frecuencia de los registros en este anuario es diaria. También se dispone de otra información interesante como por ejemplo, caudal máximo y mínimo instantáneo mensual y anual, promedios mensuales y anuales, aportaciones mensuales (hm<sup>3</sup>). El año inicial de la serie varía en función de la puesta en marcha de la estación (Cinca en Grado, 1912; Cinca en Fraga, 1928; Ésera en Barasona, 1948; Alcanadre en Peralta de Alcofea, 1928; Vero en Barbastro, 1945).
- B. La **información reciente** ha sido facilitada por el Centro de Proceso de la Cuenca SAIHEBRO (Sistema Automático de Información Hidrológica de la cuenca del Ebro, <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/principal>; José Adolfo Álvarez). La fecha de inicio de recogida de datos por parte del SAIH comienza en 1997, manteniendo estos registros hasta la actualidad. La frecuencia de estas series es de 15 minutos.

La tabla 1 muestra un resumen de las diferentes series hidrológicas utilizadas para la elaboración de este estudio.

**Tabla 1.** Tabla sintética de las series de datos utilizadas para el análisis hidrológico del Cinca

Estación (Código)	Quinceminutales					
	Inicio	Final	Total (Años)	Total (registros)	Blancos (NoData)	% Blancos
Alcanadre Ballobar (A193)	1997	2019	22	774720	35213	4,55
Alcanadre Peralta (A033)	1997	2019	22	774720	5631	0,73
Cinca en Grado (A016)	-	-	-	-	-	-
Cinca en Fraga (A017)	2010	2019	9	318912	6216	1,95
Ésera Barasona (A128)	-	-	-	-	-	-
Ésera en Graus (A013)	1997	2019	22	774720	4539	0,59
Isábena en Capella (A047)	1997	2019	22	774720	8443	1,09
Vero en Barbastro (A095)	1997	2019	22	774720	22267	2,87
Estación (Código)	Diarios					
	Comienzo	Final	Total (Años)	Total (días)	Blancos	% Blancos
Alcanadre Ballobar (A193)	1988	2019	31	11056	300	2,7
Alcanadre Peralta (A033)	1928	2019	91	32979	7732	23,4
Cinca en Grado (A016)	1912	1974	62	22645	7815	34,5
Cinca en Fraga (A017)	1928	2019	91	32979	9967	30,2
Ésera Barasona (A128)	1949	1972	23	8401	0	0,0
Ésera en Graus (A013)	1931	2019	88	31884	5545	17,4
Isábena en Capella (A047)	1930	2019	89	32056	7088	22,1
Vero en Barbastro (A095)	1945	2019	74	26768	2732	10,2
Estación (Código)	Qci*					
	Comienzo	Final	Total (Años)	Total (Años)	Blancos	% Blancos
Alcanadre Ballobar (A193)	1988	2019 <sup>+</sup>	31	31	0	0,00
Alcanadre Peralta (A033)	1928	2019 <sup>+</sup>	91	91	50	54,95
Cinca en Grado (A016)	1912	1974	62	62	46	74,19
Cinca en Fraga (A017)	1928	2019 <sup>+</sup>	91	91	25	27,47
Ésera Barasona (A128)	1949	1972	23	23	23	100,00
Ésera en Graus (A013)	1931	2019 <sup>+</sup>	88	88	13	14,77
Isábena en Capella (A047)	1930	2019 <sup>+</sup>	89	89	26	29,21
Vero en Barbastro (A095)	1945	2019 <sup>+</sup>	74	74	43	58,11

En estas series el Caudal máximo instantáneo ( $Q_{ci}$ ) posterior a 2014 ha sido completado con los máximos instantáneos obtenidos en las series con frecuencia de 15 minutos

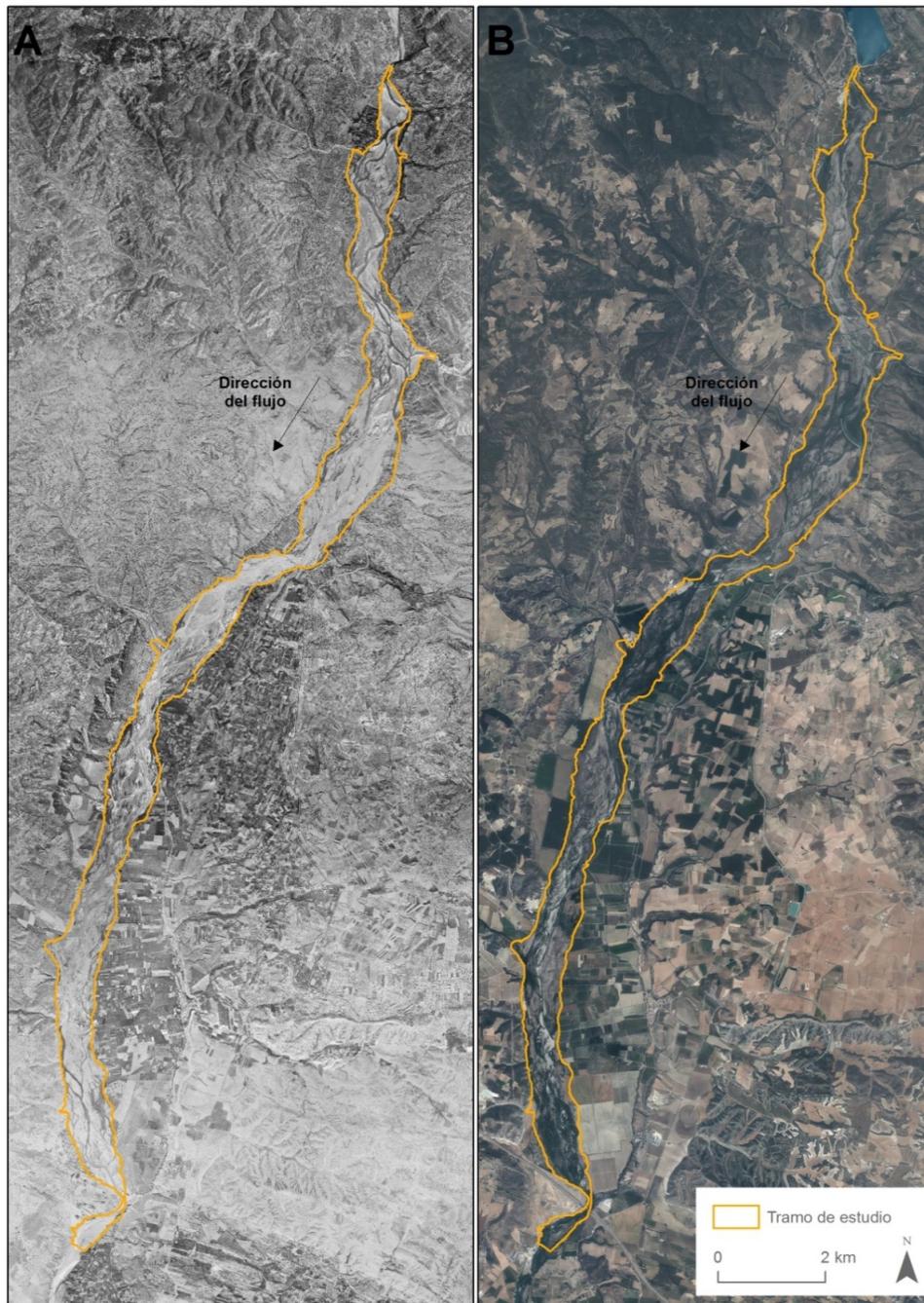
Como se puede ver en la tabla 1, además de las series de caudal de frecuencia diaria, han sido utilizadas las series de caudales máximos instantáneos anuales. Estas series son de gran importancia, ya que gracias a ellas se puede hacer un análisis de frecuencia-magnitud: calcular la magnitud de las crecidas asociada a diferentes **periodos de retorno**. Hay varios métodos que

se emplean para el cálculo de la probabilidad de que un caudal sea igualado o superado en un periodo de tiempo dado (por ejemplo, 1, 2, 5, 10, 25 años). Las distribuciones más usadas para la predicción de valores extremos suelen ser Gumbel, Log-Pearson, raíz cuadrada del tipo exponencial (SQRT-ET max) (Draper y Smith, 1981; Etoh, Murota y Nakanishi, 1987). En la actualidad, hay aplicaciones o programas que calculan los diferentes periodos de retorno de un caudal a partir de las series de valores máximos anuales. En nuestro caso, se ha utilizado el programa “Retorno” creado por el instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña ([https://www.flumen.upc.edu/en/documents/software/retorno2\\_0-2.zip/view](https://www.flumen.upc.edu/en/documents/software/retorno2_0-2.zip/view)), el cual utiliza las distribuciones Gumbel, Log-Pearson Tipo III y SQRT-ETmax. En los tramos de estudio en los que no se disponía de una estación de aforo, y por tanto no era posible la obtención de los caudales máximos instantáneos anuales ( $Q_{ci}$ ), se ha tenido que recurrir a la utilización de otras herramientas para el cálculo de periodos de retorno. En este caso se ha utilizado la aplicación informática CAUMAX (desarrollada dentro de un Convenio de colaboración entre el MAGRAMA y el CEDEX) para consultar los caudales máximos instantáneos en régimen natural asociados a distintos periodos de retorno para los cauces con una cuenca superior a 50 km<sup>2</sup> (<http://ceh-flumen64.cedex.es/IngSis/caumax.htm>).

#### **4.2 DIAGNÓSTICO MORFO-SEDIMENTARIO DEL CINCA MEDIO Y BAJO A PARTIR DE ANÁLISIS DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS HISTÓRICAS Y ACTUALES**

El objetivo de esta tarea es el diagnóstico morfo-sedimentario del Cinca medio y bajo a partir de análisis de fotografías aéreas históricas y actuales (e.g. determinación de la pérdida de la superficie activa, intrusión de la vegetación de ribera, estabilización del cauce). Para ello se han utilizado ortofotomapas que permiten hacer un análisis comparativo pre y post-embalse para un tramo de río de 30 km, concretamente el que transcurre entre el embalse de El Grado y unos kilómetros aguas arriba de Monzón (Figura 3). El ortofotomapa del año 2012 se ha obtenido ya procesado, mientras que en otros casos (1956, 1977 y 1984) se han obtenido a partir de fotogramas históricos y mediante la aplicación de técnicas de fotogrametría digital para su georreferenciación y ortorectificación (siguiendo la metodología desarrollada en el grupo RIUS i presentada por Llena et al., 2018). Como referencia del periodo pre-embalses se adquirieron los fotogramas del vuelo de 1956 en el Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF; Figura 3A). El resto de los vuelos para el periodo post-embalses (i.e. 1977, 1984 y 2012; esta última en la figura 3B) se obtuvieron en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). A partir de los ortofotomapas se pueden cartografiar las distintas unidades morfológicas de interés para cada período. Para ello es necesario definir la escala de trabajo (unidad mínima

cartografiable) y las unidades morfológicas (y criterios de selección) a cartografiar. Este proceso se realiza mediante una plataforma para crear y utilizar Sistemas de Información Geográfica o SIG, en este caso se ha utilizado el software ArcGis© 10.3. Esta cartografía, al ser multi-temporal, permite analizar y cuantificar los cambios (evolución) morfológicos (e.g. cálculo de índices y matrices de cambios morfológicos, reducción de superficie activa e incremento de la vegetación).



**Figura 3.** Tramo de estudio en (A), 1956 y (B), 2012

#### 4.3 DEFINICIÓN DE POSIBLES OBJETIVOS DE MEJORA AMBIENTAL EN BASE A LOS RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO

Una vez conocido el estado morfo-sedimentario del tramo de estudio, se plantean los posibles objetivos de mejora ambiental. Restauración, es el término más utilizado actualmente, aunque puede llevar a confusión. Restaurar es restablecer o recuperar un sistema natural a partir de la eliminación de los impactos que lo degradaban, a lo largo de un proceso prolongado en el tiempo, hasta alcanzar un funcionamiento natural y auto-sostenible. En el caso del Cinca, no se pueden eliminar los impactos que lo alteran (e.g. embalses), así que las medidas que se proponen irán encaminadas a la mejora parcial de este sistema. El objetivo de estas medidas no es necesariamente el recuperar un estado pasado del río (natural), sino, con las condiciones actuales, buscar que el sistema fluvial se acerque a un buen estado (rehabilitación; Habersack y Piégay, 2007; Piégay et al., 2008)

Dada la imposibilidad de definir objetivos *a priori* de mejora ambiental para un tramo de dicha magnitud, se realizó una visita sobre el terreno (trabajo de campo) para seleccionar dos sectores de estudio representativos de los procesos que se habían detectado tras el análisis hidrológico y morfológico. Los sectores seleccionados han sido “Grado” localizado justo aguas abajo de la presa de El Grado, y “Vero”, localizado en la confluencia de los ríos Vero y Cinca.

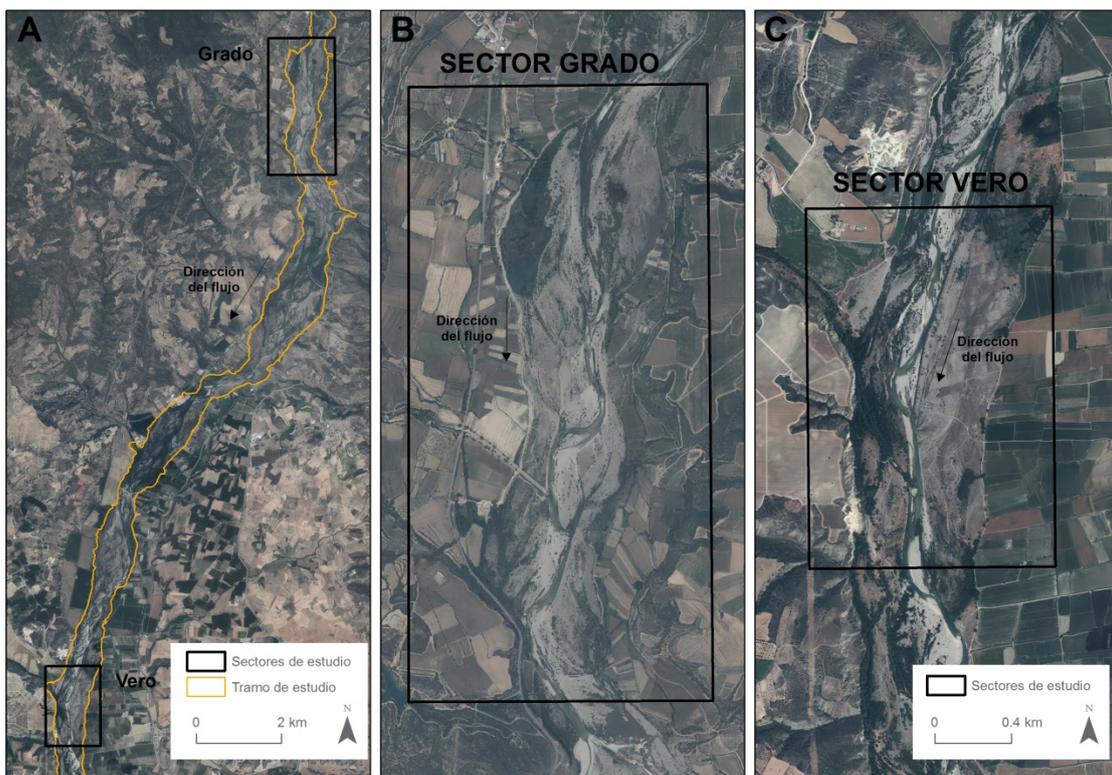
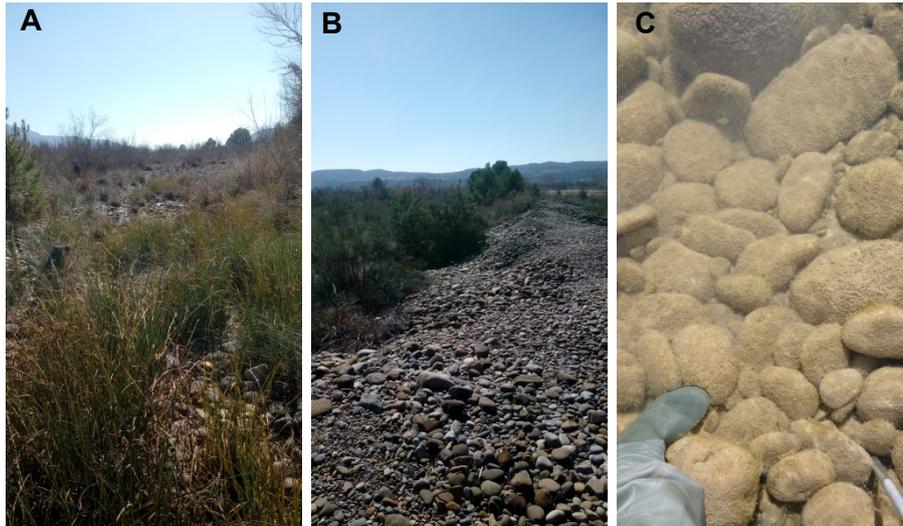
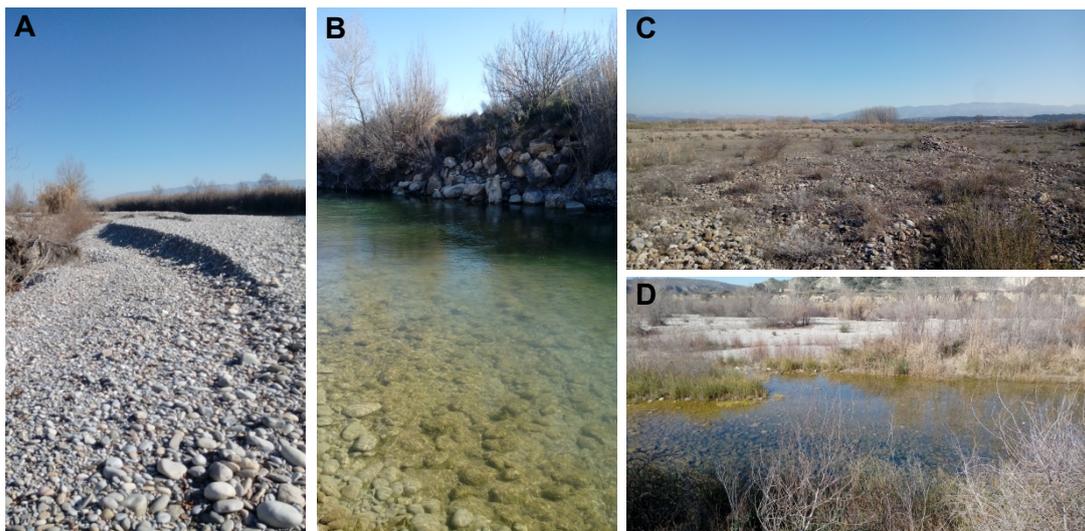


Figura 4. (A), Tramo y sectores de estudio, (B), sector Grado y (C), sector Vero.

Estos sectores fueron seleccionados ya que ofrecen diferentes características interesantes desde el punto de vista morfo-sedimentario (e.g. distancia a las presas, disponibilidad de sedimento, aportes de afluentes). Como se puede ver en las figuras 5 y 6, ambos tramos muestran alteraciones asociadas a la presencia de embalses (e.g. incisión y estrechamiento del canal, desconexión del río de la llanura aluvial, colonización por parte de la vegetación de zonas anteriormente activas, presencia de aguas estancadas, entre otros).



**Figura 5.** En el sector *Grado* se pueden distinguir los siguientes impactos: (A), Colonización de la vegetación de canales secundarios, (B), presencia de mota, (C), presencia de aguas estancadas, y acorazamiento por movilidad selectiva y sostenida.



**Figura 6.** En el sector *Vero* se pueden distinguir los siguientes procesos: (A) Barras colgadas por incisión del canal, (B) aguas estancadas y presencia de mota, (C) estabilización de la llanura aluvial como consecuencia de las motas, y, (D) colonización de la vegetación de zonas anteriormente activas.

Los resultados del estudio morfo-sedimentario indican que la mayoría de las alteraciones afectan directamente a la conectividad entre los ríos y sus anexos fluviales (brazos secundarios, humedales y llanuras de inundación), que sustentan numerosos procesos ecológicos fluviales (hábitats de ribera, intercambio de nutrientes y sedimentos finos, disipación hidráulica). **El aumento de la conectividad lateral, además de favorecer el incremento de la diversidad de hábitats, también aumenta la superficie inundable durante crecidas, siendo más efectiva en la laminación de éstas y reduciendo los caudales máximos en las áreas localizadas aguas abajo.** Así, las medidas de rehabilitación para el incremento de la conectividad requieren, por un lado, de un régimen de caudales más cercano al natural, al menos en lo que se refiere a componentes como la magnitud y la frecuencia de los caudales formadores (morfogénicos o bankfull), y por otro, la mejora de la conectividad lateral y el aumento del espacio de movilidad fluvial mediante actuaciones puntuales en el cauce. A continuación, se presentan las distintas tareas para el diseño de las crecidas en base a la medida de rehabilitación escogida: mejora de la conectividad.

#### **4.4 PROPUESTA DE CRECIDAS DE MANTENIMIENTO PARA SU FUTURA IMPLEMENTACIÓN DENTRO DEL PROGRAMA DE CAUDALES AMBIENTALES EN LA CUENCA DEL CINCA EN BASE A LOS OBJETIVOS DE MEJORA PROPUESTOS.**

##### **4.4.1 *Definición del hidrograma de crecida para su aplicación en el tramo bajo del río Cinca***

Los principales usos de las crecidas de mantenimiento, desde que se generalizó su aplicación en los años 1980, se han centrado en el mantenimiento de la morfología del cauce y en la mejora de los hábitats fluviales, estando ambos objetivos estrechamente relacionados. Por ejemplo, Kondolf y Wilcock (1996) dividieron el uso de las crecidas de mantenimiento en dos grandes categorías: i) mantenimiento del sedimento y ii) mantenimiento del cauce, dependiendo si estas crecidas de mantenimiento han sido diseñadas para modificar o mantener el sedimento del cauce o la morfología de éste. El diseño de estas crecidas varía en función de los objetivos específicos para los que se quieran aplicar, puesto que no es lo mismo diseñar una crecida de mantenimiento con el objetivo de movilizar las acumulaciones superficiales de sedimento fino en el lecho del río (por ejemplo, en confluencias que experimentan alto riesgo de inundación), que movilizar el sedimento intersticial acumulado entre las gravas del río o mantener la diversidad topográfica en el cauce activo. Para cada uno de estos casos, el diseño del hidrograma ha de ser distinto (magnitud, duración, cadencia de los picos, etc.). Reiser et al., (1985) agrupan en

tres categorías los métodos empleados para determinar un diseño de crecida óptimo: i) métodos hidrológicos, ii) métodos morfológicos y iii) métodos de inicio de movimiento.

En el caso del río Cinca, el objetivo de las crecidas de mantenimiento es la activación y mantenimiento de las áreas morfológicas y mejora de la conectividad lateral y longitudinal. Es por ello que el diseño de estas crecidas se basa en el criterio morfológico. Para esto, se ha determinado el caudal responsable de las características morfológicas de un río (i.e. caudal morfogénico o bankfull), que está normalmente asociado con el caudal de una crecida con un periodo de retorno entre 1 y 2 años. Los caudales obtenidos mediante las metodologías de cálculo de probabilidad de que un caudal sea igualado o superado en dicho periodo de tiempo (sección 4.1) serán los caudales liberados durante la crecida de mantenimiento. Como se ha apuntado anteriormente y se explicará con más detalle a continuación, estas medidas de rehabilitación van acompañadas de pequeñas actuaciones en el cauce. Como se ha dicho, la mejora de la conectividad es el objetivo general de las medidas. Para poder mejorar la conectividad asociada a caudales relativamente bajos (aunque de crecidas), será necesario quitar o modificar algunas de las infraestructuras en el cauce (i.e. motas) y rebajar la cota de conexión del algún brazo secundario. La evaluación de estas actuaciones se hará a partir de modelización hidráulica con el objetivo de que las nuevas características del cauce (geometría) faciliten la conectividad de los caudales pico de las crecidas de mantenimiento, caudales con un periodo de recurrencia entre 1 y 2 años.

Además de la magnitud de los caudales liberados, el análisis hidrológico realizado en la sección 4.1 también nos ha permitido conocer otros parámetros importantes a la hora de diseñar la crecida de mantenimiento, como pueden ser la forma, la tasa de incremento de caudal, etc.

Finalmente, el diseño de las crecidas de mantenimiento será lo más similar en forma, a una crecida en régimen natural, pero con una magnitud de crecida equivalente a un periodo de retorno entre 1 y 2 años del régimen actual.

#### **4.4.2 Modelización hidráulica**

##### **4.4.2.1 Condiciones actuales**

Una vez definidos los diferentes parámetros hidrológicos, se ha procedido a la **modelización** de diferentes escenarios en los sectores seleccionados.

La modelización hidráulica se realiza con el modelo Iber<sup>®</sup> v2.4.3. ([www.iberaula.es](http://www.iberaula.es)). Éste es un modelo matemático bidimensional que se emplea para la simulación de flujos de superficie libre en los ríos y estuarios (Bladé et. al., 2014) y ha sido desarrollado en colaboración entre el



Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de la Coruña, UDC), el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Catalunya, UPC) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

El Iber<sup>®</sup>, en su módulo hidrodinámico, resuelve las ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas (ecuaciones de St. Venant 2D). Además de ello, tanto en el módulo hidrodinámico como en el de turbulencia y el de sedimentos, se resuelven las ecuaciones en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla constante (como en el caso de estudio). La modelización se ha parametrizado utilizando las siguientes condiciones de contorno:

- La topografía se ha obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Se trata de modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m. La resolución de esta malla nos permitirá obtener unos resultados adecuados a los objetivos que se pretenden en este estudio.
- El Iber<sup>®</sup> dispone de una herramienta para definir la rugosidad directamente a la geometría del modelo, que previamente se ha relacionado con un uso del suelo. La definición de estos usos del suelo se ha llevado a cabo a partir de las capas obtenidas en el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE); posteriormente, a cada uso del suelo se le ha atribuido un valor de rugosidad consultado en varias tablas de referencia (Chow, 1959). Sin embargo, se comprobó que realizando el mismo ejercicio con una rugosidad uniforme, los resultados asociados a los caudales que se deseaban modelizar no cambiaban de manera representativa, y se optó por este método para reducir el tiempo computacional de cada simulación. La rugosidad adoptada para el tramo fue de 0,03. Un valor de referencia para el USGS (United States Geological Survey) para los ríos de gravas (Cowan, 1956) y ampliamente utilizado en este tipo de estudios.
- Las condiciones de contorno en la entrada se han establecido como régimen crítico / subcrítico y las de salida como un régimen supercrítico / crítico.
- A pesar de conocer de manera concreta los caudales que se querían modelizar (ver sección 5.5), se optó por modelizar varios rangos de caudales para tener más información de las condiciones hidráulicas del tramo de estudio. Los caudales modelizados en el sector Grado fueron 100, 200, 300, 450 y 650 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, y en el sector Vero fueron 200, 300, 400, 600 y 900 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.
- Para cada uno de los caudales de interés se ha modelizado un hidrograma ficticio con una duración de 4 horas (14.400 segundos). El volumen inicial ha sido, en todos los casos, de 0 m<sup>3</sup>/s. El caudal se ha incrementado proporcionalmente cada 300 segundos hasta llegar a los 3.600 segundos, momento en el que se ha mantenido constante el

valor de caudal objeto de la modelización. Al terminar la modelización (tiempo = 14.400) se ha verificado que el caudal al inicio del tramo fuera igual (+/- 1-2%) que el de salida.

Los calados, las velocidades y los límites perimetrales de las zonas inundables en el momento final de cada modelización (tiempo = 14.400 segundos) se ha exportado en formato *ráster* con una resolución de celda de 5×5 metros. Con estos datos se han confeccionado los mapas que se presentan en el apartado 5.6 de resultados.

Una vez finalizada la primera tanda de simulaciones y conocidas las condiciones de conectividad hidrológica asociadas a la geometría actual, se ha procedido a la modificación de la malla (topografía) en función de los objetivos de rehabilitación propuestos.

#### **4.4.2.2 Condiciones modificadas en base a los objetivos de rehabilitación**

En el caso del sector Grado, se han rebajado las cotas máximas de los brazos secundarios para facilitar su conexión con el canal principal con los caudales de crecida seleccionados.

En el caso del sector Vero, se han eliminado tramos de la mota aguas arriba y aguas abajo para permitir la conectividad de esta área, anteriormente activa, con el canal principal.

Posteriormente, se ha realizado otra tanda de simulaciones con la nueva geometría (siguiendo la misma metodología ya descrita). Los resultados de estas simulaciones se presentan en el apartado 5.6.

## **5 RESULTADOS**

### **5.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO Y DE CRECIDAS**

En este apartado se ha realizado un análisis de las series hidrológicas para determinar el efecto de los embalses en la hidrología del medio y bajo Cinca. Estas series han sido analizadas a diferentes escalas temporales, desde aportaciones anuales, a caudales medios mensuales, caudales medios diarios, hasta frecuencias temporales de 15 minutos.

Como se ha mencionado en el apartado metodológico, se dispone de una gran cantidad de información hidrológica. En la mayoría de los casos las series de caudales diarios comienzan en la primera mitad del siglo XX; sin embargo, son bastante discontinuas. La presencia de vacíos en las series puede generar anomalías en los resultados dificultando la interpretación de los mismos. En todo caso, a la hora de evaluar el impacto de los embalses en la hidrología del Cinca, la comparación de las series pre y post embalse se ha llevado a cabo utilizando únicamente las series anuales que estaban completas. Para los cálculos llevados a cabo en este

informe se ha considerado 'post embalses' al periodo que comienza a partir de la puesta en marcha del embalse de El Grado (1969).

### 5.1.1 Aportaciones medias anuales

En primer lugar, se ha analizado la **aportación anual** antes y después de la construcción de los embalses. Para esto se han identificado tres estaciones en tramos regulados (i.e. Grado, Fraga y Barasona) y otra en un tramo sin regular (i.e. Alcanadre). La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en la comparación pre y post embalse. También se ha obtenido la aportación de la última década para comprobar la tendencia actual y el porcentaje del cambio.

**Tabla 2.** Tabla resumen de las series utilizadas para el análisis hidrológico

Estación de Aforo	Pre-embalses	n (años <sup>1</sup> )	Post-embalses	n (años)	Aportaciones medias anuales (hm <sup>3</sup> )			Var. Aportaciones (%)	
					Pre-embalses	Post-embalses	Últimos 10 años <sup>2</sup>	Post-embalses	Últimos 10 años
Cinca (Grado)	1912-1969	27	1969-2015	46	1592.0	1207.0	1109	-24	-8
Cinca (Fraga)	1912-1969	22	1969-2015	32	2648	2220	1665	-17	-25
Ésera <sup>3</sup>	1932-2009	77	1932-2009	77	756	770	704	2	-9
Alcanadre	-	-	1988-2009	23	-	378	327	-	-14

<sup>1</sup> Años completos

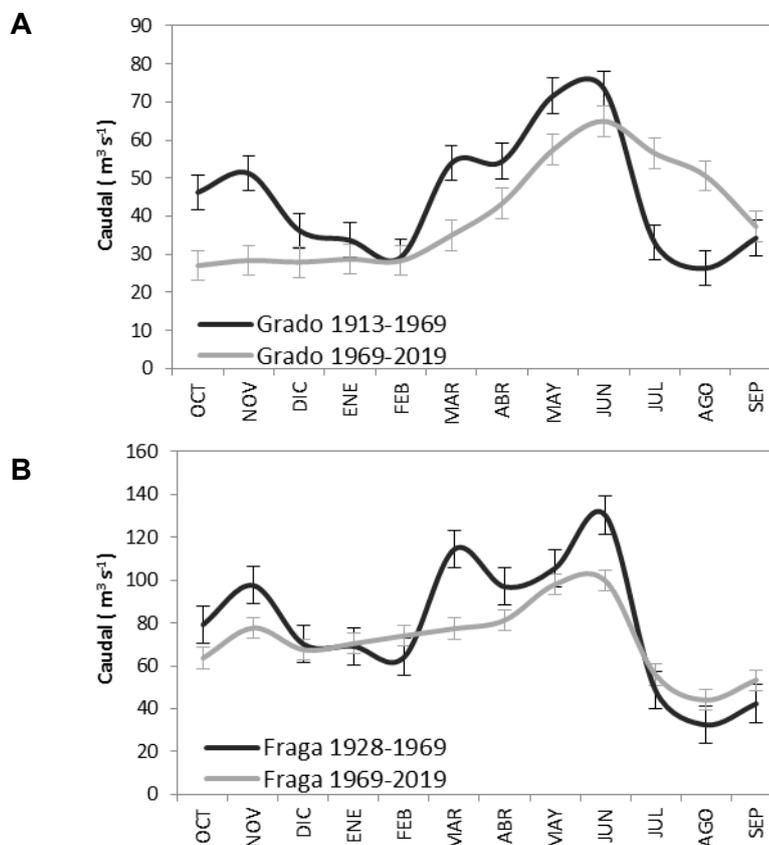
<sup>2</sup> Relación entre la serie post-embalses y los últimos 10 años completos de esta serie.

<sup>3</sup> Pre-embalse se considera las entradas al embalse de Barasona y Post-embalse las salidas

La aportación media anual tras la construcción de los embalses de Mediano y El Grado (de aquí en adelante Mediano - El Grado) disminuyó un 24% a pie de presa (Tabla 2), y un 17% en la estación de aforos de Fraga. Esta tendencia cambia en el río Ésera, cuya aportación aumentó casi un 2% tras la construcción del embalse, pero en los últimos 10 años ha descendido más del 9%. Estas tendencias, como se verá a continuación, no son muy consistentes ya que contrastan con otros estudios realizados en el mismo tramo (i.e. Lobera et al., 2016). En todas las estaciones utilizadas para este análisis se repite esta tendencia decreciente en los últimos 10 años. Merece la pena destacar el caso de la estación de Fraga en la que reducción registrada alcanza el 25%, siendo superior a la reducción registrada en el periodo post-embalses. En el río Alcanadre, la aportación de la última década se ha visto reducida, registrándose una disminución del 14 %. Según estos datos, el sistema Mediano - El Grado ha reducido de manera significativa las aportaciones medias anuales. Por otro lado, en los ríos no regulados, la aportación media anual se ha visto reducida de manera notable en las últimas décadas, hecho posiblemente asociado a un incremento de la superficie o masa forestal (e.g. Gallart y Llorens, 2004; Buendia et al., 2016).

### 5.1.2 Caudales medios mensuales

Las series también han sido analizadas a nivel mensual. Para esto, se ha comparado el régimen hidrológico pre y post-embalses en los puntos de estudio del río Cinca, Grado y Fraga (Figura 7). También se ha analizado el impacto del embalse de Barasona en el régimen mensual del río Ésera, pero en este caso, al carecer de series hidrológicas pre-embalses (ya que el embalse se construyó en 1932), se ha considerado pre-embalses al caudal entrante en el embalse de Barasona (río Ésera y río Isábena) y post-embalses al caudal saliente de este mismo embalse. Además, se ha analizado el régimen mensual del Alcanadre, comparándolo con el régimen de los últimos 10 años.



**Figura 7. Alteración del régimen hidrológico del río Cinca en las estaciones de Grado (A) y de Fraga (B). Las barras verticales muestran el error típico.**

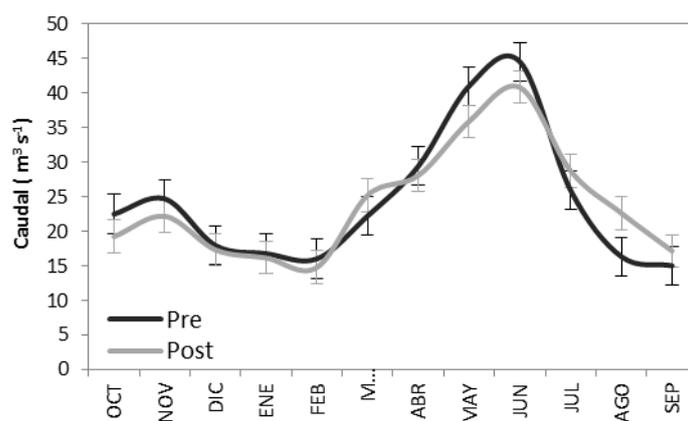
El impacto del sistema de embalses Mediano-El Grado queda patente también en los caudales medios mensuales que circulan por el río Cinca. La figura 7 nos muestra, por ejemplo, el efecto de la regulación en la estación de Grado y en la estación de Fraga. En la figura 7A podemos ver cómo en Grado los caudales medios mensuales se han reducido de manera

generalizada, excepto en los meses de verano, en el que los caudales disminuyen menos ya que son liberados para riego.

En el caso de Fraga (Figura 7B), los periodos de aguas bajas en invierno y verano son alterados por el aumento de las sueltas, mientras que la etapa de aguas altas se atenúa por la retención de los caudales durante primavera.

En ambas figuras destaca el papel de los embalses cómo homogeneizador de los caudales en todas las estaciones del año. En la estación de Grado, las desviaciones estándar de los caudales mensuales en el periodo post embalses son ligeramente inferiores (i.e.  $16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  versus  $14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), mientras que, en la estación de Fraga, son la mitad que en el periodo pre-embalses (i.e.  $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  versus  $17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).

El hidrograma del río Ésera es muy similar en ambos períodos (Figura 8). La curva denominada Post es ligeramente inferior a la Pre durante la mayoría de los meses del año, excepto en los meses de verano. En la época de lluvias y de deshielo, los caudales aguas abajo de las presas son algo inferiores con el objetivo de acumular agua en el embalse.



**Figura 8. Alteración del régimen hidrológico del río Ésera. Pre se refiere al caudal entrante y Post al caudal saliente del embalse Barasona. Las barras verticales muestran el error típico.**

Sin embargo, los datos obtenidos por Lobera et al (2016) en este mismo tramo contrastan de manera contundente con los presentados anteriormente. En este estudio, los caudales obtenidos aguas abajo de la presa de Joaquín Costa para los años 2011-2013 son notablemente inferiores a los registrados aguas arriba. La aportación hídrica aguas arriba del embalse para estos dos años suponía  $1048 \text{ hm}^3$ , mientras que abajo era de  $125 \text{ hm}^3$ , lo que supone una reducción de la aportación del 88% en el tramo de aguas abajo. Estas diferencias probablemente se deban a que las series de caudales de salida del embalse de Barasona descargadas del CEDEX, probablemente no tengan en cuenta que la mayoría de los caudales son derivados al canal de

riego de Aragón y Cataluña, y sólo una pequeña parte circula por el tramo de aguas abajo del embalse.

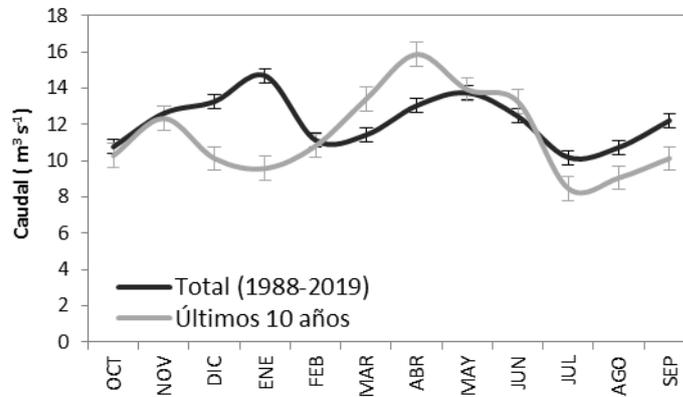


Figura 9. Alteración del régimen hidrológico del río Alcanadre.

En el caso del Alcanadre (Fig. 9) los caudales medios mensuales varían poco, el hidrograma es suave. El régimen natural del Alcanadre presenta dos picos anuales, uno en enero y otro en mayo. Las aguas bajas tienen lugar en los meses de marzo y julio. Si comparamos el régimen de la serie total con el de los últimos 10 años vemos que el ciclo parece adelantarse, presentándose los picos dos meses antes y las aguas bajas también, excepto el estiaje de verano que se sigue produciendo en julio.

### 5.1.3 Caudales medios diarios

Los caudales medios diarios se han analizado, al igual que en las secciones anteriores, en cuatro puntos de control en dos ríos regulados (i.e. el río Cinca en Grado y Fraga; y el río Ésera aguas arriba y aguas abajo del embalse) y en un río no regulado (i.e. Alcanadre en Ballobar).

En primer lugar, se han analizado las series de caudales mediante las curvas de frecuencia de caudal (Figura 10). Las curvas de frecuencia de caudal se construyen a partir de registros diarios de caudales (medios) y sirven para describir el comportamiento hidrológico de un río a partir de la relación entre caudal y el porcentaje de tiempo que será igualado o excedido. En este caso, se han empleado para ver la similitud entre las curvas de las series consideradas pre-embalses (Pre) y las series de caudal post-embalses (Post). Este ejercicio permite saber qué rangos de caudal se ven más afectados por la regulación de los embalses.

A partir de las curvas de frecuencia de caudales, se han obtenido diferentes percentiles; el  $P_5$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{84}$  y  $P_{95}$  donde  $P_i$  es el valor correspondiente al percentil  $i$  (es decir, los caudales que igualaron o superaron el 5, 16, 50, 84, 95% del tiempo respectivamente). A partir de estos valores se ha calculado la desviación estándar de los caudales (adaptado del índice desarrollado

por Folk y Ward (1957) para sedimentos fluviales por Batalla et al. (2004) en relación con el caudal medio mediante la siguiente fórmula,  $FSD = | [(P84 - P16) + (P95 - P5)] / P50 |$ . Los valores de este índice nos permiten conocer la variabilidad de las diferentes series de caudal (cuanto mayor es el valor, mayor variabilidad y viceversa) y así valorar el impacto de los embalses en este aspecto.

Si se analiza el impacto de los embalses en la magnitud de los caudales, se observa tendencias marcadas. Por ejemplo, en las dos secciones del río Cinca, Grado y Fraga, los caudales más bajos, entre los percentiles  $P_5$  y  $P_{50}$  aumentan entre un 10 y un 187% en el periodo post-embalses para luego decrecer entre un 4 y un 64 % en los caudales más elevados (desde el  $P_{50}$  hasta el  $P_{99}$ , tabla 4). Es interesante comprobar que en todas las estaciones de aforo el caudal máximo es mayor en el periodo post-embalses, destacando sobre todo el caso del Cinca en Fraga, en el cual el caudal máximo en el periodo post embalses es un 64% mayor que en el período pre-embalses.

**Tabla 3.** Percentiles representativos de las series de caudal

	Grado			Fraga			Ésera			Alcanadre	
	Pre	Post	Últimos 10 años	Pre	Post	Últimos 10 años	Pre	Post	Últimos 10 años	Pre	Últimos 10 años
<b>P0</b>	0	0	0	1	4	5	1	0	0	1	3
<b>P5</b>	6	10	8	7	21	18	5	0	0	4	5
<b>P16</b>	11	14	10	14	29	23	8	8	9	6	7
<b>P25</b>	14	19	12	22	34	28	10	13	12	7	7
<b>P50</b>	27	37	30	46	51	43	17	20	18	9	9
<b>P75</b>	58	55	63	95	83	62	31	30	27	13	12
<b>P84</b>	77	68	72	129	109	76	41	36	34	16	14
<b>P95</b>	138	80	80	251	181	126	65	55	37	30	25
<b>P99</b>	261	147	129	570	316	247	112	117	67	63	49
<b>P100</b>	900	916	598	1426	2347	618	990	1100	326	546	226
<b>FSD</b>	7,3	3,3	4,5	7,7	4,7	3,7	5,6	4,1	3,5	3,9	3,0

Si atendemos al índice FSD, es inequívoco que la variabilidad de los caudales en el río Cinca se reduce tras la construcción del sistema de embalses Mediano–El Grado, pasando de 7,3 a 3,3 en El Grado y de 7,7 a 4,7 en Fraga. Un valor alto de FSD indica un rango muy elevado de caudales registrados, un valor bajo indica menor variabilidad de los caudales. Así, la reducción del FSD indica que el rango de caudales es menor. En el resto de estaciones, el FSD también se ha visto reducido en los periodos pre y post embalses, incluso al comparar el periodo post embalses con los últimos 10 años disponibles de la serie. Esta disminución de la FSD (Tabla 3 y

4) se debe a la reducción de los picos de otoño e invierno y las liberaciones de caudales durante el verano para el riego, que aumentan los flujos de base sobre los niveles naturales.

**Tabla 4.** Variación en % de los percentiles representativos de las series de caudal

	<u>Grado</u>		<u>Fraga</u>		<u>Ésera</u>		<u>Alcanadre</u>
	<u>Variación (%)</u>		<u>Variación (%)</u>		<u>Variación (%)</u>		<u>Variación (%)</u>
	<u>Pre-Post</u>	<u>Post-10 años</u>	<u>Pre-Post</u>	<u>Post-10 años</u>	<u>Pre-Post</u>	<u>Post-10 años</u>	<u>Pre -10 años</u>
<b>P0</b>	0.0	0.0	260.0	33.3	-100.0	0.0	412.1
<b>P5</b>	62.8	-24.0	187.8	-15.8	-91.1	-100.0	21.7
<b>P16</b>	28.1	-28.6	101.4	-19.3	11.3	0.7	17.9
<b>P25</b>	31.3	-36.8	51.8	-19.2	31.2	-4.0	6.1
<b>P50</b>	36.4	-20.0	10.6	-16.0	18.6	-10.0	-1.9
<b>P75</b>	-4.9	15.7	-12.4	-24.9	-4.5	-10.0	-7.2
<b>P84</b>	-12.3	6.0	-16.0	-30.4	-12.5	-3.5	-11.9
<b>P95</b>	-41.9	-0.2	-27.7	-30.6	-16.0	-31.7	-16.7
<b>P99</b>	-43.7	-12.1	-44.5	-22.0	5.0	-43.1	-23.1
<b>P100</b>	1.8	-34.7	64.6	-73.7	11.1	-70.4	-58.7
<b>FSD</b>	-54.2	35.5	-39.5	-20.4	-26.5	-13.7	-23.0

Las curvas de frecuencia de caudal (Figura 10) ilustran estas tendencias. Los caudales más frecuentes, que tienen lugar entre el 30 y el 60% del tiempo han aumentado, mientras que los caudales menos frecuentes, y los responsables del mantenimiento de la dinámica morfológica de los ríos se han reducido.

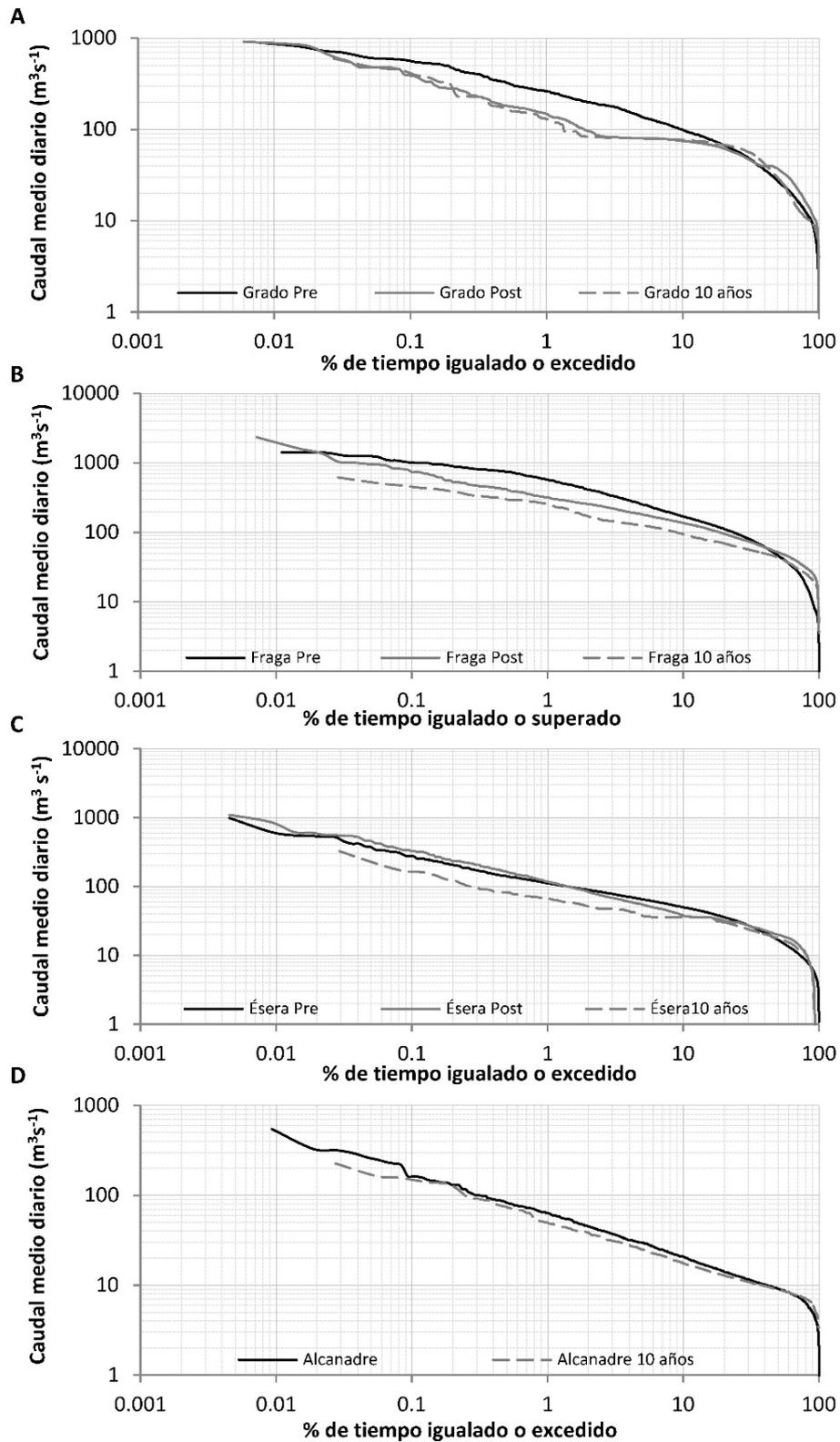


Figura 10. Curvas de Frecuencia de caudales para las estaciones de aforo de (A), Grado, (B), Fraga, (C), Ésera (aguas arriba y aguas abajo de la presa de Barasona), y (D), Alcanadre.

## 5.1.4 Análisis de crecidas

### 5.1.4.1 Magnitud de las crecidas

Se ha calculado el periodo de retorno de las crecidas de 2, 5, 10 y 25 años antes y después de la construcción de los embalses para cada estación de aforos o punto de estudio. Los resultados se han utilizado para definir las crecidas de cada río, analizar los efectos de los embalses y la influencia de los afluentes en la hidrología del cauce principal. Para este tipo de análisis se utilizan los caudales máximos instantáneos anuales ( $Q_{ci}$ ). Debido a la dificultad de obtener estos datos, sobre todo en las series históricas, se han tenido que determinar los caudales máximos anuales ( $Q_c$ ) y luego establecer una correlación entre  $Q_c$  y  $Q_{ci}$  para transformar los valores. Se trata de una técnica utilizada en la literatura (e.g. López et al., 2013). El único punto de control en el que se pudo obtener el periodo de retorno antes y después de la construcción del embalse mediante los  $Q_{ci}$  fue el Cinca en Fraga. El registro previo a la construcción de El Grado y Mediano es un periodo muy interesante por su régimen natural y por la ocurrencia de dos crecidas históricas (i.e. 1907,  $3900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ; y 1937,  $2600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Sin embargo, el registro de caudales pico anuales tiene 39 años sin datos contando desde 1907 y 10 años desde 1937. Para el periodo post-embalse, sólo se registró una crecida que supera el  $T_{15}$  en 1982. El caudal pico que cita la literatura para esta crecida es ligeramente inferior al oficialmente admitido por el CEDEX. Por esta razón, también se compararon dos escenarios de periodo de retorno post-embalse, uno de ellos teniendo en cuenta el valor de la literatura ( $3500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , López-Bustos, 1972), y otro el de CEDEX ( $4200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Para el cálculo de los periodos de retorno se ha utilizado el método de Gumbel. En ríos regulados, especialmente en aquellos en que las presas se han construido para el control de avenidas, el cálculo de periodo de retorno se realiza mediante métodos de probabilidad total, siendo las funciones paramétricas de probabilidad, como Gumbel, menos comunes (Durrans, 1998). Sin embargo, dado que la función de El Grado y Barasona es el suministro de agua y la producción hidroeléctrica, la influencia de la regulación del embalse sobre la crecida es habitualmente menor (USACE, 1993), por lo que el uso de funciones como la de Gumbel tiene más fundamento. Además, es la metodología que normalmente usan las Confederaciones Hidrográficas en España. En la tabla 5, se pueden observar diferentes periodos de retorno calculados mediante el método Gumbel ( $Q_2$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{25}$ ). En el bajo Cinca, tanto en la sección de Grado como en Fraga, queda patente el impacto de los embalses en la magnitud de las crecidas con diferentes periodos de retorno. Por ejemplo, la crecida de cada dos años tras la construcción del embalse disminuye un 30 y un 50%, respectivamente. A medida que los periodos de retorno aumentan, la diferencia de magnitud

entre el periodo pre y post embalse disminuye. Por ejemplo, la magnitud de las crecidas con periodo de retorno de 25 años, en Grado, se reducen en un 8%, mientras que en Fraga, aumenta ligeramente (i.e. 0.5%) El efecto del embalse hace que las crecidas más frecuentes sean menos caudalosas, mientras que las menos frecuentes llegan incluso a una mayor magnitud por encima del umbral pre-embalses.

**Tabla 5.** Tabla resumen de los caudales asociados a periodos de retorno  $Q_i$  (en  $m^3s^{-1}$ )

$Q_i$	Grado		Fraga		Ésera		Alcanadre
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	
2	494,50	346,39	1148,79	576,03	157,98	167,89	152,23
5	631,09	515,32	1697,21	1359,62	302,9	360,76	311,05
10	721,54	627,16	2060,32	1878,43	398,86	488,46	416,2
25	835,81	768,47	2519,10	2533,95	520,09	649,80	549,06

En el caso del Ésera, los caudales liberados por la presa son ligeramente superiores a los entrantes. Este comportamiento se puede asociar a la gestión de la presa, que para evitar riesgos y no superar el límite de su capacidad, durante crecidas, en ocasiones suelta caudales superiores a los entrantes.

#### 5.1.4.2 Características de las crecidas

En este apartado se han analizado las principales características de las crecidas del Cinca a partir de una selección de las mismas. Estas han sido elegidas dentro de los diferentes rangos de los periodos de retorno calculados anteriormente para la estación de Fraga. Además, se comparan las características de las crecidas pre y post-embalses. El **primer grupo** se corresponde con las crecidas de mayor magnitud en los registros utilizados. La crecida de mayor magnitud en el periodo pre-embalses en Fraga no alcanza el umbral  $Q_{25}$ . La crecida de 1982 es la de mayor magnitud del s. XX en el río Cinca. Esta equivaldría a una crecida *milénaria* con los periodos de retorno obtenidos a partir de la serie de datos pre-embalse, y a una crecida superior a un periodo de retorno de 500 años a partir de la serie post-embalse. Hay que remarcar que los periodos de retorno se obtienen mediante funciones de probabilidad, y que, dado que no se dispone de series de caudal de tantos años es muy incierto asignar periodos de retorno de tales magnitudes. Para este estudio se han consultado datos de crecidas históricas en el río Cinca recopilados por el doctor Carles Balasch (Balasch et al., 2019) En esta base de datos se disponía al menos de caudales máximos instantáneos de nueve crecidas extraordinarias, tanto históricas como recientes (i.e. 1617, 1787, 1788, 1853, 1866, 1874, 1907, 1937 y 1982). Con la incorporación de estos datos no sistemáticos (crecidas extremas), la magnitud de las crecidas

con diferentes periodos de retorno en la serie pre-embalses era mucho mayor (i.e.  $Q_{25}$  1000  $m^3s^{-1}$  superior).

En este primer grupo, curiosamente, la ocurrida en el periodo post-embalses tiene mayor magnitud que la pre-embalses, siendo los caudales máximo instantáneo, medio máximo y medio mayores en la crecida de 1982. El caudal pico atribuido por CEDEX es 4.194  $m^3s^{-1}$ , mientras que el valor estimado en la literatura es de 3.400  $m^3s^{-1}$ . Sin embargo, la duración de la crecida de 1965 hace que su aportación hídrica sea mucho mayor. El incremento de caudal por hora y la variabilidad de caudal son mucho mayores en la crecida de 1982.

**Tabla 6.** Tabla resumen de los caudales asociados a  $Q_{>25}$

	Pre-Embalse $Q_{>25}$	Post-Embalse $Q_{>25}$
	06/10/1965	08/11/1982
$Q_{ci}$ ( $m^3s^{-1}$ )	2201	4194
$Q_c$ ( $m^3s^{-1}$ )	1426	2348
$Q_m$ ( $m^3s^{-1}$ )	554	826
Aportación ( $hm^3$ )	526	357
Duración (días)	10	5
Incremento ( $m^3s^{-1} h^{-1}$ )	43	172
Variabilidad ( $m^3s^{-1}$ )	2053	4128

$Q_{ci}$ : Caudal máximo instantáneo;  $Q_c$ : caudal máximo medio  $Q_m$ : caudal medio; Incremento: incremento medio de caudal por hora; Variabilidad: Diferencia entre  $Q_{min}$  y  $Q_{ci}$ ;  $Q_i$ : periodo de retorno.

En el **segundo grupo** se han seleccionado algunas crecidas entre el  $Q_5$  y el  $Q_{25}$  de los  $Q_{ci}$  para cada periodo. La tabla 7 muestra cómo a partir de la construcción del sistema Mediano - El Grado, el caudal pico en las crecidas  $Q_5$  se estabiliza y es más homogéneo. El incremento de caudales por hora es ligeramente superior en las crecidas reguladas, pero el resto de las variables son muy parecidas. El papel de los afluentes aumenta significativamente, ya que son éstos los responsables de varias de las crecidas post-embalses que han tenido lugar en Fraga.

**Tabla 7.** Tabla resumen de los caudales asociados a  $Q_{5-25}$

	PRE-DAM $Q_{5-25}$			POST-DAM $Q_{5-25}$		
	03/08/1963	07/11/1965	Promedio	09/11/1966	02/06/1979	Promedio
$Q_{ci}$ ( $m^3s^{-1}$ )	1570	2030	1800	1926	1945	1936
$Q_c$ ( $m^3s^{-1}$ )	1040	1413	1227	1098	1630	1364
$Q_m$ ( $m^3s^{-1}$ )	337	500	419	322	521	422
Aportación ( $hm^3$ )	320	389	355	446	315	380
Duración (días)	10	8	9	15	6	11
Incremento ( $m^3s^{-1} h^{-1}$ )	14	27	20	19	36	28
Variabilidad ( $m^3s^{-1}$ )	1512	1928	1720	1828	1729	1779

$Q_{ci}$ : Caudal máximo instantáneo;  $Q_c$ : caudal máximo medio  $Q_m$ : caudal medio; Incremento: incremento medio de caudal por hora; Variabilidad: Diferencia entre  $Q_{min}$  y  $Q_{ci}$ ;  $Q_i$ : periodo de retorno.

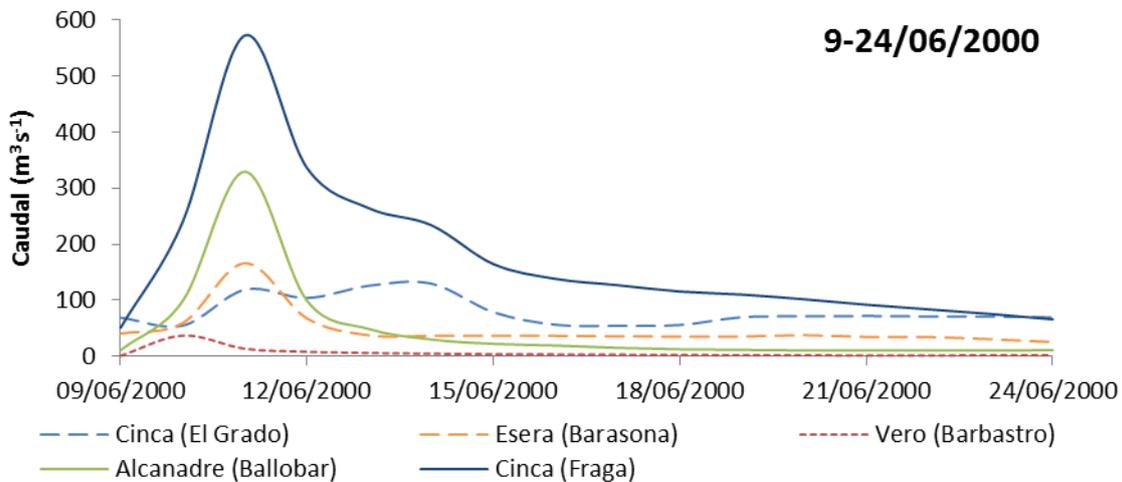
En el tercer grupo se han seleccionado las crecidas entre el  $Q_1$  y el  $Q_{15}$  de los  $Q_{ci}$  para cada periodo excepto la crecida de mayo del 2000 que se obtuvo observando los datos anuales  $Q_c$ . El caudal pico de algunas de estas crecidas se encuentra entre el  $Q_{1,1}$ , pero en ningún caso el  $Q_{15}$ . Como se ha dicho en los apartados anteriores, las crecidas que se dan con mayor frecuencia, y por lo tanto, las crecidas de menor magnitud son las que se han visto más afectadas por la regulación de los caudales. En estas crecidas son fundamentalmente los caudales máximos (el instantáneo y el medio) los que se ven reducidos de manera muy importante, pasando de  $1028 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en el periodo pre-embalses a  $708 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en el periodo post-embalses. El resto de variables son muy similares, excepto en el caso del incremento de caudal por hora, el cual, a diferencia de los grupos anteriores, es mayor en la época pre-embalses.

**Tabla 8.** Tabla resumen de los caudales asociados a  $Q_{1-15}$

	Pre-embalses $Q_{1-15}$						Post-embalses $Q_{1-15}$					
	29/03/ 1952	26/03/ 1958	20/12/ 1958	05/03/ 1962	05/06/ 1964	Media	19/11/ 1969	30/12/ 1981	11/05/ 2000	11/06/ 2000	27/02/ 2003	Media
<b><math>Q_{ci}</math> (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1}</math>)</b>	950	864	900	1236	1189	<b>1028</b>	1274	349	517	762	638	<b>708</b>
<b><math>Q_c</math> (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1}</math>)</b>	643	618	765	999	785	<b>762</b>	1011	175	322	573	446	<b>505</b>
<b><math>Q_m</math> (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1}</math>)</b>	279	206	246	394	274	<b>280</b>	500	96	250	173	269	<b>258</b>
<b>Aportación (<math>\text{hm}^3</math>)</b>	289	196	234	578	474	<b>354</b>	562	83	354	240	232	<b>294</b>
<b>Duración (días)</b>	11	10	10	16	19	<b>13</b>	12	6	19	15	9	<b>12</b>
<b>Incremento (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{ h}^{-1}</math>)</b>	19	18	17	20	41	<b>23</b>	10	10	4	15	20	<b>12</b>
<b>Variabilidad (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1}</math>)</b>	893	845	818	942	994	<b>898</b>	1218	241	440	711	473	<b>617</b>

$Q_{ci}$ : Caudal máximo instantáneo;  $Q_c$ : caudal máximo medio  $Q_m$ : caudal medio; Incremento: incremento medio de caudal por hora; Variabilidad: Diferencia entre  $Q_{min}$  y  $Q_{ci}$ ;  $Q_i$ : periodo de retorno.

El análisis de los hidrogramas nos permite destacar, al igual que en el caso anterior, el importante papel que juegan los afluentes. En el caso del Cinca, la gran mayoría de  $Q_{ci}$  alcanzados en Fraga en las últimas décadas, coinciden con los  $Q_{ci}$  del río Alcanadre. La figura 11 muestra un ejemplo de una crecida en el río Cinca después de la regulación y la contribución de sus principales afluentes.



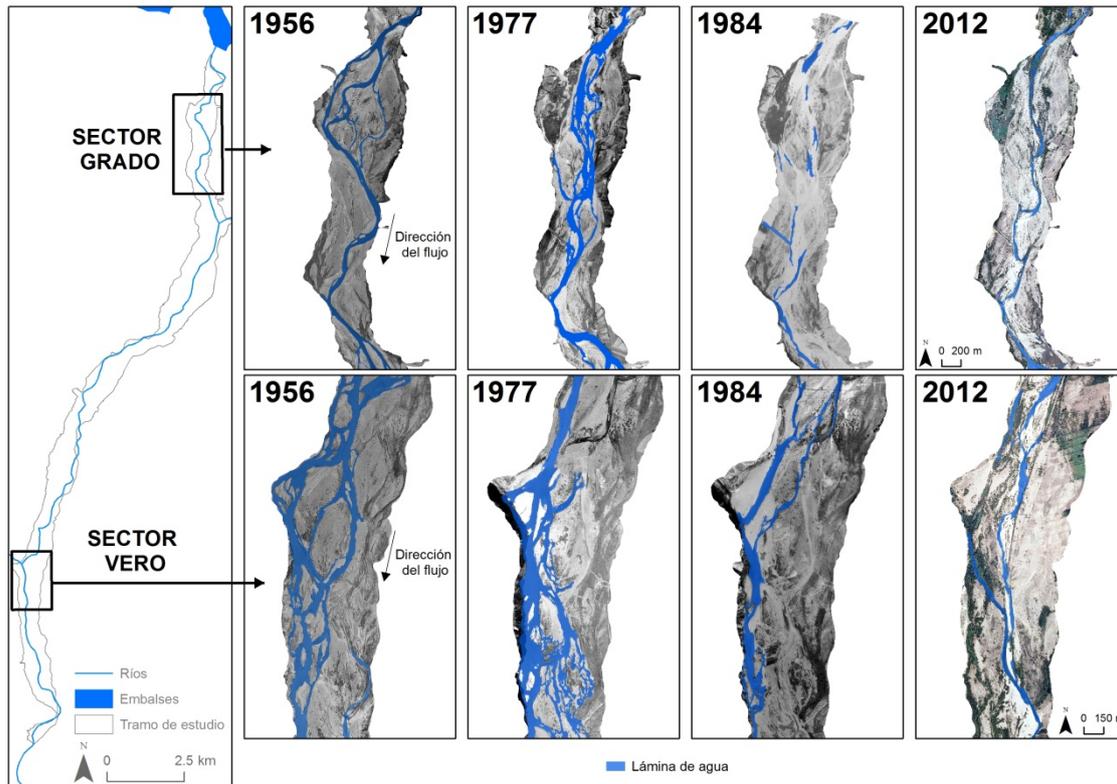
**Figura 11.** Ejemplo de crecida en el río Cinca y sus principales afluentes

## 5.2 DIAGNÓSTICO MORFO-SEDIMENTARIO

Como se ha mencionado anteriormente, las alteraciones que afectan al tramo de estudio, y en particular a los sectores estudiados, se asocian tanto a la regulación ejercida por los embalses (e.g. incisión y estrechamiento del canal, desconexión del río con su llanura aluvial, colonización por parte de la vegetación de zonas anteriormente activas), como a la construcción de motas y escolleras (e.g. desconexión y concentración del flujo), y las extracciones de áridos (e.g. déficit sedimentario).

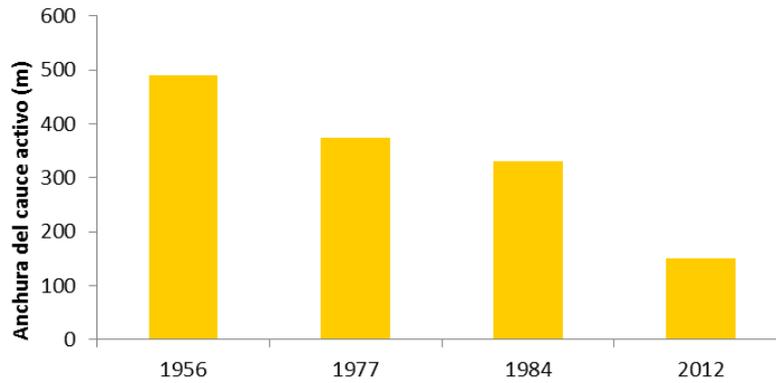
La figura 12 muestra un ejemplo de la evolución del canal activo para las cuatro fechas analizadas y para los dos sectores de estudio. Se considera el año 1956 como representativo del periodo anterior a la regulación, y las tres fechas siguientes, posteriores a la regulación (1977, 1984, 2012). Se observa como la morfología del río ha evolucionado de un tipo trezado, con multiplicidad de brazos de una anchura considerable en el periodo pre-embalses, a tener casi un único canal y de una anchura notablemente menor, un río sinuoso.

Se trata de un claro proceso de simplificación morfológica y estabilización del cauce. La anchura media del canal activo en el tramo de estudio se ha visto reducida en un 83%, pasando de una anchura superior a los 300 metros en 1956 a 50 metros en 2012. Esta reducción no se produce de una manera abrupta inmediatamente después de la puesta en funcionamiento de los embalses, sino que se produce paulatinamente (tiempo de relajación según Petts y Gurnel, 2005), hasta que el río encuentra una nueva situación de equilibrio en relación con la aportación hídrica y la carga sólida recibida desde aguas arriba.



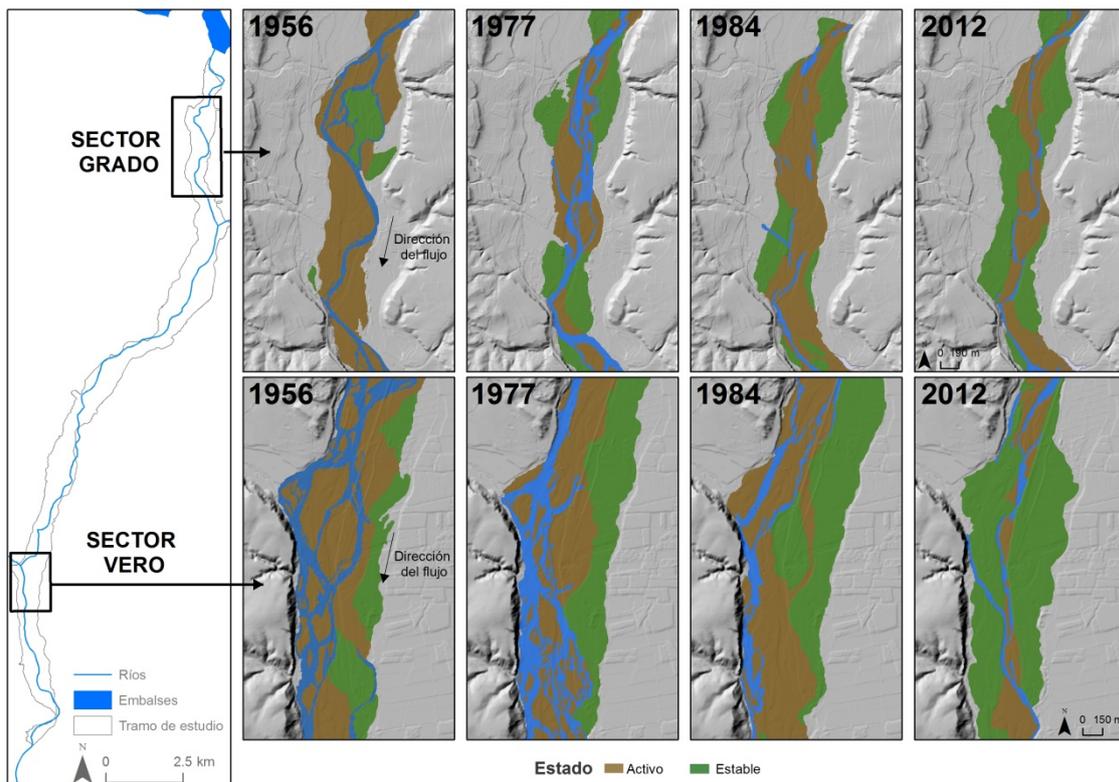
**Figura 12.** Evolución del número de canales activos en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

La morfología de este tramo se va adaptando a las nuevas condiciones. A medida que los caudales medios liberados por la presa se van reduciendo el cauce se va estrechando e incidiendo, quedando aislado de su llanura de inundación y desconectado de sus brazos secundarios. La reducción en frecuencia y magnitud de las crecidas morfogénéticas (i.e. periodo de retorno superior a 1 o 2 años) hace que la vegetación comience a colonizar áreas que anteriormente eran activas, favoreciendo la estabilización de la llanura aluvial y el progresivo encajamiento del río. Se trata de un proceso de retroalimentación ampliamente descrito en la literatura (e.g. Williams y Wolman, 1984). Estos procesos, aunque estén presentes en ambos sectores de estudio, han evolucionado de maneras diferentes debido a las diferentes características de cada uno de ellos. El sector Grado se ve mucho más afectado por los impactos asociados a la presa, ya que se localiza inmediatamente aguas abajo. Sin embargo, en el caso del sector Vero, el río, aunque sometido a otros impactos como la extracción de áridos y a la regulación de azudes menores, recibe la aportación de agua y sedimentos por parte del río Ésera (regulado por el embalse de Barasona) y el río Vero (no regulado), lo que contribuye a atenuar los efectos del sistema Mediano-El Grado.



**Figura 13.** Evolución de la anchura del cauce activo en todo el tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012.

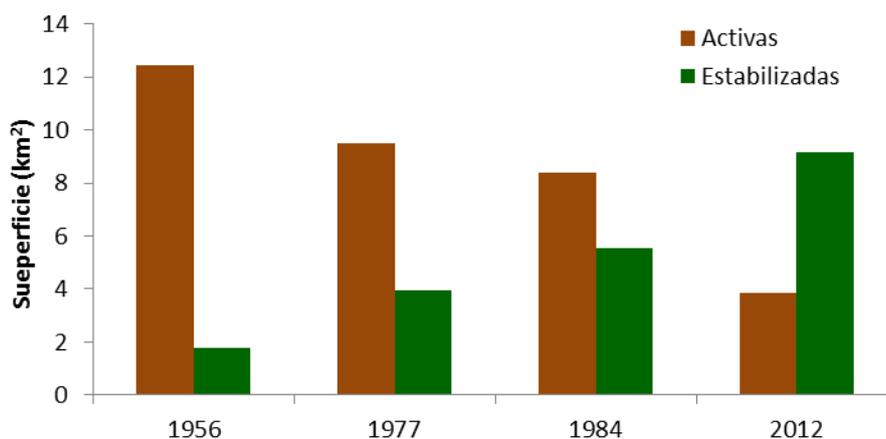
La figura 13 muestra que la reducción del canal activo no es un efecto aislado, ya que comparando las cartografías entre 1956 y 2012, se observa una reducción progresiva de la anchura del cauce activo entre el 50 y el 75% (i.e. la anchura media para todo el tramo pasa de cerca de 500 a 150 m, un 70%).



**Figura 14.** Evolución del estado (activo en color marrón y estable en color verde) de las unidades morfológicas en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

El análisis de las superficies activas y estables a lo largo del tiempo muestra una pérdida progresiva de las áreas activas en favor de las estables. Las figuras 14 y 15 ilustran este proceso. En la figura 14 se puede observar una pérdida importante de las unidades activas en favor de un crecimiento de las unidades más estables.

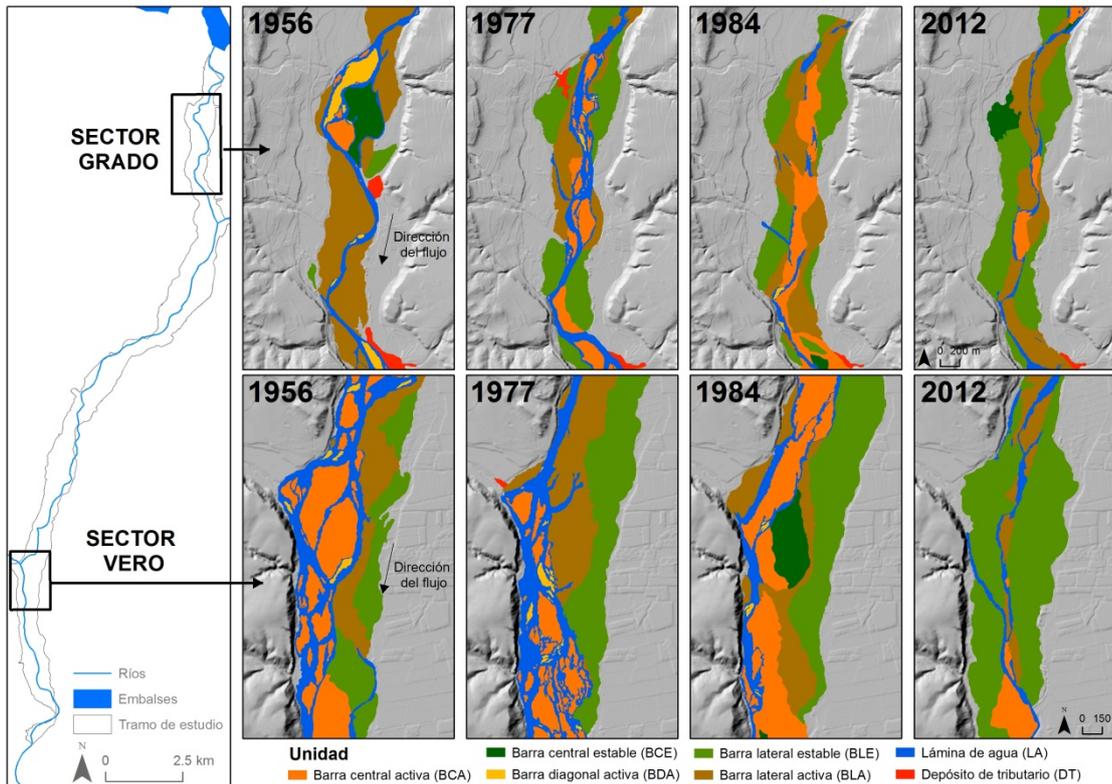
La figura 15 nos muestra la naturaleza de este proceso de una manera cuantitativa. En ésta se observa cómo la superficie del cauce activo se reduce un 70% entre 1956 y 2012, mientras que la superficie estabilizada aumenta en un 80%.



**Figura 15.** Evolución de las superficies activas y estabilizadas en la totalidad del tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012.

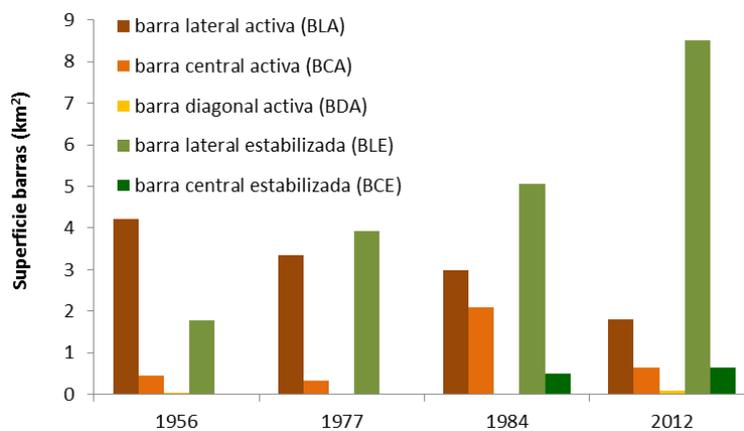
La figura 16 muestra la evolución de la tipología de barras, los canales y la llanura de inundación para los cuatro años estudiados. Los resultados son similares a los de las figuras 14 y 15, aunque presentan de manera más específica los cambios en las tipologías de barras. Las unidades morfológicas estudiadas son las barras centrales, laterales y diagonales que son normalmente activas durante caudales altos (BCA, BLA y BDA, respectivamente) y su paso a estables (BCE, BLE y BDE, respectivamente). Las barras laterales son las más habituales, seguidas por las centrales y las diagonales, aparecen de manera testimonial.

En el periodo pre-embalses, en el sector Grado predominan las barras laterales activas (BLA; color marrón) que va derivando en barras laterales estables en las fechas más recientes (BLE, verde claro); mientras que, en el sector Vero, predominan las barras centrales activas (BCA; color naranja) en el periodo pre-embalses para dejar paso a barras laterales estables (BLE, color verde claro) en el periodo post-embalses.

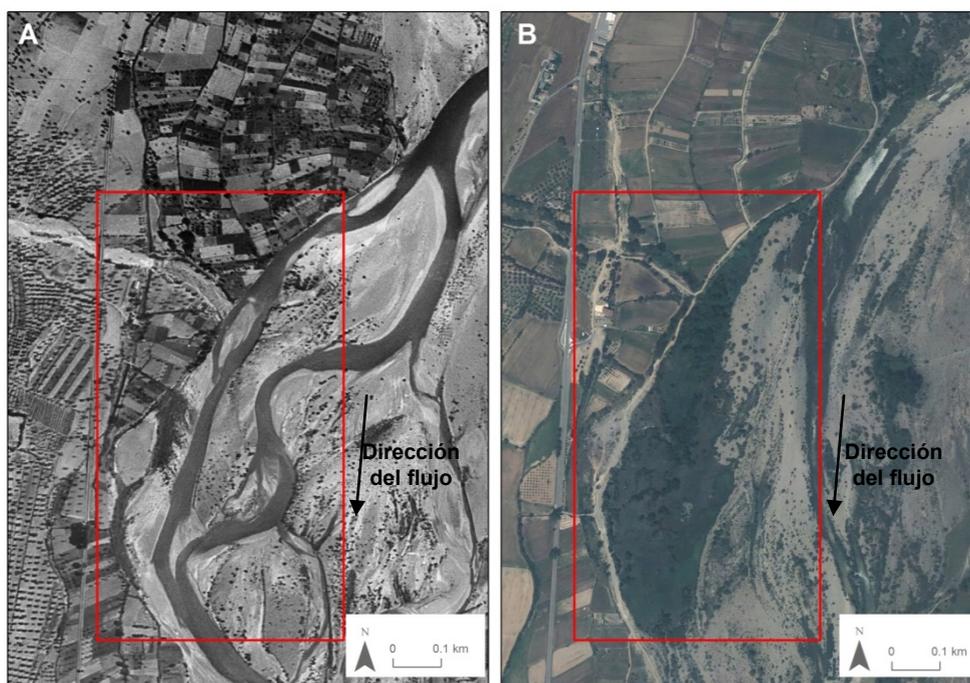


**Figura 16.** Evolución de las unidades morfológicas (barras) en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012. Está figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

La mayor parte de las barras en el periodo post-embalses son caracterizadas como barras laterales (Figura 17). La importancia de las barras laterales activas decrece en el tiempo (pasando de más de 4 a menos de 2 km<sup>2</sup>), mientras que el de las barras laterales estables aumenta de manera muy significativa (de 1,7 a 8,5 km<sup>2</sup>).



**Figura 17.** Evolución del tipo de barras en la totalidad del tramo de estudio (25,5 km) entre 1956 y 2012.



**Figura 18.** Ejemplo de colonización de vegetación en áreas anteriormente activas entre (A) 1956 y (B) 2012

La figura 18 muestra un ejemplo de colonización de vegetación y transformación de barras activas a estables. La superficie ocupada por barras centrales activas se mantiene estable en el tiempo, excepto en el año 1984, en el que la superficie aumenta considerablemente. Este hecho está probablemente relacionado con los efectos de dos crecidas de gran magnitud (1979 y 1982 con periodos de retorno post-embalses entre 25 y 500 años). La magnitud de estas crecidas reactivó la capa activa del lecho y eliminó la vegetación que favorecía la estabilización de la llanura aluvial.

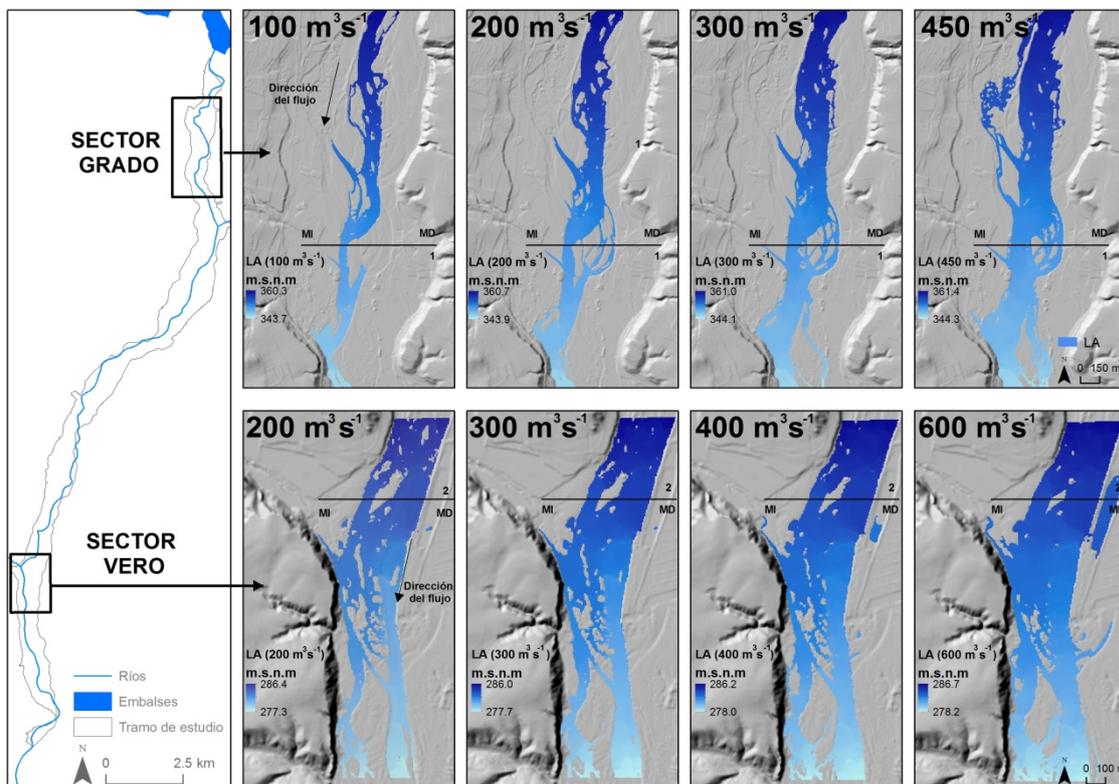
Por último, en los últimos dos periodos de estudio se observa un tipo de barra nueva, se trata de barras centrales estabilizadas. La razón de la tardía aparición de esta tipología de barras puede ser debida a que son las últimas en estabilizarse, ya que continúan siendo inundadas con frecuencia por crecidas frecuentes, siendo su colonización vegetal más lenta. De la misma forma, la estabilización de estas barras también podría estar influenciada por la incisión del cauce y la desconexión de estas unidades del régimen actual de crecidas.

### 5.3 CONDICIONES DE CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA ACTUAL

Tras la finalización del complejo de presas Mediano - El Grado, el sistema del medio y bajo Cinca se ha ido adaptado a las nuevas condiciones hidrosedimentarias, lo que ha conllevado los

cambios morfológicos presentados anteriormente. Principalmente la menor frecuencia de caudales de elevada magnitud ha favorecido el desarrollo de la vegetación y la estabilización de la llanura aluvial. El cambio de patrón morfológico de río trezado a río de un solo canal o unicanal, hace que la energía se concentre en un solo cauce, favoreciendo la incisión y desconexión del cauce principal con sus brazos secundarios.

La figura 19 muestra la cota de la lámina de agua asociada a diferentes caudales de crecida. En las imágenes superiores se observa que en el sector Grado la conexión total de los brazos secundarios se produce entre los 300 y los 450 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, caudales iguales o superiores a una crecida con un periodo de retorno de 2 años. Las imágenes inferiores muestran el encajamiento del río en el tramo Vero, en el que el río ocupa casi la misma superficie con un caudal de 200 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> que con uno de 600 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> debido al efecto de las motas.

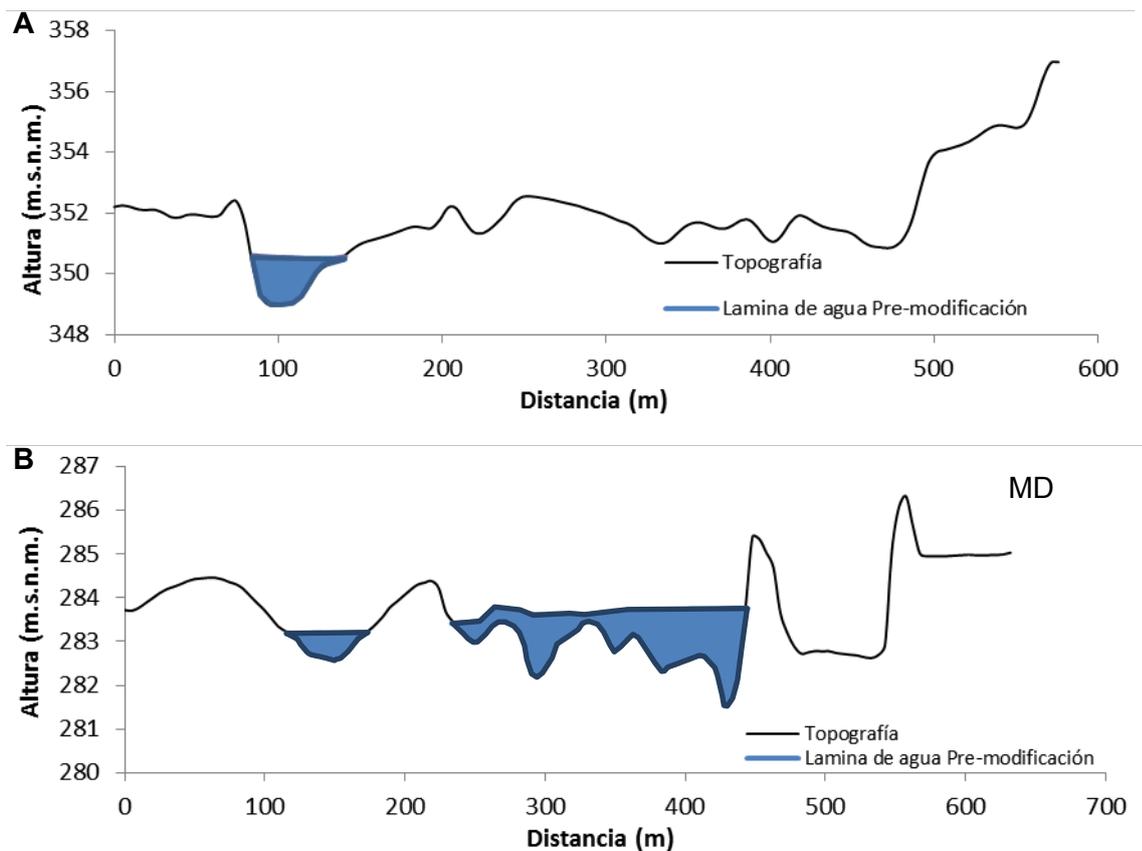


**Figura 19.** Cota de lámina de agua (LA) asociada a caudales de crecida representativos. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

La figura 20 nos muestra los perfiles transversales mostrados en la figura 19. La figura 20A se corresponde con el perfil número 1, y la 20 B con el perfil número 2 de la figura 19. En la figura 20A se puede apreciar una diferencia de dos metros entre el talweg del canal principal y el más bajo de sus canales secundarios. Este hecho implica que el número de cauces activos no se

incrementa hasta que no aumentan mucho los caudales, hecho menos frecuente que antes de los embalses, lo que condicionará también la estabilización de éstos debido a la colonización de la vegetación de ribera.

Por lo que se refiere al sector Vero (Figura 20B), las motas también juegan un papel importante en la desconexión del río con la llanura de inundación. La creación de estas infraestructuras impide la movilidad lateral del río favoreciendo la concentración del flujo y la incisión del lecho.



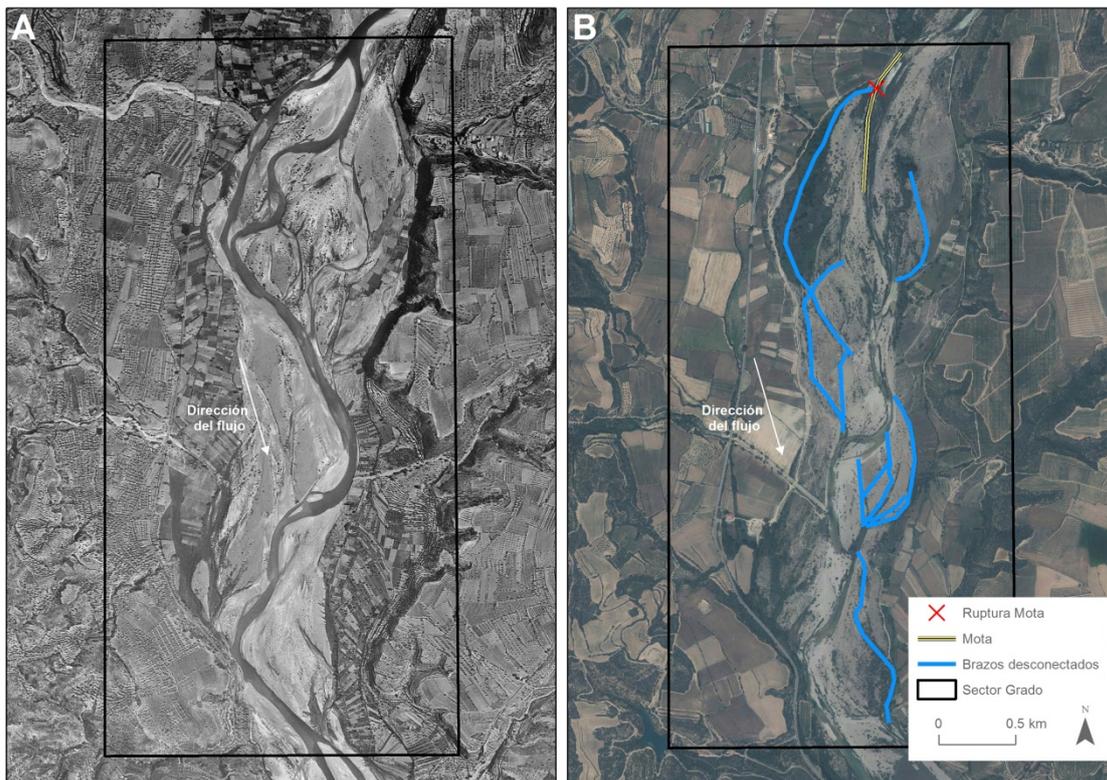
**Figura 20.** Perfiles transversales en (A), una antigua zona trenzada del río en el sector Grado y (B), zona del río afectada por una mota en el sector del Vero. Lámina de agua en A, asociada a  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Lámina de agua en B asociada a un caudal de  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Ver localización de los perfiles en la figura 19.

#### 5.4 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE MEJORA AMBIENTAL

Como se ha indicado en el apartado 4.3., los objetivos generales de las medidas de rehabilitación están enfocados a la mejora del régimen de caudales y de la conectividad lateral, todo ello favoreciendo al aumento del espacio de movilidad fluvial. Sin embargo, cada sector

requiere unas medidas específicas al poseer características diferentes (distancia a las presas, disponibilidad de sedimento, aportes de afluentes) y diferentes trayectorias evolutivas.

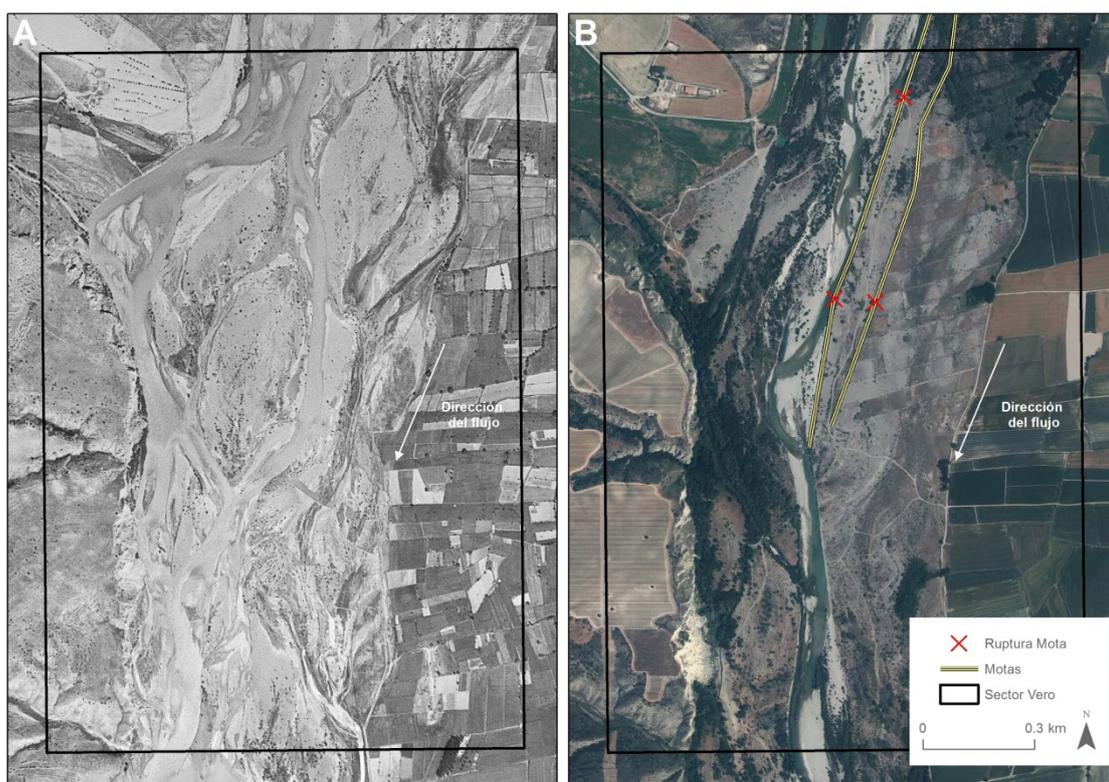
El primer tramo (Sector Grado) se localiza 1,5 kilómetros aguas abajo de la presa de El Grado (Figura 21). En la primera mitad del siglo XX estaba caracterizado por tener una de las llanuras aluviales más amplias del tramo de estudio (>750 metros), y un número de brazos activos muy elevado, los cuales, tal y como se ha indicado anteriormente, durante las décadas posteriores a la finalización de la presa, han ido decreciendo en número, y perdiendo su conexión con el cauce principal, como mínimo durante crecidas recurrentes. El **objetivo de mejora** que se propone en este sector es la reconexión de algunos de estos brazos secundarios para aumentar la conectividad lateral y con ellos la recuperación de flujos de aguas, sedimentos y nutrientes que se han ido perdiendo paulatinamente, con lo que ello comporta para la heterogeneidad del sistema fluvial y su diversidad y funcionamiento. La figura 21B muestra los cauces actualmente considerados desconectados que serán reconectados.



**Figura 21.** (A), Sector Grado en 1956, y (B), Sector Grado en 2012 mostrando la ubicación de la mota y los brazos secundarios a reconectar.

El segundo sector (Sector Vero) se localiza en la confluencia del río Cinca con el río Vero. Al igual que en el anterior caso, el río Cinca en este tramo tenía una amplia llanura aluvial y una

morfología de brazos múltiples, casi anastomosado. Tras el cierre de la presa, este sector experimenta las mismas alteraciones que el de Grado, disminuyendo el número de brazos activos; pero, además, en este caso, la desconexión lateral se ha visto aumentada por la presencia de motas que limitan la movilidad del río. Esta mota ha reducido prácticamente a la mitad la anchura activa del canal, como se puede ver en la figura 22, pasando de 900 metros a 450. El objetivo de mejora que se propone en este sector es la eliminación parcial de la mota para dotar al río de mayor movilidad lateral, permitiendo al canal principal volver a conectarse con lo que antiguamente era un canal secundario, mejorando de esta manera la conectividad lateral y longitudinal del sistema.



**Figura 22.** (A), Sector Vero en 1956, y (B), Sector Vero en 2012 mostrando la mota y las zonas a derruir.

En ambos sectores son necesarias pequeñas actuaciones en el cauce para favorecer las medidas de rehabilitación. En el caso del sector Grado se ha rebajado la cota de inundación de los canales secundarios (Figura 21B) para que con un menor caudal puedan ser inundados. En el caso del sector Vero, tal y como indica la Figura 22B, se proponen dos aperturas parciales de la mota con el mismo objetivo, la reducción de la cota de inundación de la llanura. En esta acción se propone abrir dos tramos de mota de unos 50 metros (esta longitud es orientativa y podría variar) que separaban el canal principal de un antiguo canal secundario, permitiendo la

entrada y salida de caudales por las diferentes aperturas. En el apartado 5.6 se presentan más detalles de ambas actuaciones o modificaciones.

La consecución de estos objetivos de rehabilitación fluvial, no sólo pretenden aumentar la conectividad lateral y movilidad fluvial del río, sino que, unidos al **programa de crecidas de mantenimiento** favorecerá otros procesos como la (re-) activación de lecho y el mantenimiento de áreas activas y de vegetación de ribera y la (re-) creación de hábitats.

## 5.5 DEFINICIÓN DEL HIDROGRAMA DE CRECIDA DE MANTENIMIENTO

Como se ha visto en el apartado 4.4.1, el diseño de las crecidas de mantenimiento debe responder a un objetivo específico, y en función de éste, variará. Aunque en el caso del Cinca el objetivo principal es (a) la mejora de la conectividad lateral, las crecidas de mantenimiento también facilitarían (b) la re-activación y mantenimiento de áreas sedimentariamente activas para reducir su estabilización, tendencia observada en el periodo post-embalses.

Para la consecución de estos objetivos se ha determinado el caudal responsable de las características morfológicas de un río, que está normalmente asociado a una crecida con un periodo de retorno entre 1 y 2 años. Para la obtención de estos caudales, en la sección Grado, ha sido posible mediante una correlación entre  $Q_c$  y  $Q_{ci}$  (estación Grado, A 016) que ofrece valores entre 260 y 350  $m^3s^{-1}$ . La obtención de estos caudales valores para el sector Vero ha sido más complicada, puesto que no se disponía de una estación de aforo, y la entrada de dos afluentes importantes como son el Ésera y el Vero, dificultaba la obtención de valores consistentes. En este caso se ha recurrido a la aplicación informática CAUMAX (sección 4.1). Esta herramienta fue aplicada en el sector Grado primero para comprobar los resultados, siendo el valor obtenido similar al obtenido con los datos de la estación de aforo, 279  $m^3s^{-1}$ . Para el sector Vero, el caudal con periodo de retorno de 2 años es de 428  $m^3s^{-1}$ . Estos serán por tanto los caudales máximos empleados en las crecidas de mantenimiento.

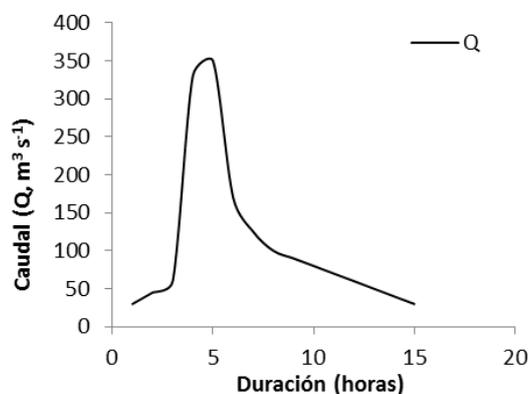


Figura 23. Diseño de hidrograma de crecida de mantenimiento

Además de la magnitud de las crecidas ha sido necesario comprobar que estos caudales sean suficientemente altos para permitir la reconexión del canal principal con sus canales secundarios y con su llanura de inundación. La figura 23 muestra el hidrograma diseñado y la tabla 9 sus principales características.

**Tabla 9.** Principales características del diseño de crecida de mantenimiento

	<b>Crecida de mantenimiento</b>
<b>Qci (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	350
<b>Qm (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	111
<b>Aportación (hm<sup>3</sup>)</b>	6
<b>Duración (horas)</b>	15
<b>Incremento (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	14
<b>Variabilidad (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	320

Este diseño se basa en la forma del hidrograma de crecidas naturales acaecidas en el río Cinca. El diseño se ha tenido que escalar, ya que las crecidas naturales, tanto pre, como post-embalses tienen duraciones de una a varias semanas. El diseño se ha reducido a 15 horas, puesto que la disponibilidad de agua es habitualmente un factor limitante en la aplicación de estas medidas de rehabilitación (Batalla y Vericat, 2009). Aun así, el volumen planteado es inferior al 1% de la capacidad total del sistema de embalses Mediano - El Grado. Al igual que las crecidas naturales, se ha intentado replicar una subida súbita de caudal (i.e. elevada tasa de cambio) que permita desestructurar la coraza del lecho y generar algo de movilidad. Según la simulación realizada en Grado con el caudal pico de la crecida, se podrían llegar a mover puntualmente partículas superiores a los 20 cm, aunque la mediana de diámetro crítico en el cauce mojado es de 2 cm. En el caso del sector Vero, los valores de los diámetros críticos eran muy similares a los del sector Grado. El pico se mantiene durante dos horas y luego desciende en menos de 10 horas hasta recuperar los valores iniciales. El incremento de caudal está dentro de la media de las crecidas con periodos de retorno similares.

Hay que tener en cuenta que esta crecida, en el tránsito desde El Grado hasta la confluencia con el Vero, se ha laminado. Será necesario poder contar con una posible aportación desde la presa de Joaquín Costa para poder mantener el pico de la crecida hasta el sector Vero. Además, como se ha dicho anteriormente, el tramo situado aguas abajo de la presa de Joaquín Costa, se encuentra en un estado morfológico deteriorado a causa de la regulación. Se considera que si la aportación de caudales por parte del embalse de Barasona pudiese simular una crecida de mantenimiento, sería muy beneficioso para este tramo del río Ésera. Este tipo de crecidas

simultáneas ya se han llevado a cabo con éxito en el programa de crecidas de mantenimiento del Ebro.

El diseño presentado es preliminar y deberá ser evaluado en el campo para evitar que se produzcan impactos negativos, como la erosión lateral o la incisión del cauce. En caso de que se observaran efectos no esperados o deseados, el diseño debería ser re-evaluado hasta alcanzar un diseño óptimo para las condiciones actuales del río y los objetivos propuestos (i.e. los ríos son sistemas dinámicos y estas crecidas han de adaptarse a la naturaleza cambiante de estos sistemas).

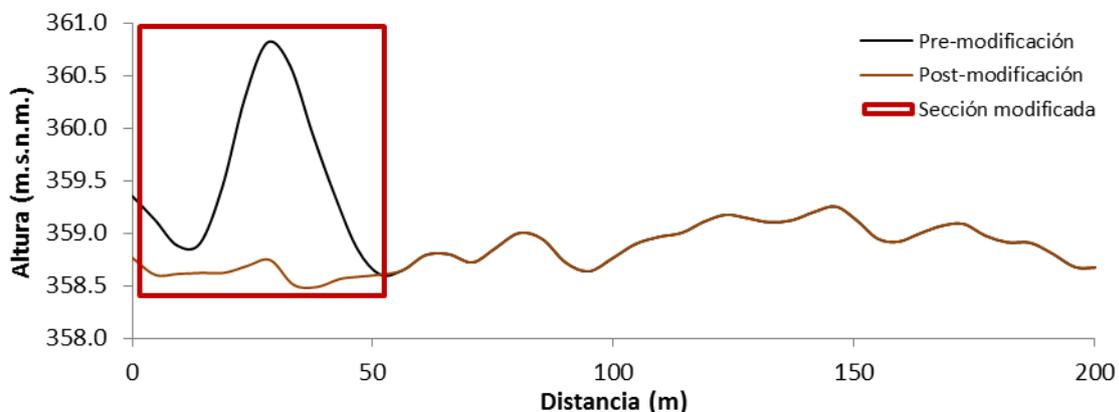
## 5.6 EVALUACIÓN DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS: MEJORA DE LA CONECTIVIDAD LATERAL

Una vez definidos los objetivos de rehabilitación fluvial, se ha procedido a la modelización de diferentes escenarios. Como se ha mencionado en la sección 4.3.2., en primer lugar, se ha generado un modelo topográfico de las condiciones morfológicas actuales y se han simulado diferentes caudales representativos para conocer las condiciones hidráulicas y de conectividad asociadas a la configuración fluvial actual (Figura 20).

Una vez finalizadas las primeras simulaciones y conocidas las condiciones de conectividad hidráulica de los sectores de estudio, se ha procedido a la modificación de la malla en función de los objetivos de rehabilitación propuestos para cada uno de los sectores.

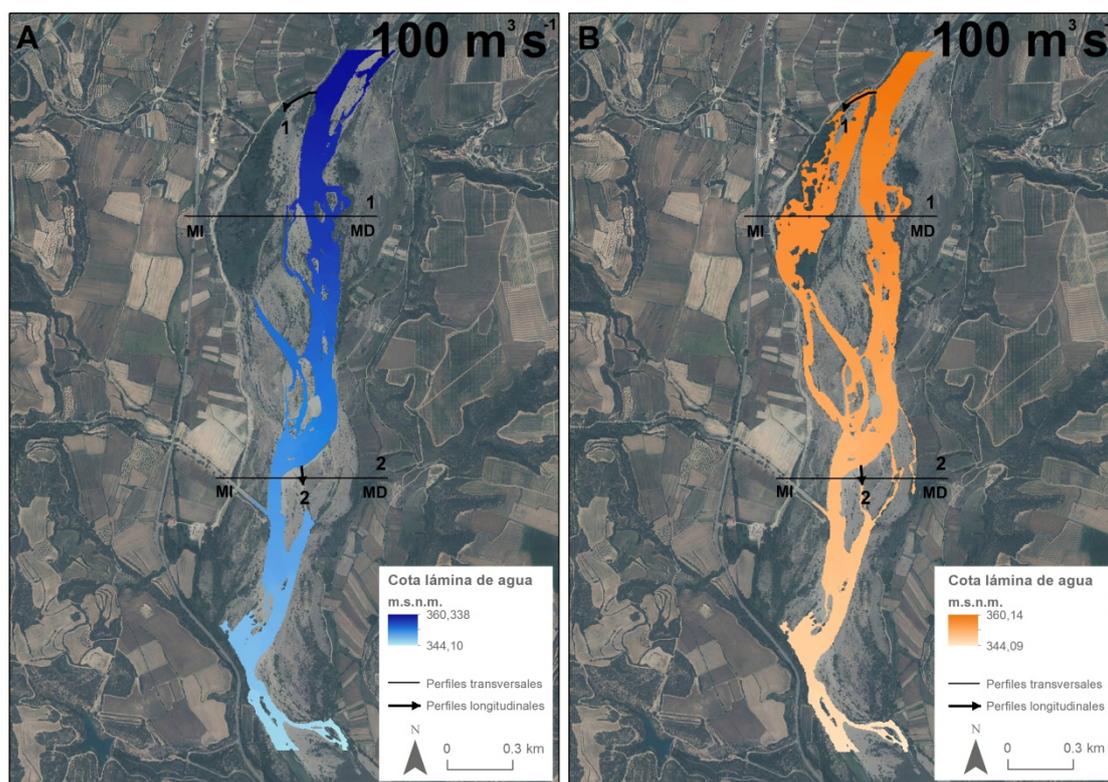
### 5.6.1 Sector Grado

En el caso del sector Grado se han rebajado las cotas de inundación de los brazos secundarios para facilitar su conexión con el canal principal con los caudales de crecida seleccionados (a partir de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 24.** Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 1 de la figura 25)

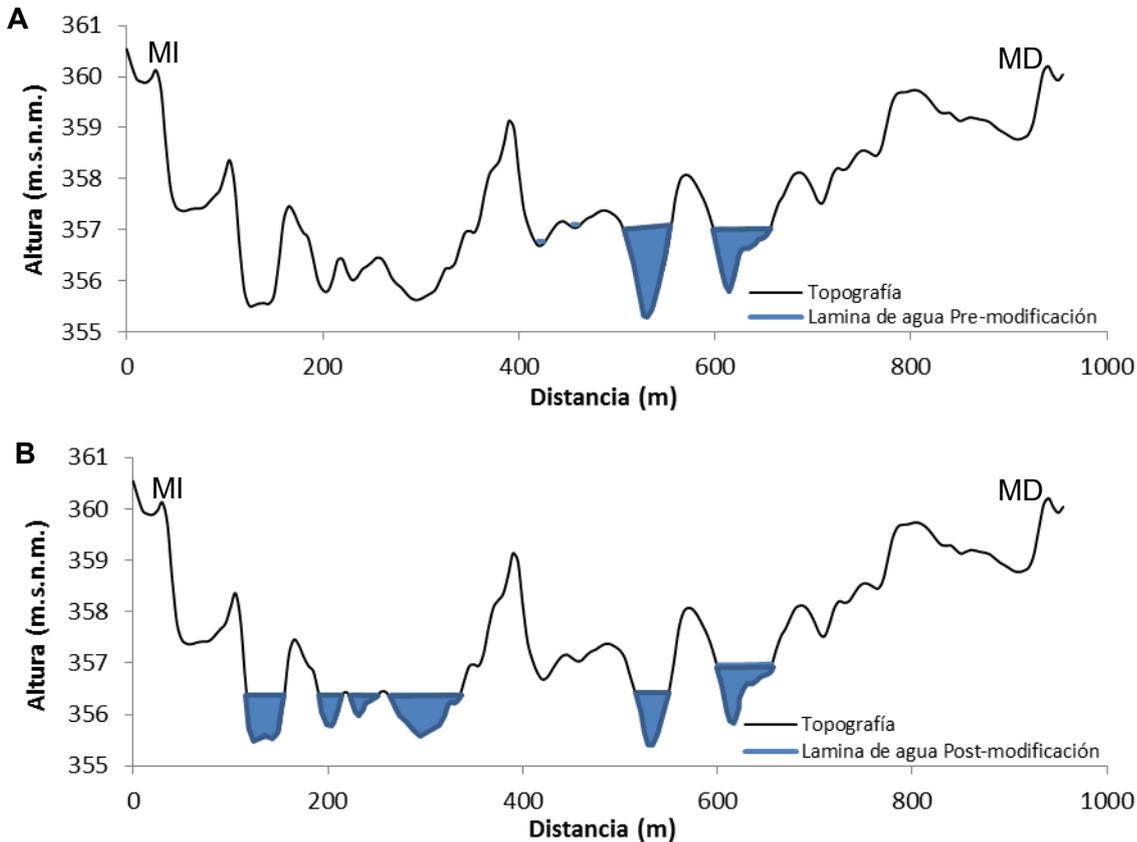
Uno de estos brazos secundarios estaba desconectado por una mota; en este caso, se ha abierto una parte de esta mota para poder reconectarlo. La figura 24 muestra el perfil longitudinal del canal secundario del sector de Grado desconectado mediante la mota (línea de color negro) y la topografía después de su modificación (aperturas de la mota) para su conexión con el canal principal (línea color marrón).



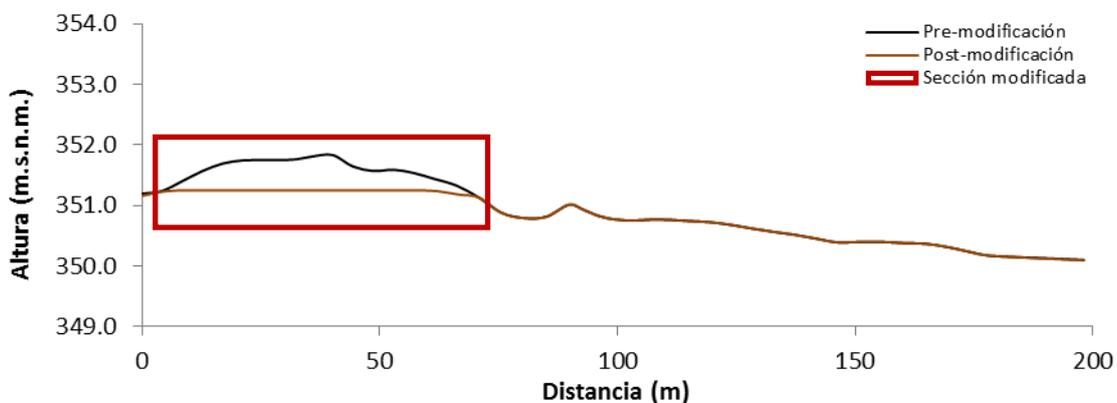
**Figura 25.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

Como se puede observar en la figura 25, la eliminación parcial de la mota permite la reconexión del cauce principal con un antiguo brazo secundario con unos caudales no muy elevados. Desde el punto de vista geomorfológico, esta modificación aumentaría notablemente la conectividad lateral del río. Además, en este caso, la mota está hecha con materiales provenientes del propio río, así que las gravas extraídas tras la apertura de la mota podrían ser reintroducidas en el río para ser movilizadas durante eventos competentes, ayudando a paliar los problemas de incisión que sufría este tramo. Se trata de otra acción potencial de rehabilitación cuyo análisis queda fuera de este trabajo pero que sería interesante abordar en proyectos posteriores de carácter más ejecutivo. Los perfiles transversales que se muestran en la figura 26 corresponden al transecto número 1, que aparece marcado en la figura 25. La figura

26A representa el perfil transversal correspondiente a las condiciones previas a la apertura de la mota. En este caso se ve cómo la lámina de agua circula solamente por dos canales (y en otros dos de manera muy superficial). En la figura 26B se presenta el perfil una vez modificada la topografía y se puede observar como hay un total de 6 canales por los que circula el agua.



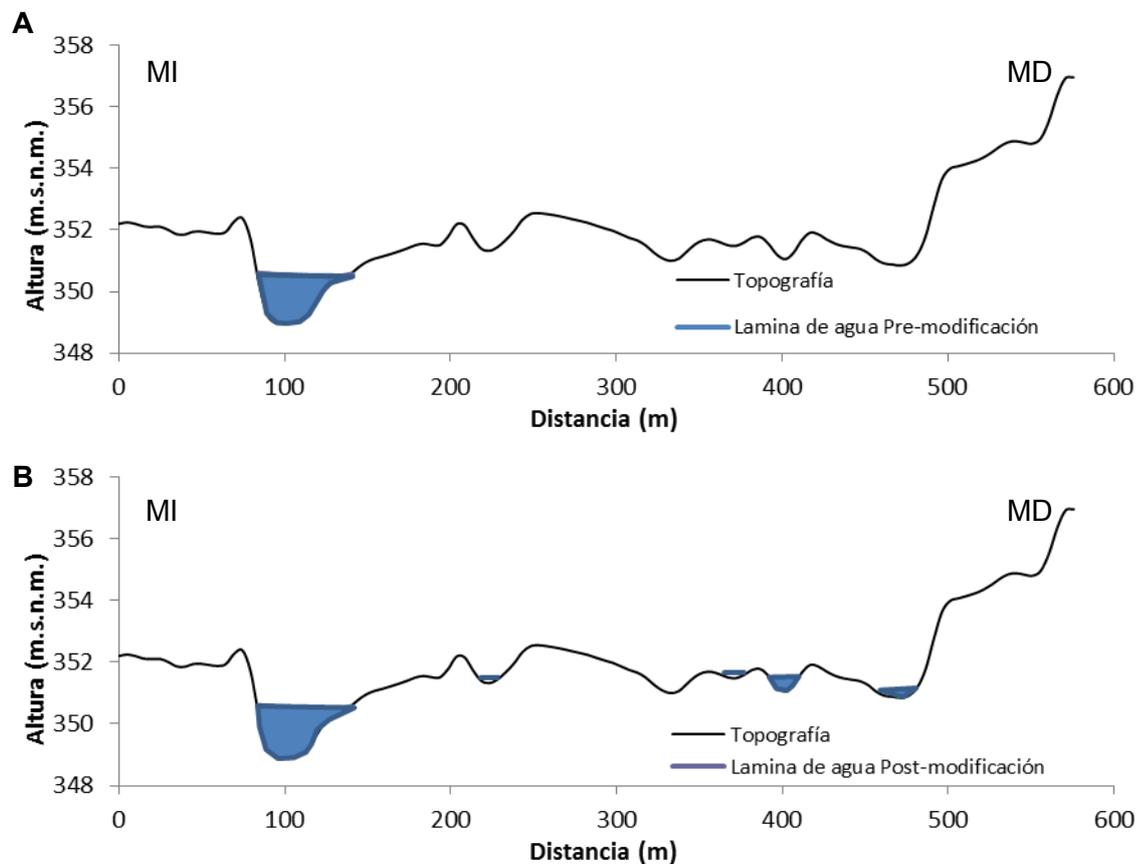
**Figura 26.** Calados asociados a un caudal de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios (ver figura 25 para su localización).



**Figura 27.** Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 2 de la figura 25).

Como en el caso anterior, la figura 27 muestra la modificación de la topografía realizada para la conexión de un brazo secundario. Para lograr la reconexión ha sido necesario reducir el umbral de conexión (alzado) en 60 cm.

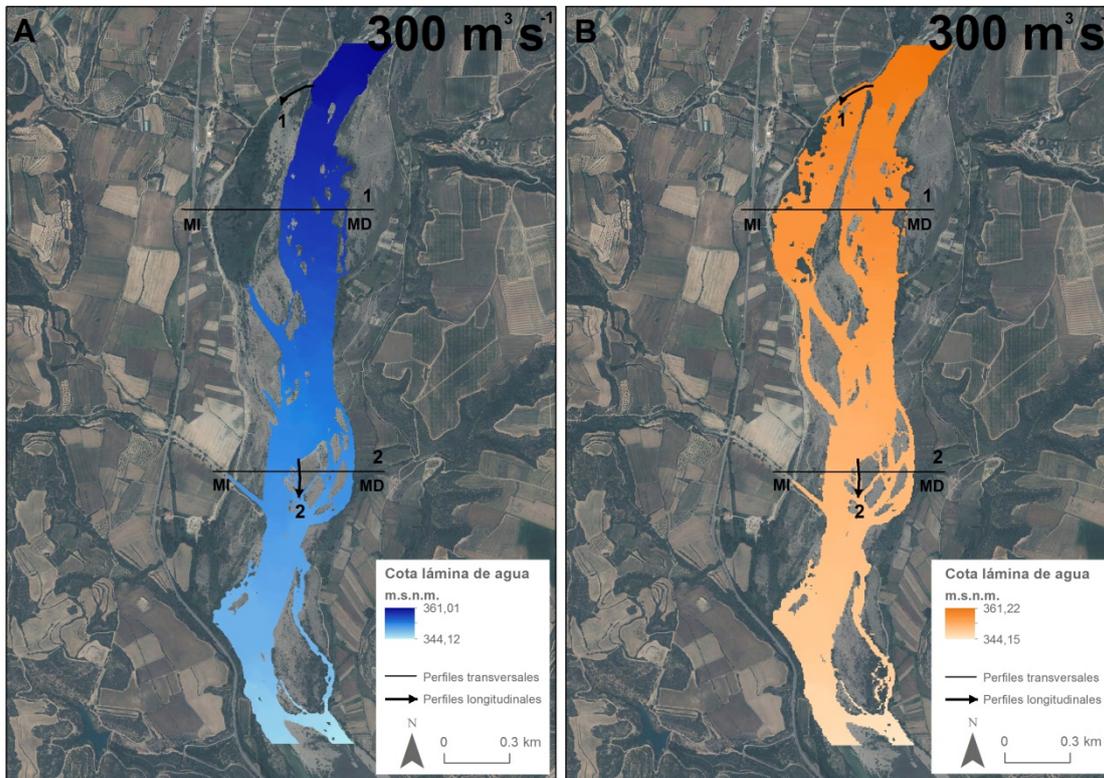
Los perfiles transversales de la figura 28 corresponden al perfil número 2 de la figura 25. Tanto en la figura 25 como en la 28 se observa que, aunque someramente, cuatro canales muestran reconexión con caudales de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .



**Figura 28.** Calados asociados a un caudal de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios.

La modificación de la topografía para facilitar la conexión de los brazos secundarios con caudales relativamente bajos (a partir de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) ofrece una potencial mejora de las condiciones morfológicas de este sector, ya que el cauce estará activo con mayor frecuencia y a través de más brazos. En este sector, el caudal pico de las crecidas de mantenimiento estará entre los 200 y los  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . En la figura 29 se observa que  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  es un caudal suficientemente elevado para conectar la mayoría de brazos que han sido modificados; sin

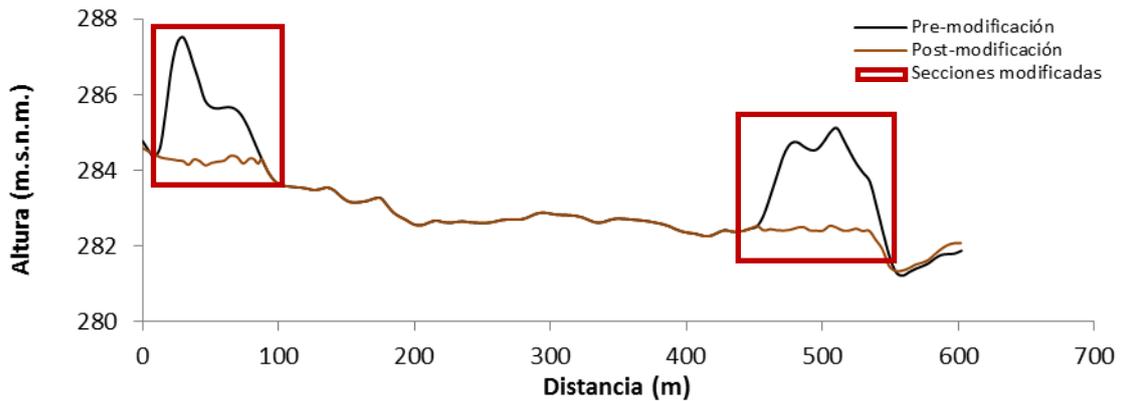
embargo, con  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  se observa cómo el canal secundario, que se encuentra en la parte inferior de la figura, sólo se conecta con la topografía modificada (Figura 6 anexo I).



**Figura 29.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

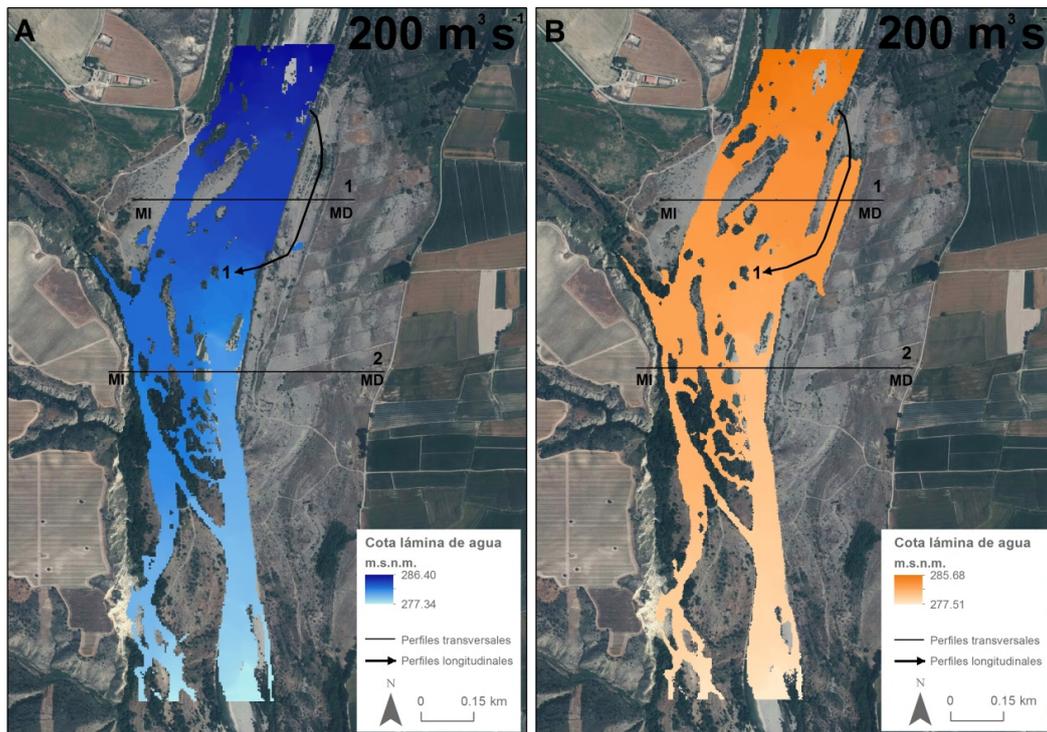
### 5.6.2 Sector Vero

En las simulaciones para el sector Vero, se han eliminado tramos de la mota aguas arriba y aguas abajo para permitir la conectividad de esta área, anteriormente activa, con el canal principal (Figura 22 en el apartado 5.4). La figura 30 muestra el estado anterior y posterior a la modificación de la topografía. En el perfil longitudinal se puede observar cómo se han eliminado 4 m de mota. Hay que remarcar que, para este trabajo, la mota ha sido eliminada parcialmente, realizando una apertura de unos 15 metros en la zona de aguas arriba y más de 50 metros en la zona de aguas abajo. A diferencia del sector de Grado, esta mota está construida con grandes bloques, lo que indica que no serían útiles de entrada para proyectos de mejora sedimentaria.



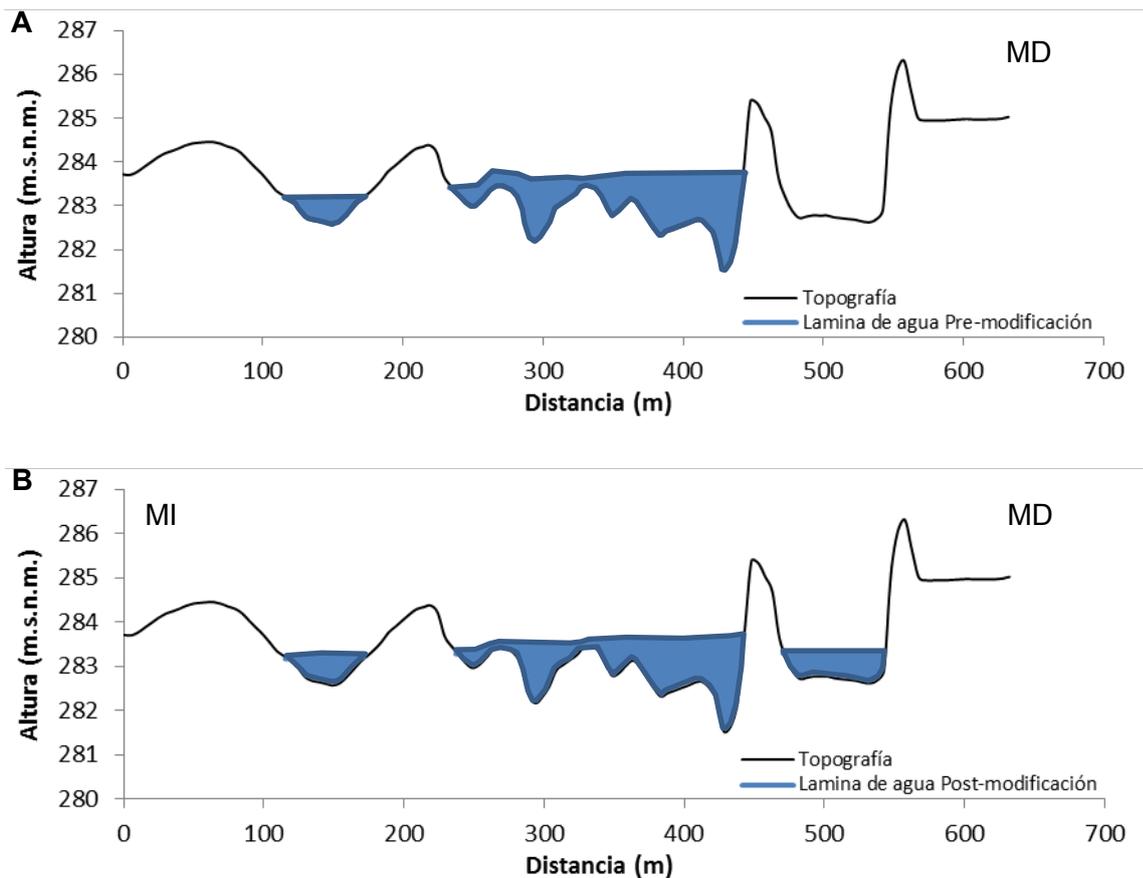
**Figura 30.** Topografía pre (negro) y post (marrón) de la modificación llevada a cabo para la reconexión de un brazo secundario (Correspondiente al perfil longitudinal 1 de la figura 31)

Como ocurre en el sector Grado, el objetivo de conectar el canal secundario aislado por la mota se alcanza con  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , caudal inferior al que se propone liberar en una crecida de mantenimiento (cerca de  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), si bien, la conexión con estos caudales sólo se produce por la abertura de la zona inferior (Figura 31B).



**Figura 31.** Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios aislados por una mota en el sector Vero. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.

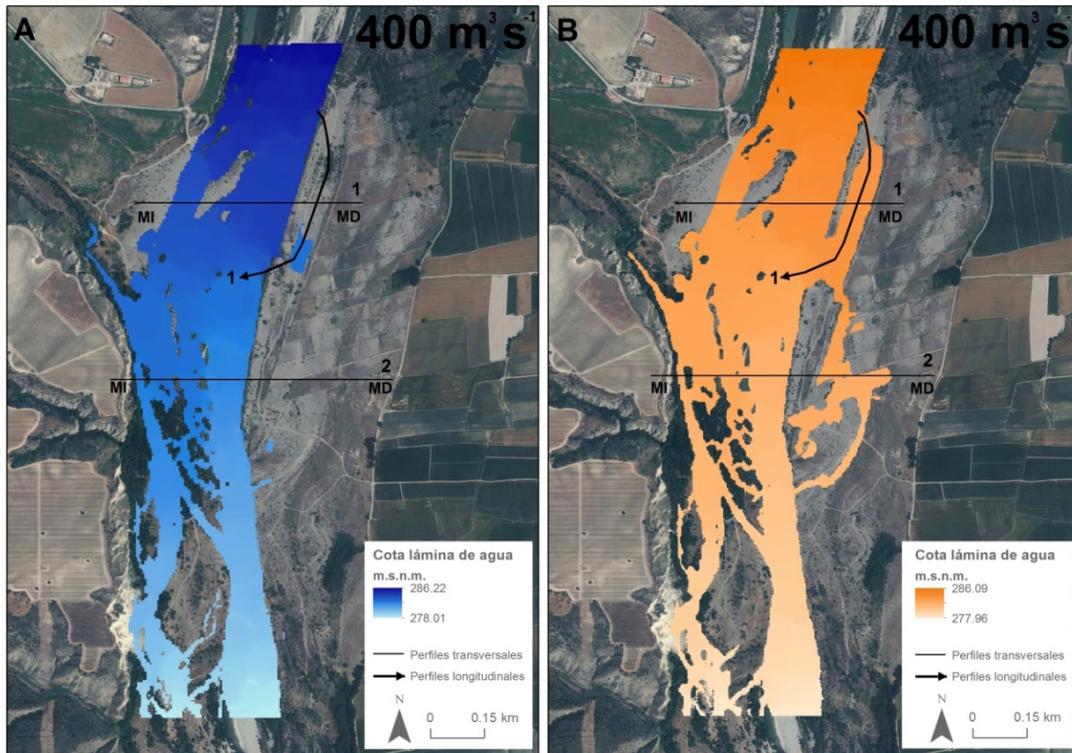
Los perfiles transversales que se muestran a continuación corresponden al transecto número 1, que aparece marcado en la figura 31. La figura 32A representa el perfil transversal correspondiente a las condiciones previas a la apertura de la mota. En éste se ve cómo la lámina de agua circula solamente por dos canales (y otros dos de manera muy superficial), mientras que en la figura 32B, una vez modificada la topografía, hay un total de 6 canales por los que circula el agua.



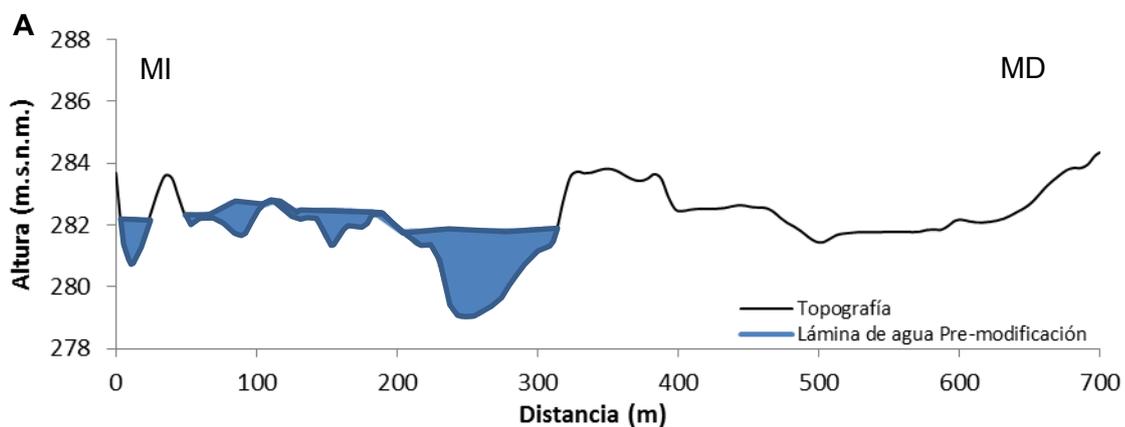
**Figura 32.** Calados asociados a un caudal de  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la modificación para la conexión de un brazo secundario desconectado por una mota en el sector del Vero.

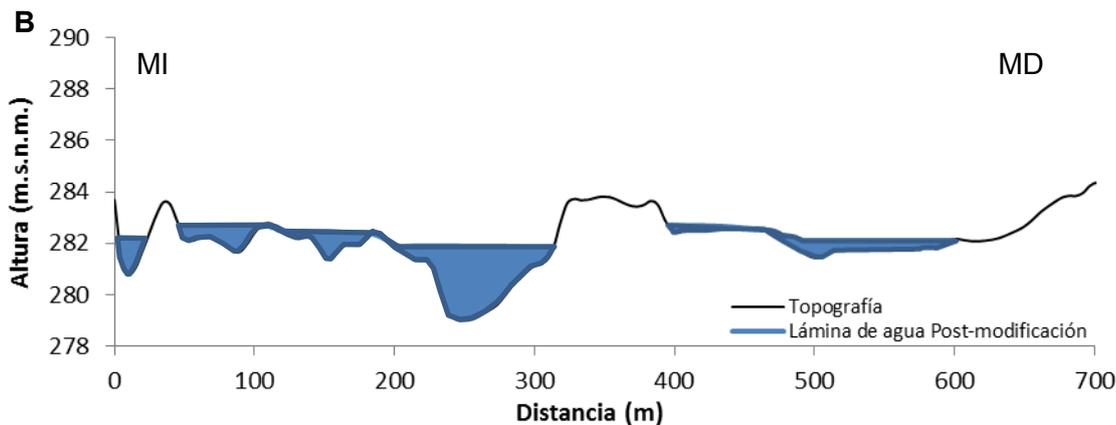
El aumento del caudal hasta los  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  consigue que la conexión del cauce principal con el secundario sea total, tanto aguas arriba como aguas abajo. Además, otra apertura en la mota secundaria, ha permitido simular la circulación del agua por una amplia superficie de la llanura aluvial, recuperando otro antiguo brazo abandonado (Figura 32B, y perfil transversal 2 de la figura 33B). En total hay una diferencia de más de 26 ha entre la situación original y la modificada, lo que supone una importante ampliación de la zona inundable que puede contribuir

a la laminación de las crecidas aguas abajo, reducir la incisión en el cauce, y a la creación de nuevas unidades morfológicas como hábitats potenciales para albergar diferentes especies.



**Figura 33.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios aislados por una mota en el sector del Vero. Esta figura también aparece en tamaño original (A4) en los anexos.





**Figura 34.** Calados asociados a un caudal de 400 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de un brazo secundario desconectado por una mota en el sector del Vero.

*A priori*, los objetivos propuestos pueden ser alcanzados llevando a cabo las diferentes medidas planteadas, que son esencialmente la modificación de la topografía del cauce (i.e. apertura de motas y reconexión de canales secundarios) y la aplicación coordinada de crecidas de mantenimiento.

En este caso concreto, la evaluación se basa en la mejora de la conectividad, por lo que efectos como erosiones laterales e incisión del cauce deberán ser evaluados. Además, toda esta evaluación, que se sustenta en los resultados de la modelización, tendrá que ser verificada en el terreno mediante el seguimiento de la crecida y los efectos de ésta sobre la morfología y la movilidad de los sedimentos. A su vez los datos de campo añadirían información para el rediseño y la mejora de la calibración de los modelos hidráulicos.

## 6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo es un ejemplo de integración metodológica diseñada a partir de datos públicos y de herramientas de libre acceso para el diseño de crecidas de mantenimiento con objetivos de rehabilitación. En este caso concreto, el estudio se centra en el medio y bajo río Cinca, pero esta metodología puede ser aplicada en cualquier río de la cuenca del Ebro, ya que son numerosos los ríos en la cuenca que plantean situaciones de impactos a largo plazo similares. Los análisis hidrológicos y morfológicos han constatado las alteraciones en el río Cinca aguas abajo del complejo de embalses Mediano - El Grado ofreciendo las siguientes conclusiones:

- A. El análisis hidrológico ha puesto de manifiesto cómo la regulación de los caudales ha alterado el régimen hidrológico, ha disminuido las aportaciones medias anuales y ha



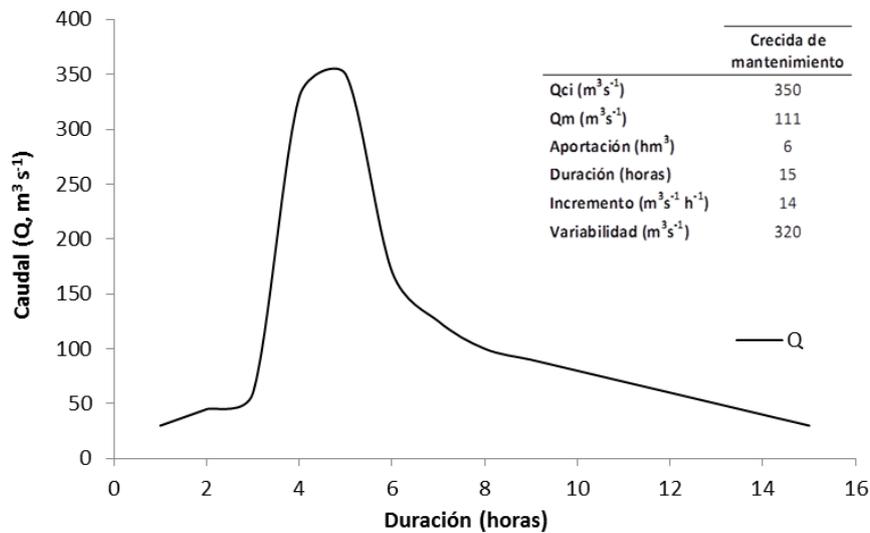
reducido la magnitud de las crecidas más frecuentes (períodos de retorno inferiores a los 25 años) entre un 30 y un 50%.

- B. El análisis evolutivo de la morfología fluvial indica que dominan los procesos de incisión, reducción del cauce activo, revegetación de áreas anteriormente activas, desconexión del canal principal de sus brazos secundarios y la consecuente estabilización de la llanura aluvial.
- C. Los cambios morfo-sedimentarios observados están condicionados por los impactos hidrológicos, mayoritariamente la reducción de la magnitud y frecuencia de las crecidas competentes. Aun así, existen otros impactos, más localizados en el cauce, que también condicionan la evolución o cambios morfo-sedimentarios; se trata de las motas y los posibles impactos asociados a las extracciones de áridos.

Las propuestas de mejora de la conectividad lateral junto con un programa de crecidas de mantenimiento se presentan como una posibilidad sólida para contribuir a la mejora del estado morfológico del tramo de estudio y, por ende, del funcionamiento y la estructura de todo el ecosistema asociado.

Los modelos hidráulicos corroboran el potencial de estas acciones de rehabilitación, mostrando la ganancia potencial de espacios inundables y reconectando brazos abandonados; estas acciones deben tener, sin embargo, continuidad en el tiempo para mantener la efectividad mediante el ajuste del diseño al estado morfo-sedimentario. En el tramo inferior y final bajo del Cinca se hace necesaria también la implementación de un programa de crecidas que reactive el sistema, ya que gran parte de la actividad morfo-sedimentaria del río proviene de afluentes no regulados, como el Alcanadre.

El diseño de esta crecida se basa en la forma del hidrograma de crecidas naturales acaecidas en el río Cinca, si bien su magnitud y duración se han adecuado al objetivo de reducir el 'gasto' de agua, que suele ser un factor limitante en este tipo de medidas de rehabilitación, especialmente en años de baja aportación hídrica. El caudal máximo equivale al de una crecida con un periodo de retorno entre 1 y 2 años (figura 35), el cual permitiría la reconexión del canal principal con sus canales secundarios y con su llanura de inundación. La figura 23 muestra el hidrograma diseñado sus principales características.



**Figura 35.** Diseño de hidrograma y principales características de crecida de mantenimiento

En cuanto al diseño de la crecida, como se ha mencionado anteriormente, sería imprescindible el aporte de caudales del río Ésera para evitar la laminación de los caudales de crecida liberados por la presa de El Grado y alcanzar los caudales adecuados en el sector Vero. Dado el estado hidromorfológico del río Ésera aguas abajo del embalse de Barasona, sería muy recomendable que la liberación de estos caudales fuera de manera similar a una crecida de mantenimiento, pero quizás este tema merezca un trabajo a parte.

El ejemplo del programa de crecidas de mantenimiento llevado a cabo en el tramo bajo del Ebro, ha demostrado que los ríos son sistemas muy complejos en constante cambio, y la creación de medidas de rehabilitación debe estar en continua re-evaluación para adaptarse en cada momento a las necesidades del sistema. Es por esto que la monitorización y la toma de datos en el campo es fundamental, tanto en los momentos previos a la crecida, para la ampliación de los datos disponibles y específicamente la creación de un modelo más preciso, como en los momentos posteriores a la crecida, para validar los datos obtenidos mediante el modelo y verificar que la crecida no haya generado impactos no deseados en el cauce.

Finalmente, este trabajo se considera un primer paso en la elaboración de un programa de medidas de rehabilitación del tramo medio y bajo del Cinca. En caso de la puesta en marcha de estas medidas, será sin duda necesario llevar a cabo un análisis más detallado. En este caso, el diseño de las crecidas se ha basado en los objetivos de mejora de la conectividad lateral y de la reactivación del canal, pero si fueran diferentes, como por ejemplo la eliminación de algas, removilización de sedimentos, movilización de depósitos puntuales, el diseño sería probablemente distinto, aunque el flujo metodológico para su diseño se podría aplicar.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos el apoyo de diferentes miembros del grupo de investigación RIUS de la Universidad de Lleida en la realización de diferentes tareas del proyecto. Los análisis de los cambios morfológicos se están ampliando en el marco de la tesis doctoral de Efrén Muñoz, desarrollada en el Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial de la Universitat de Lleida. También queremos agradecer la información facilitada por el Centro de Proceso de la Cuenca (SAIHEBRO) y en especial a José Adolfo Álvarez por la diligencia y el apremio a la hora de proporcionarnos esta información.

## REFERENCIAS

- BALASCH, 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 AD. *Sci. Total Environ*, 669, 7–10.
- BATALLA, R.J., VERICAT, D. (2011): An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro Basin. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 1070–1081.
- BATALLA, R.J., KONDOLF, G.M., GOMEZ, C.M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 290, 117–136.
- BATALLA, R.J., VERICAT, D. (2009): Hydrological and Sediment Transport Dynamics of Flushing Flows: Implications for Management in Large Mediterranean Rivers. *River Research and Applications*, 25, 297–314.
- BRUNE GM (1953): The trap efficiency of reservoirs. *Trans Amer Geophys Union*, 34, 407–418.
- COWAN, W.L. (1956): Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7), 473–475.
- BUENDIA, C., BUSSI, G., TUSET, J., VERICAT, D., SABATER, S., PALAU, A., BATALLA, R.J. (2016): Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 540, 144– 157.
- DRAPER, N.R., SMITH, H. (1981): Applied Regression Analysis, Wiley, New York (1981)
- ETOH, T., MUROTA, A., NAKANISHI, M. (1987): SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. Hydrologic Frequency Modeling, 253-264.
- GALLART, F., LLORENS, P., (2004): Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth*, (11-12) parts A/B/C, 769–773
- HABERSACK H., PIÉGAY H. (2007) – Challenges in river restoration in the Alps and their surrounding areas. In Habersack H., Piégay H., Rinaldi M. (Eds.): Gravel-bed River 6: From Process Understanding to River Restoration. Elsevier, Amsterdam, 703-737
- LOBERA, G., BATALLA, R.J., VERICAT, D., LÓPEZ-TARAZÓN, J.A., TENA, A. (2016): Sediment transport in two Mediterranean regulated rivers. *Sci. Total Environ.*, 540, 101–113,
- LLENA, M., VERICAT, D., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. (2018): Application of structure from motion (SfM) algorithms for the historical analysis of changes in fluvial geomorphology. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1-2), 53-73.
- LÓPEZ-BUSTOS, A., (1981): Tomando el pulso a las grandes crecidas de los ríos peninsulares. *Rev. Obras Públicas*, 3190, 179–192.

- MUÑOZ NARCISO, E., VERICAT, D., SMITH M.W., BATALLA R.J. (2018): Cambios morfológicos (1956-2012) en un río de gravas afectado por múltiples impactos antrópicos (Río Cinca, Pirineos Centrales). En Garcia, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E. y Batalla, R.J. (Eds.): Geomorfología del Antropoceno: Efectos del Cambio Global sobre los procesos geomorfológicos. Universitat de les Illes Balears, Sociedad Española de Geomorfología, Palma. 402 pp.
- PETTS, G.E. AND GURNELL, A.M. (2005): Dams and geomorphology: research progress and future directions. *Geomorphology*, 71 (1-2), 27–47.
- PIÉGAY, H., NAYLOR, L.A., HAIDVOGL, G., KAIL, J., SCHMITT, L., BOURDIN, L. (2008): Integrative river science and rehabilitation: European experiences. En Brierley G.J., Fryirs K.A. (Eds.): River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair. Society For Ecological Restoration International, Island Press, chapter 11, 201–219
- SCHUMM, S. A. (1979): Geomorphic thresholds: the concept and its applications, *Trans. Insti. Brit. Geogr.*, NS4, 485–515,
- TENA, A., KSIAZEK, L., VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2012): Assessing at-a-reach erosion and deposition during a flushing flow in a large regulated river (The lower Ebro). *River Research and Applications*, 29, 876–890.
- WILLIAMS, G. P., WOLMAN, M. G. (1984) Downstream effects of dams on alluvial rivers. United States geological survey professional paper 1286, no of pages: 83

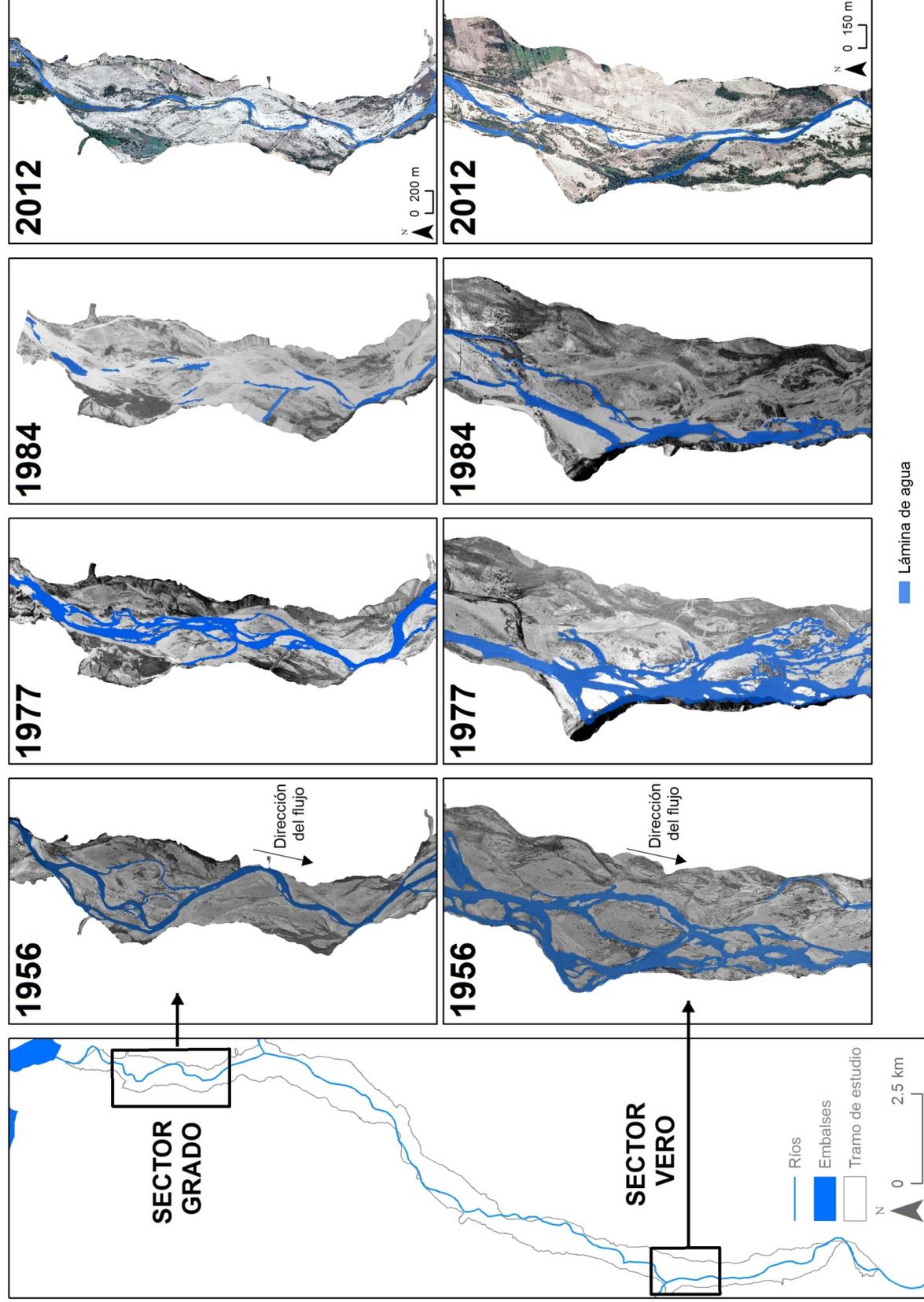




## ANEXO 1. FIGURAS GRAN FORMATO

---

Figura A1. Evolución del número de canales activos en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012.



**Figura A2.** Evolución del estado (activo y estable) de las unidades morfológicas en los sectores de estudio Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012.

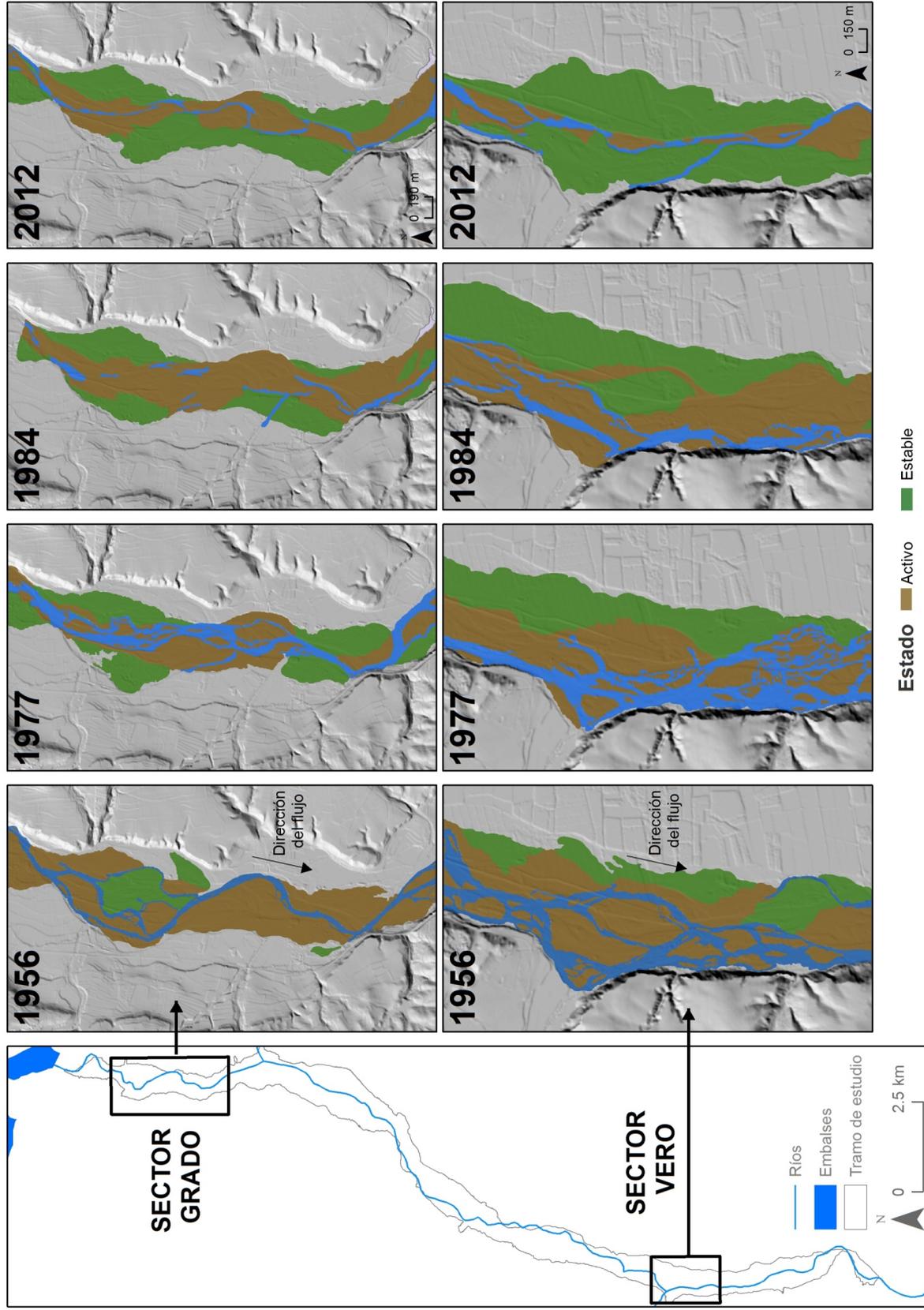


Figura A3. Evolución de las unidades morfológicas (barras) en los sectores de estudio de Grado y Vero para las fechas 1956, 1977, 1984 y 2012.

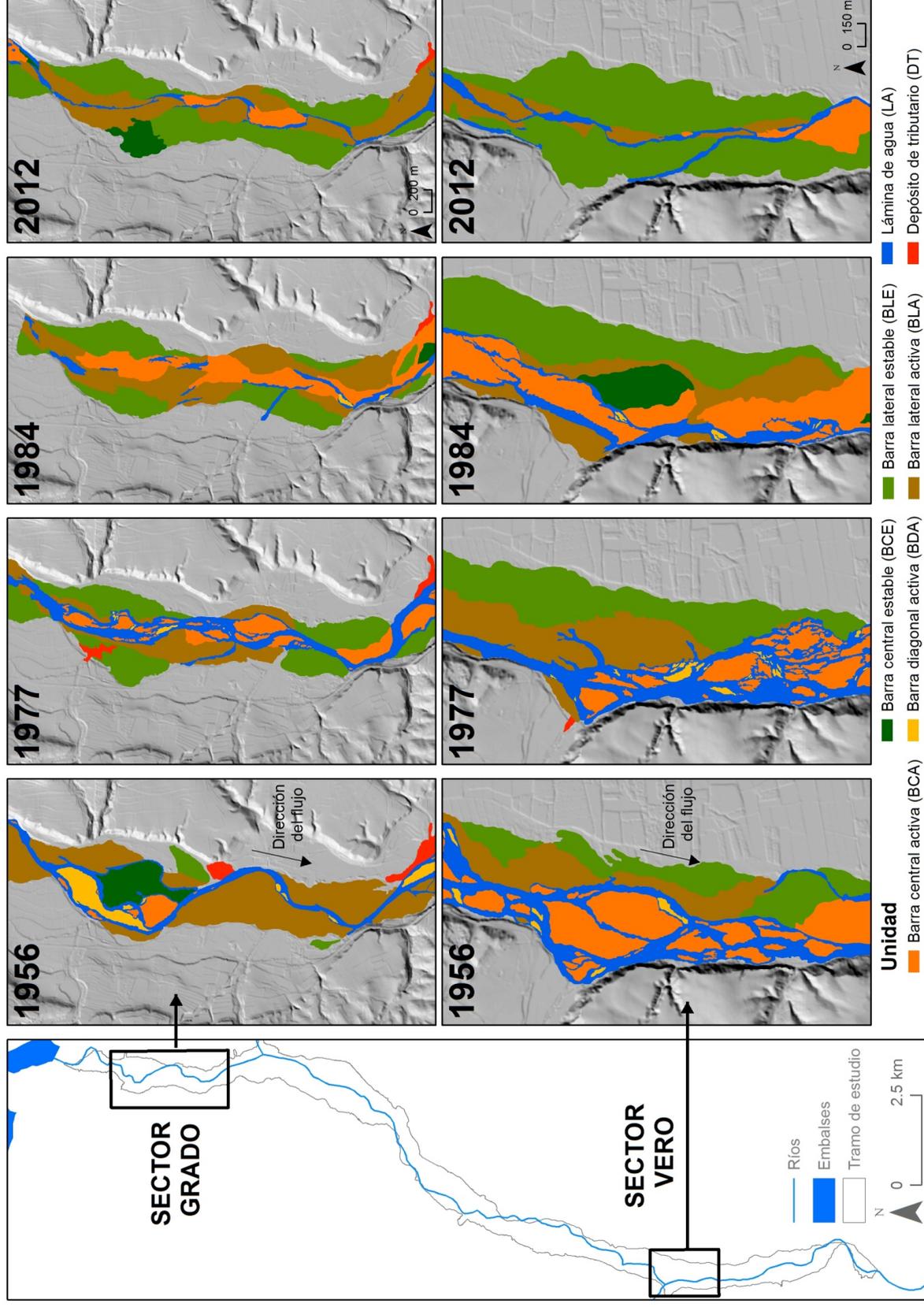
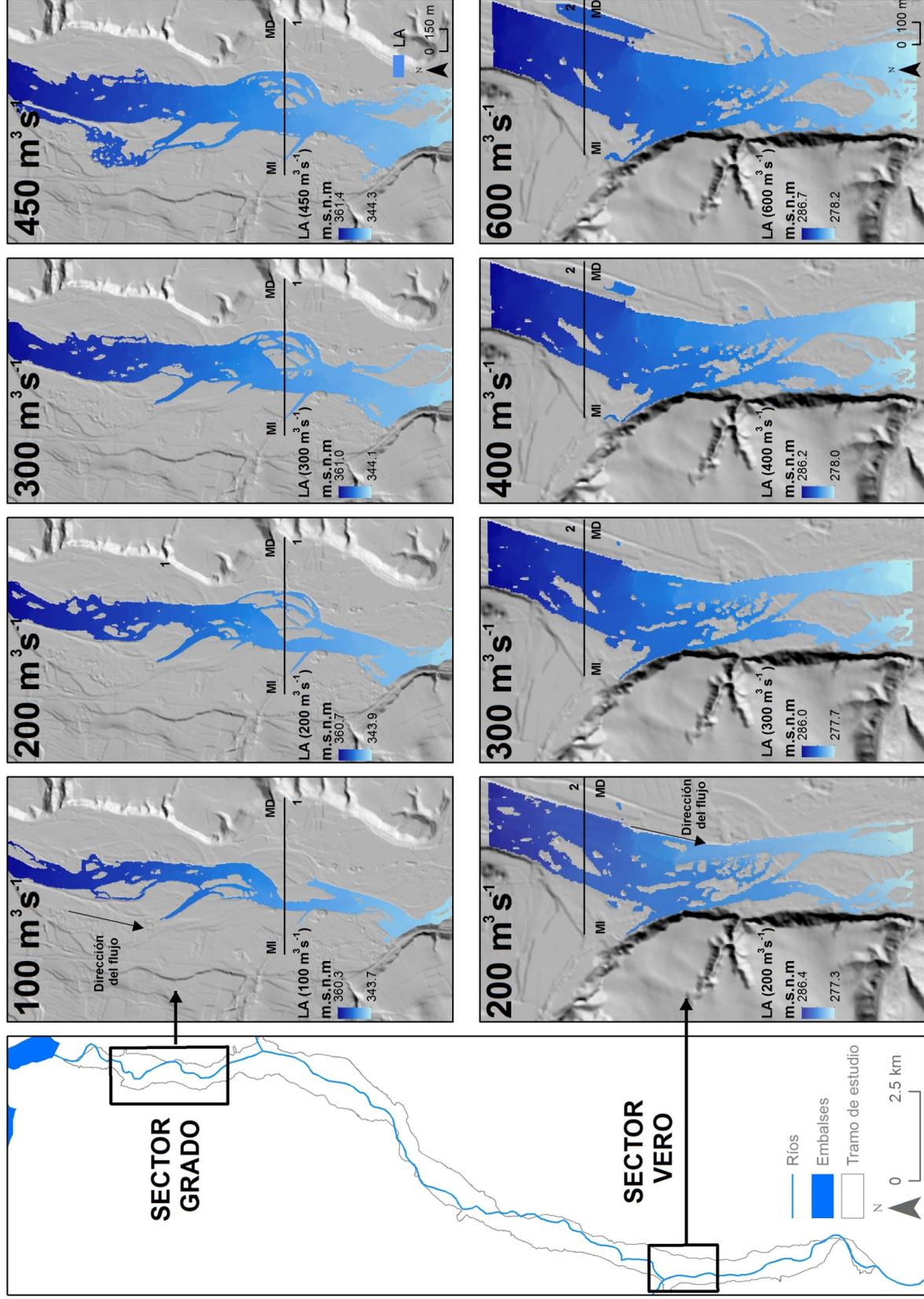
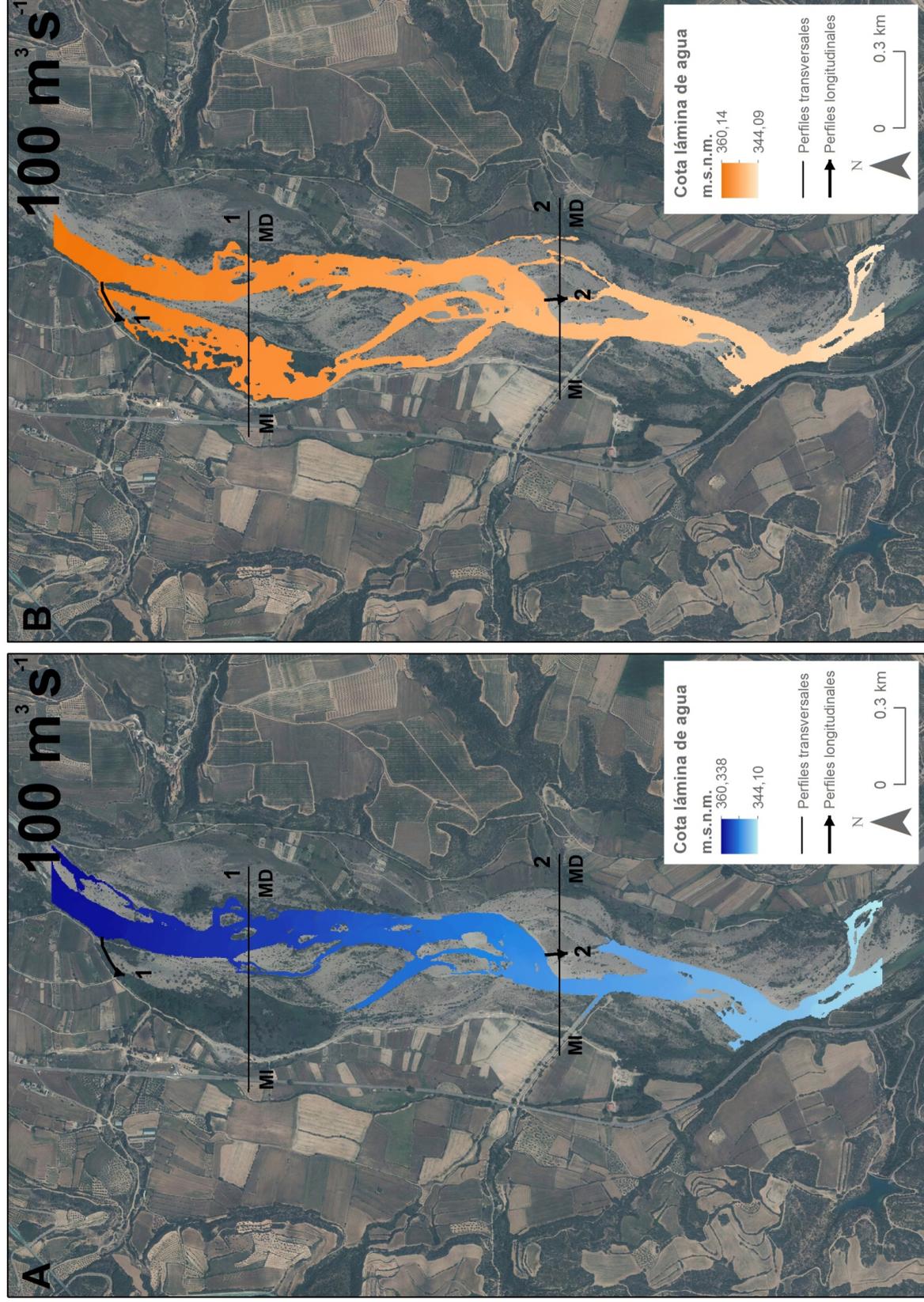


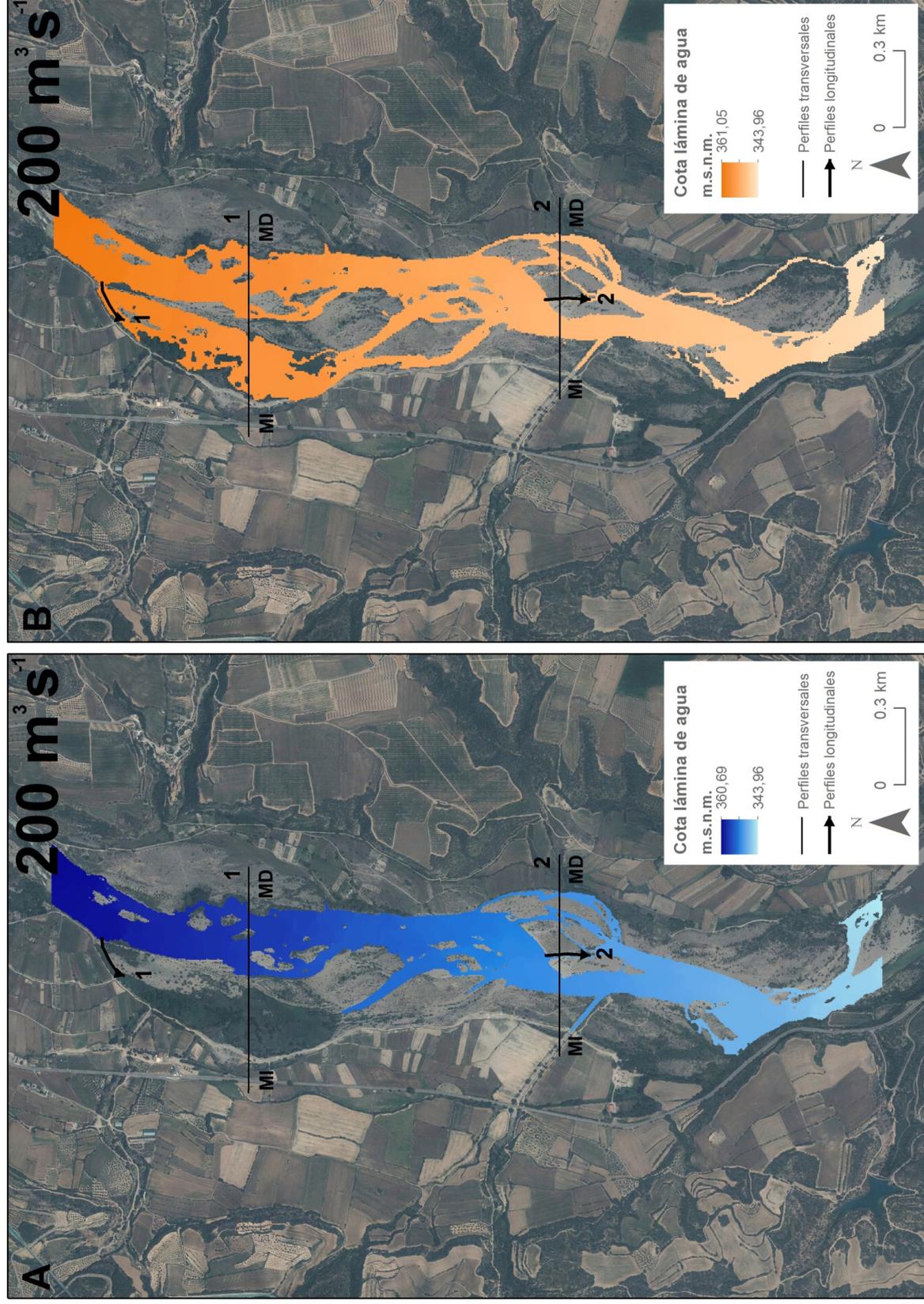
Figura A4. Cota de lámina de agua asociada a caudales de crecida representativos.



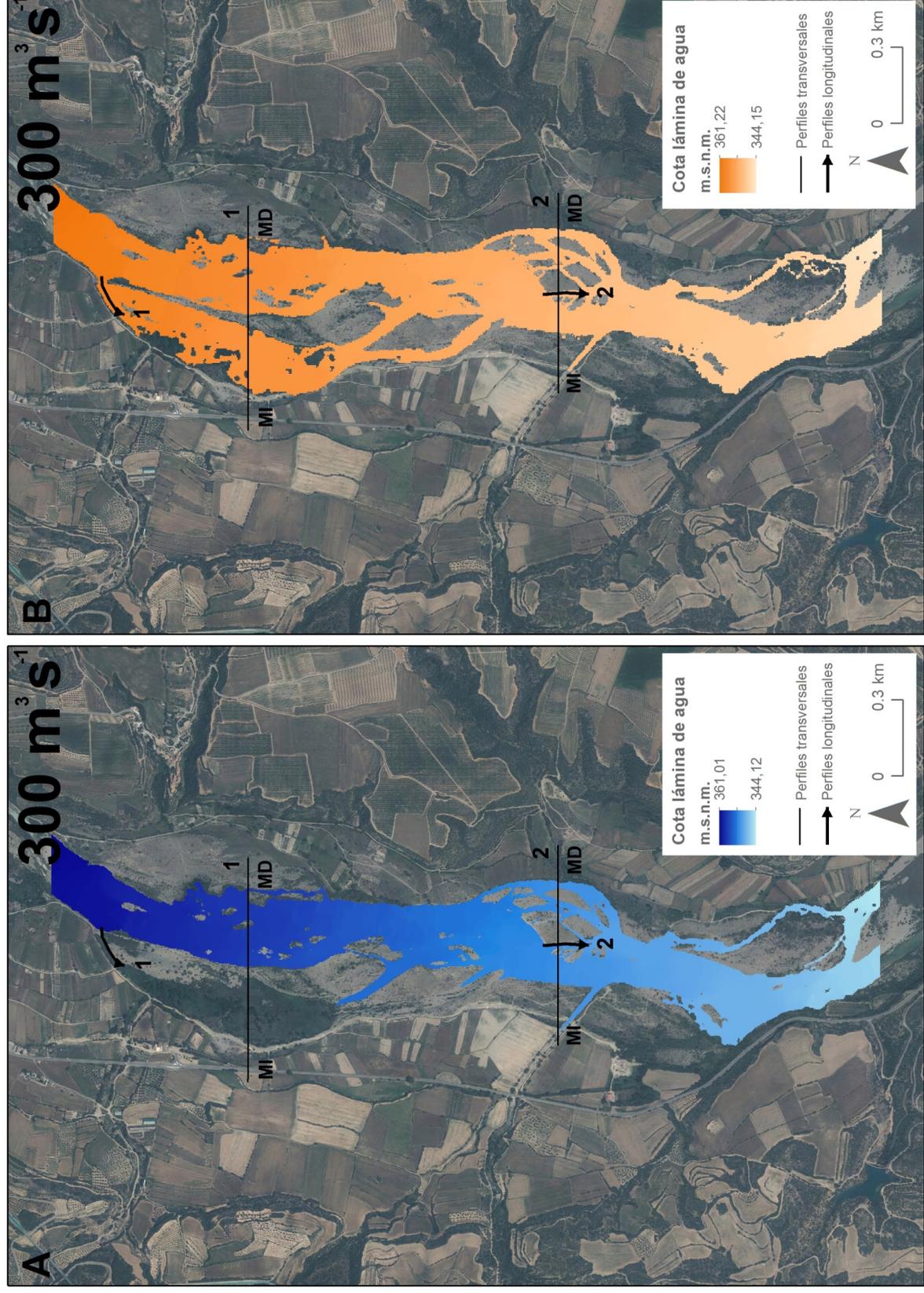
**Figura A5.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado.



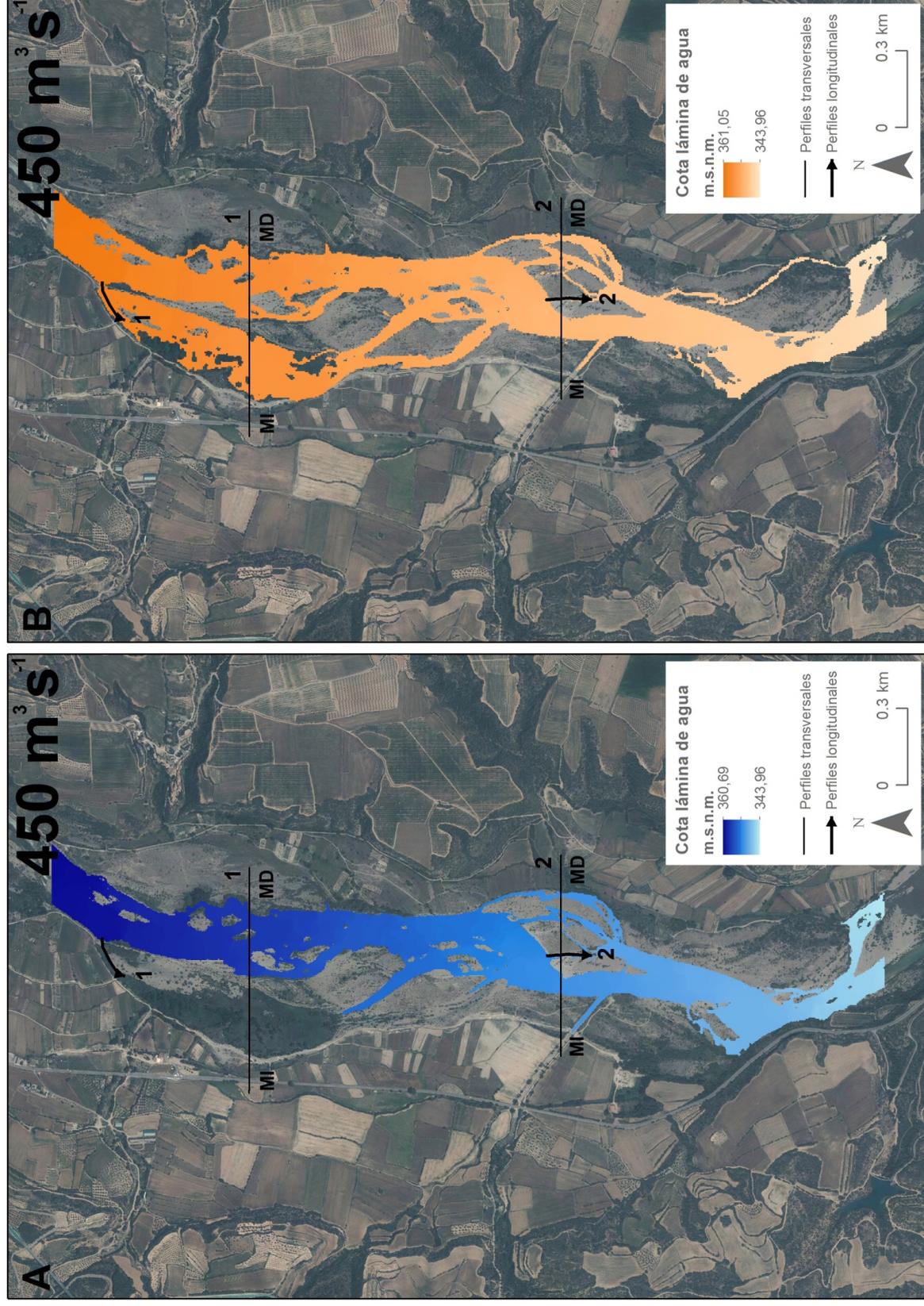
**Figura A6.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado.



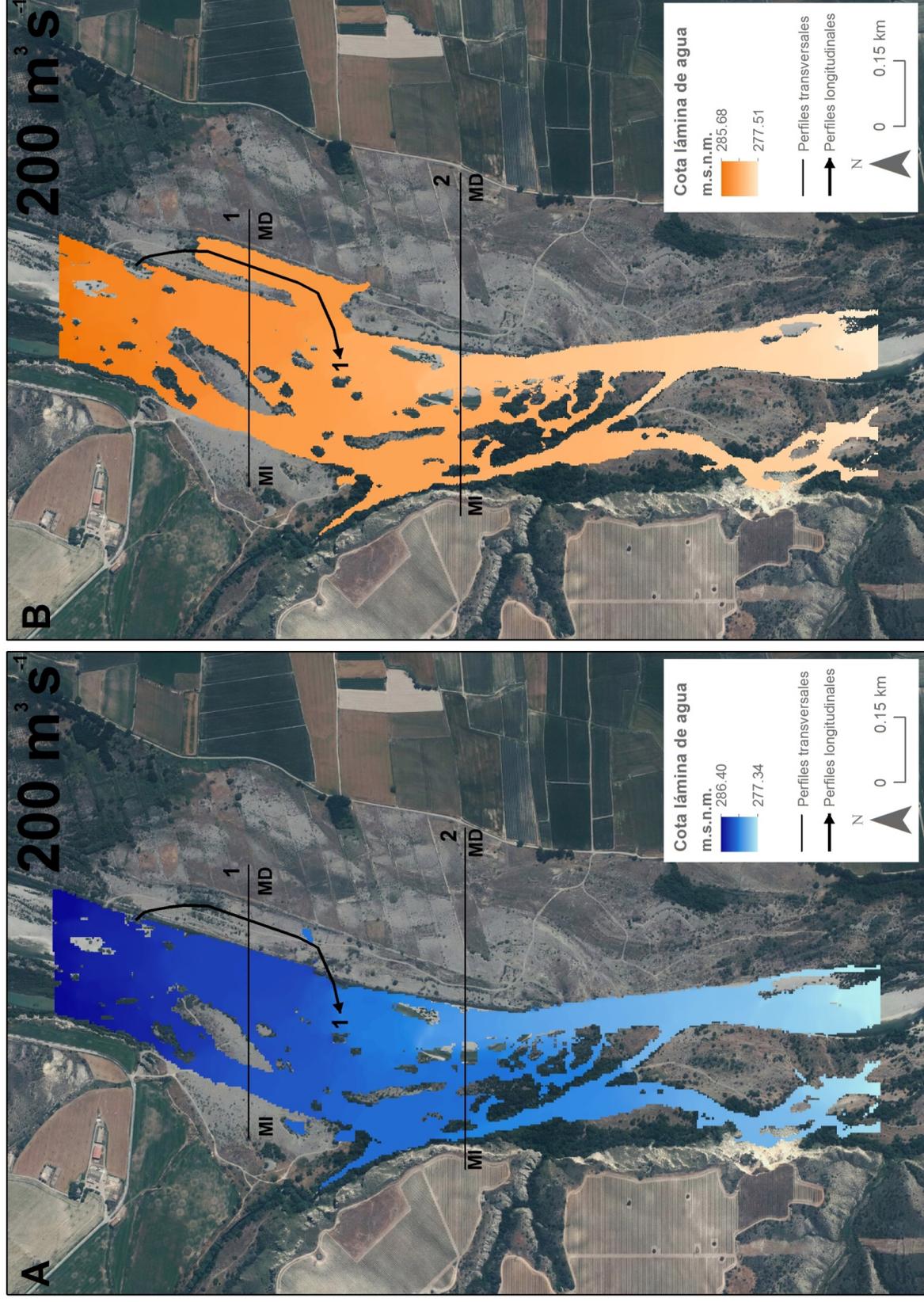
**Figura A7.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado.



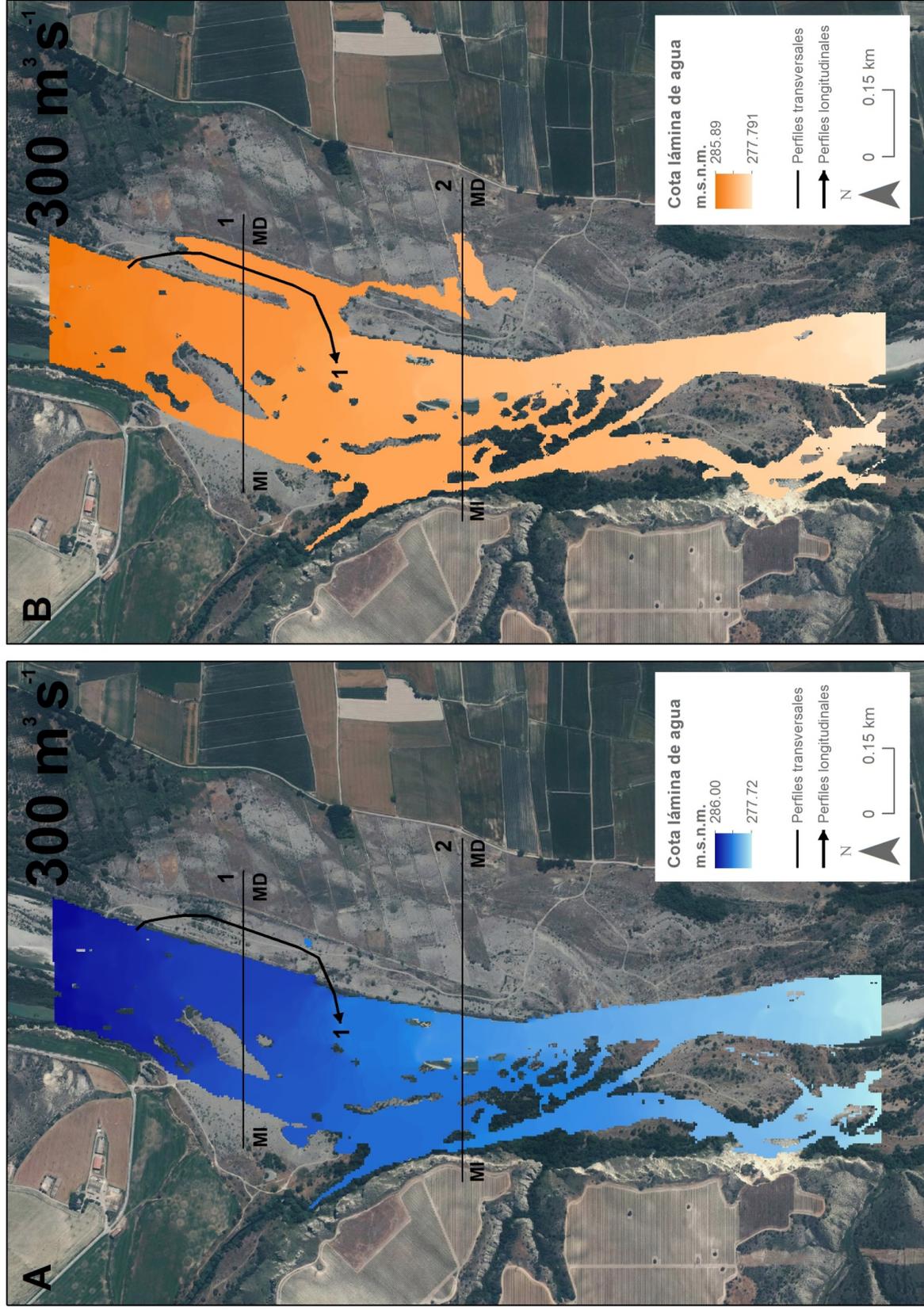
**Figura A8.** Cota de lámina de agua asociada a un caudal de  $450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), antes y (B), después de la modificación para la conexión de brazos secundarios en el sector Grado.



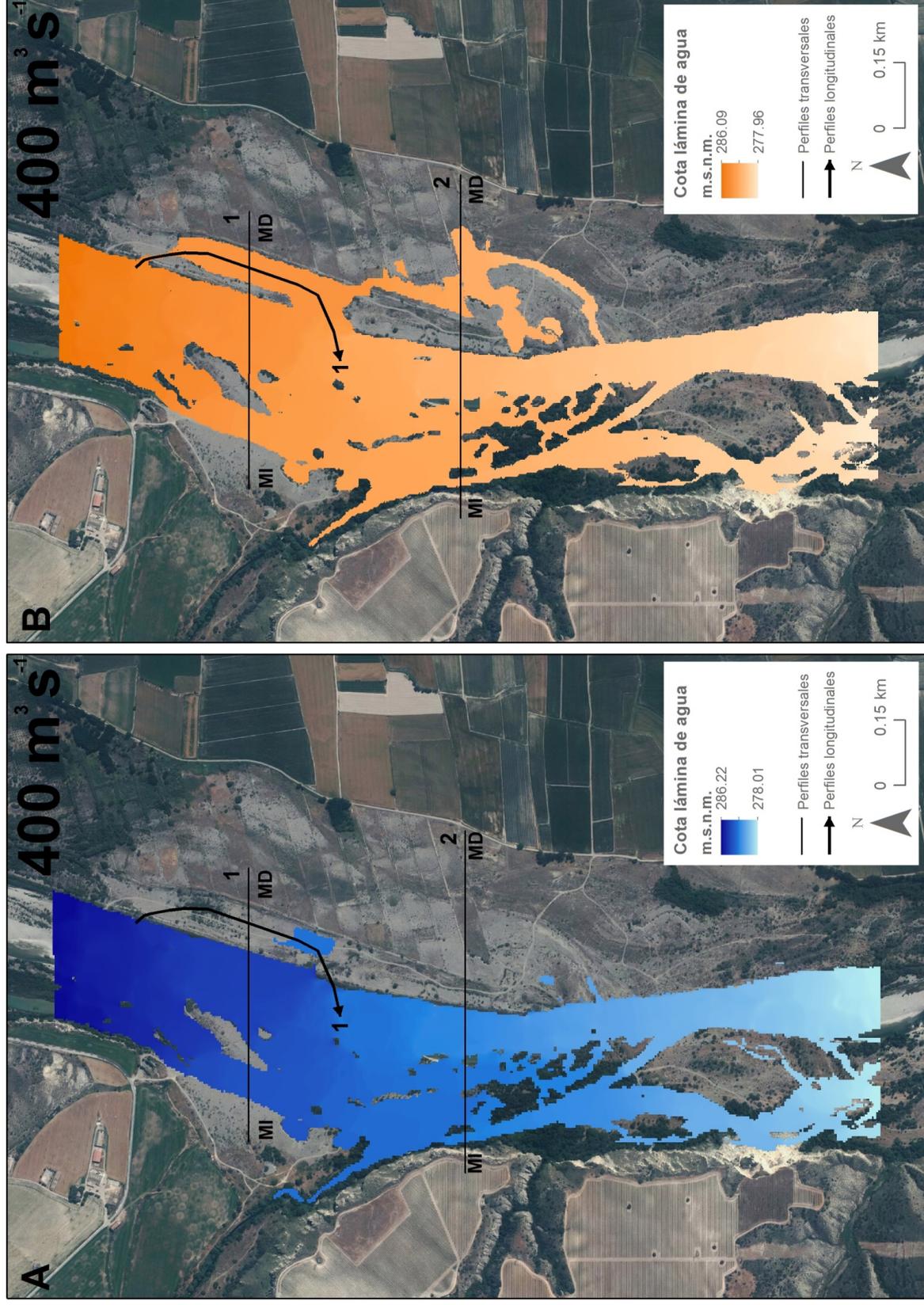
**Figura A9.** Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero.



**Figura A10.** Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero.



**Figura A11.** Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de  $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero.



**Figura A12.** Cota de la lámina de agua asociada a un caudal de  $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para condiciones (A), pre y (B), después de la ruptura de la mota para la conexión de brazos secundarios en el sector Vero.

