

## GEOMORFOLOGÍA Y RESTAURACIÓN FLUVIAL: SEGUIMIENTO DEL DERRIBO DE PRESAS EN GIPUZKOA

A. OLLERO<sup>1\*</sup>, A. IBISATE<sup>2</sup>, V. ACÍN<sup>3</sup>, D. BALLARÍN<sup>4</sup>, P. BESNE<sup>5</sup>, E. DÍAZ<sup>2</sup>,  
C. FERRER-BOIX<sup>5</sup>, D. GRANADO<sup>3</sup>, X. HERRERO<sup>2</sup>, J. HORACIO<sup>6</sup>,  
J.P. MARTÍN-VIDE<sup>7</sup>, A. MESANZA<sup>8</sup>, D. MORA<sup>4</sup>, I. SÁNCHEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

<sup>2</sup>Dpto. de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz.

<sup>3</sup>Ecoter S.C. Ecología y Territorio, Francisco Pradilla 15, 50007 Zaragoza.

<sup>4</sup>Mastergeo Medio Ambiente, Territorio y Geografía, S.L, Sagitario 8 casa 33, 50012 Zaragoza.

<sup>5</sup>Dpt. of Physical Geography, University of British Columbia, 1984 West Mall, Vancouver (Canadá).

<sup>6</sup>Dpto. de Geografía, Universidad de Santiago de Compostela, Pza. Universidad 1, 15782 Santiago de Compostela.

<sup>7</sup>Dpto. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona.

<sup>8</sup>Dpto. de Ingeniería Minera y Metalúrgica, Ciencia de los Materiales, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Campus de Álava, 01006 Vitoria-Gasteiz.

**RESUMEN.** *Se presenta la metodología diseñada para el seguimiento geomorfológico del derribo de azudes, así como los resultados obtenidos hasta el momento en dos casos concretos: las presas de Mendaraz (río Urumea) e Inturia (río Leizaran) en Gipuzkoa. Se han realizado secciones transversales, abundantes mediciones de procesos sobre testigos, análisis de los nuevos depósitos generados y muestreos granulométricos y morfométricos. En el caso de Mendaraz se han registrado rápidas movilizaciones de sedimentos e importantes cambios geomorfológicos aguas arriba y abajo del obstáculo. Este proceso de recuperación de la dinámica fluvial natural y de regularización del cauce fue favorecido y acelerado por la crecida extraordinaria de noviembre de 2011. Además de sus beneficios para el estado ecológico, se ha constatado que el derribo de presas es una medida eficaz para la restauración de la dinámica geomorfológica en cauces fluviales. El seguimiento geomorfológico es una labor fundamental para cuantificar y valorar la dinámica generada a raíz del derribo de la presa y toda su evolución posterior.*

### **Geomorphology and river restoration: dam removal monitoring in Gipuzkoa**

**ABSTRACT.** *A methodology for dam removal monitoring and the results of two case studies is presented: Mendaraz dam (Urumea River) and Inturia dam (Leizaran River), both located in Gipuzkoa. This monitoring is conducted by river*

*survey cross-sections, measurements of processes and granulometrical analysis. Fast sediment erosion and sedimentation together with geomorphological adjustments were detected after dam removal. In Mendaraz an extraordinary flood favored these processes. The recovery of fluvial dynamics shows benefits not only from the ecological point of view but also for the restoration of natural river dynamics. Geomorphological monitoring is a key tool to quantify and assess river evolution and dynamics after dam removal.*

**Palabras clave:** geomorfología fluvial, restauración fluvial, demolición de presas, río Urumea, río Leizaran.

**Key words:** fluvial geomorphology, river restoration, dam removal, Urumea River, Leizaran River.

Enviado el 13 de noviembre de 2013

Aceptado el 21 de enero de 2014

\*Correspondencia: Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. E-mail: aollero@unizar.es

## 1. Introducción

En las últimas décadas la demolición de azudes y presas obsoletas se ha puesto en práctica de forma creciente tanto en Norteamérica como en Europa. Es una actuación de restauración fluvial que devuelve continuidad longitudinal al sistema, renaturalizando procesos hidrogeomorfológicos y favoreciendo a las comunidades biológicas, en especial a la fauna migratoria. De hecho, muchos de los programas de demolición de presas se han planteado y financiado para favorecer la migración anual de los salmónidos.

En la Península Ibérica ha habido que esperar a la entrada del siglo XXI para el derribo de obstáculos transversales. No se está cuantificando sistemáticamente el número de casos, pero podría estimarse en varias decenas (García de Leániz, 2008), destacando algunas áreas con más derribos registrados, como Cantabria, Extremadura, Navarra o Gipuzkoa. Un caso reciente con abundante información es el de la presa de la Gotera en el curso alto del río Bernesga en León (Rodríguez *et al.*, 2011). Hay también abundantes proyectos y propuestas en espera (Alonso *et al.*, 2009).

Presas y azudes generan importantes impactos en el funcionamiento fluvial. Son destacables las afecciones a la ictiofauna, en muchos casos tratadas de minimizar mediante escalas de peces, de variadas tipologías y pocas veces efectivas (Sanz Ronda *et al.*, 2013). Pero el impacto más negativo, al actuar sobre los elementos base y clave del sistema fluvial, es el que se registra sobre el agua y los sedimentos. Así, las grandes presas con derivaciones de caudal generan graves afecciones hidrológicas y geomorfológicas en el sistema fluvial aguas abajo. Presas pequeñas en uso con derivaciones en forma de cortocircuito (minicentrales), también originan daños hidrológicos y geomorfológicos muy importantes en los tramos afectados (Ibisate *et al.*, 2013). En el caso de las pequeñas presas y azudes en desuso, en las que ya no hay

derivación hidrológica, los impactos son casi exclusivamente geomorfológicos, afectando a los procesos de erosión, transporte y sedimentación y a las morfologías del cauce (Doyle *et al.*, 2002).

Los azudes demolidos en la Península Ibérica pertenecen solo a este último tipo de presas, de pequeñas dimensiones, cuyo uso fue abandonado y cuya concesión ha caducado. Y dado que los daños que estaban generando en el sistema fluvial son principalmente geomorfológicos, los beneficios de su derribo también lo son, quedando plenamente justificado el interés por observar y medir los procesos geomorfológicos generados a raíz de la demolición y las nuevas morfologías construidas por el curso fluvial en su trabajo progresivo de adaptación a su nueva situación, una vez eliminado total o parcialmente el antiguo obstáculo.

El seguimiento geomorfológico del derribo de presas es, por tanto, una labor científico-técnica fundamental, imprescindible para evaluar la recuperación del funcionamiento fluvial tras la eliminación del obstáculo. No obstante, en pocos casos se ha procedido al seguimiento geomorfológico del proceso y de sus efectos (Kibler *et al.*, 2011). En España no hay antecedentes científicos, pero sí se ha experimentado en laboratorio (Ferrer-Boix y Martín-Vide, 2011). Como trabajos de referencia pueden destacarse los de Pizzuto (2002), Doyle *et al.* (2003a), Cheng y Granata (2007) y Pearson *et al.* (2011), mientras Grant (2001) y Hart *et al.* (2002) plantearon los efectos y viabilidad de estas actuaciones. Todos estos trabajos científicos explican procesos clave que se manifiestan tras eliminar un obstáculo transversal al cauce. Las hipótesis de partida de este estudio, a confirmar mediante el trabajo de seguimiento, son las siguientes:

1. La rapidez de respuesta del sistema geomorfológico fluvial: en las primeras horas y días los procesos son intensos y se moviliza y reordena buena parte del material atrapado tras la presa, especialmente, en primer lugar, el material fino que se había acumulado en el vaso. Esta intensa dinámica geomorfológica generada por la demolición se va reduciendo progresivamente conforme el sistema fluvial se auto-regula y va alcanzando un equilibrio entre caudales circulantes, sedimentos y pendiente.
2. La tendencia a la incisión del fondo del lecho y formación del *thalweg*, a la erosión remontante en el vaso del antiguo embalse, proceso muy rápido al principio, que se va ralentizando progresivamente y que puede prolongarse durante años en el tiempo hasta que el curso fluvial alcanza un nuevo equilibrio con su pendiente y perfil longitudinal (Ferrer-Boix, 2010).
3. La tendencia a formarse nuevos depósitos sedimentarios aguas abajo del obstáculo derruido, como almacenes temporales de sedimentos que irán siendo poco a poco movilizados hacia abajo, modificándose con rapidez la morfología de cada barra de sedimentos.
4. Una anárquica distribución de sedimentos nada más producirse el derribo, para con el tiempo ir progresivamente reorganizándose y reclasificándose los materiales.

5. El importantísimo papel geomórfico de las crecidas, que aceleran todos los procesos citados y recortan el tiempo que emplea el curso fluvial para reajustarse a su nueva situación.
6. Que la dinámica geomorfológica generada es positiva para el sistema fluvial en su funcionamiento natural, en su buen estado ecológico y en sus biocenosis, así como en la circulación libre de especies piscícolas.

En el presente estudio se exponen la metodología diseñada para el seguimiento geomorfológico del derribo de azudes y los resultados obtenidos hasta el momento en dos casos concretos: las presas de Mendaraz e Inturia en Gipuzkoa. Los objetivos concretos de estos trabajos de seguimiento han sido: i) diseñar y desarrollar un sistema de monitoreo geomorfológico con medida periódica de indicadores en campo, ii) interpretar y representar los resultados de dicho seguimiento, iii) evaluar las tendencias observadas pronosticando su evolución futura, iv) interactuar con los seguimientos ecológicos realizados en paralelo por otros equipos de trabajo y v) plantear medidas adicionales de restauración en los cursos fluviales estudiados.

## 2. Área de estudio

Los ríos guipuzcoanos cuentan con abundantes obstáculos transversales, fruto de tradicionales e intensos aprovechamientos del agua para usos industriales y energéticos, pero muchos de estos aprovechamientos fueron quedando abandonados. La Dirección General de Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa, con el objetivo de eliminar barreras para especies como trucha (*Salmo trutta*), piscarda (*Phoxinus phoxinus*), anguila (*Anguilla anguilla*) o salmón (*Salmo salar*), redactó entre 1998 y 2011 un total de 63 proyectos, habiéndose ejecutado hasta la actualidad 11 demoliciones totales, 9 parciales y 5 rampas para peces, además de otras actuaciones menores (Álvarez et al., 2011).

Para dos de estas actuaciones, el derribo de la presa de Mendaraz en el río Urumea y la demolición parcial de la presa de Inturia en el río Leitzarain, afluente del Oria, se ha realizado un seguimiento geomorfológico, concluido en el primer caso e iniciado en el segundo. Por tanto, el área de estudio corresponde a dos tramos fluviales concretos en los cursos medios de los ríos Urumea y Leitzarain, en la zona oriental de Gipuzkoa (Fig. 1).

### 2.1. Presa de Mendaraz

La presa de Mendaraz, de 3.5 m de altura, fue derribada en octubre de 2010 con financiación del proyecto BIDUR de Cooperación Transfronteriza (Interreg IV A) para la gestión de los ríos Bidasoa y Urumea. El azud se sitúa en el curso medio del río Urumea, de meandros encajados con alta sinuosidad. Se procedió correctamente, desde antes de la demolición, al seguimiento de parámetros biológicos (macroinvertebrados bentónicos) y físicos (Gaspar y Azpiroz, 2011). Pero el seguimiento hidrogeomorfológico no se propuso hasta 6 meses después del derribo, en la primavera de 2011, cuando ya se habían observado importantes cambios en el cauce, con rápida movilización de sedimentos aguas abajo y un proceso de erosión remontante aguas arriba del obstáculo eliminado (Ollero et al., 2012).

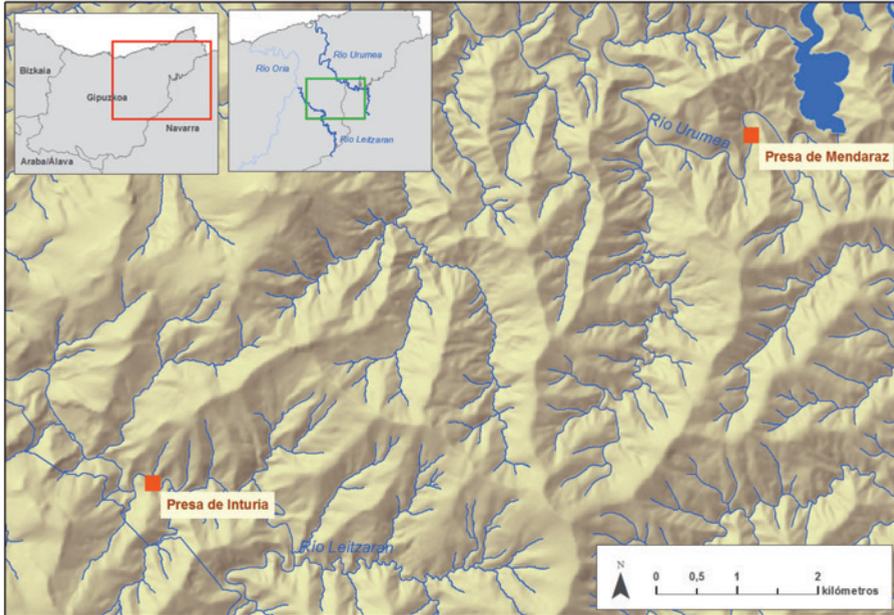


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

Mendaraz se localiza aguas abajo de la confluencia de su principal afluente, el río Añarbe, en cuyo curso se sitúan los embalses de Artikutza y Añarbe. La cuenca del Urumea tiene una superficie de 272.4 km<sup>2</sup>. El río nace en el puerto de Bianditz y alcanza una longitud de 57 km hasta su desembocadura en el mar Cantábrico en Donostia/San Sebastián. El tramo en el que se encuentra Mendaraz se integra en el macizo paleozoico de Cinco Villas/Bortzirriak, en el extremo occidental del eje axial del Pirineo. El río se encaja profundamente en esquistos y grauwacas, con laderas de fuerte pendiente y elevado aporte de material sólido, bien conectadas con el cauce. En la estación de aforo de Ereñozu, situada aguas abajo de Mendaraz, el caudal medio es de 10.53 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> con un alto caudal específico (48.3 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) y un coeficiente de escorrenría de 0.63. Se trata de un río muy regular donde los eventos de crecida también tienen su relevancia, debido a la alta pluviosidad, fuertes pendientes y encajamiento en cabecera (Ollero y Ormaetxea, 1996). La pendiente media del cauce en el tramo de estudio es relativamente baja, 0.0051 m/m<sup>-1</sup>, debido a la elevada sinuosidad del cauce, lo que facilita la acumulación de barras de gravas. La potencia específica con caudal medio asciende a 18.47 W m<sup>-2</sup>.

## 2.2. Presa de Inturia

La presa de Inturia, de 12.5 m de altura y 60 m de longitud de coronación, se construyó en 1913 con el fin de regular el caudal para otra presa de derivación 1 km aguas abajo, la de la central eléctrica de Bertxin. Teniendo en cuenta sus dimensiones, su derri-

bo está programado en 4 fases, habiéndose realizado ya la primera de ellas, en agosto de 2013, desmantelándose los 3 m superiores. El derribo es financiado por el proyecto europeo EFA221/11-GURATRANS sobre gestión integral y participativa de los ríos transfronterizos del extremo occidental de los Pirineos.

El río Leitzaran nace en el valle navarro de Leitza y alcanza 42 km de longitud y una superficie de cuenca de 124 km<sup>2</sup>. En su recorrido dominan los meandros encajados en las pizarras y areniscas paleozoicas del macizo de Cinco Villas/Bortziriak. La presa de Inturia se localiza en su curso medio-bajo, a 9 km de su desembocadura en el río Oria. Próxima a dicha desembocadura, la estación de aforos de Andoain registra datos desde 2004, con un caudal medio de 4.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, un caudal específico de 41 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> y un coeficiente de escurrentía de 0.61. El cauce del río Leitzaran en la zona de estudio es muy encajado, con una buena conexión con las vertientes y coincidiendo la orilla con la propia ladera en la mayor parte del tramo. El lecho presenta morfologías de rampa (*plane bed* o rápido continuo) y secuencias de rápidos y remansos. En la carga de fondo predomina el material de tamaño bloque, salvo en la zona retenida por la presa, donde se han acumulado arenas en la cola del embalse y limos en el resto del vaso. La conexión con las vertientes es directa en todo el tramo. La pendiente media del cauce en el tramo de estudio es de 0.0086 m m<sup>-1</sup> y la potencia específica con caudal medio asciende a 19.68 W m<sup>-2</sup>.

### 3. Metodología

En ambos casos de estudio los métodos de seguimiento y las técnicas concretas se han basado en la observación y muestreo de indicadores geomorfológicos (Ollero *et al.*, 2011; Ollero 2011b). Las condiciones locales de los cauces objeto de seguimiento han implicado que las metodologías no hayan sido idénticas, sino que han presentado algunas variaciones.

#### 3.1. Presa de Mendaraz

El seguimiento de la dinámica geomorfológica se ha realizado sobre un tramo de 1.2 km de cauce (Fig. 2), desde 750 m aguas arriba de la presa de Mendaraz hasta 450 m aguas abajo, en el que se habían observado síntomas de efectos del derribo. Se han seleccionado los siguientes indicadores: secciones transversales, perfil longitudinal, dinámica lateral y vertical en orillas, granulometría de sedimentos, movilidad de barras sedimentarias, transporte de sedimentos y morfologías de fondo de lecho. Estos indicadores se han medido en cuatro campañas de campo: mayo (M1), agosto (M2) y noviembre de 2011 (M3) y mayo de 2012 (M4). La interpretación de los datos obtenidos, la valoración de los mismos y la definición de tendencias han incluido tratamiento estadístico, gráfico y cartográfico.

En cada campaña de campo se han realizado 12 secciones transversales (Fig. 2), todas ubicadas en puntos fijos con el fin de poder comparar los perfiles de diferentes fechas. De ellas, 6 secciones se han realizado exactamente sobre los mismos puntos que las realizadas con anterioridad al derribo del azud para el muestreo biológico (Gaspar y Azpiroz, 2011). Las mediciones se han realizado de forma sistemática con nivel óptico

en intervalos de un metro de distancia medidos con cinta, estimándose un error de medida de 2 cm en la vertical. En casos de lecho irregular y de elementos más puntuales, como escarpes de orillas, bloques de fondo u otros, las mediciones se han realizado a una menor distancia para recoger la variabilidad de la sección transversal. Paralelamente a la realización de estos perfiles se registraba información sistemática sobre la composición del sustrato del lecho, en su mayor parte aluvial, también con el objetivo de poder observar cambios a lo largo del tiempo.



Figura 2. Localización del área de estudio en el río Urumea desde 750 m aguas arriba del azud de Mendaraz hasta 450 m aguas abajo. Se localizan las secciones transversales realizadas y las barras sedimentarias muestreadas.

La dinámica geomorfológica en los cuatro momentos de muestreo se ha medido también a partir de testigos fijos colocados al inicio del primer muestreo. Así, se instalaron clavos en zonas especialmente dinámicas de las orillas ubicadas en el antiguo vaso del azud con el fin de cuantificar la velocidad de retroceso de las mismas. Para ello se tomaron puntos fijos, como árboles alejados de las orillas, y con referencia a los mismos se colocaron los clavos. También se marcaron y numeraron casi 200 árboles cercanos a las orillas, realizándose un seguimiento de estos ejemplares, registrando las caídas de los mismos y midiendo la distancia y desnivel del cauce a partir de algunos de ellos. En cada

muestreo se han realizado numerosas fotografías, tanto en las zonas de las 12 secciones transversales como en las barras y áreas especialmente dinámicas. Con ellas se han llevado a cabo comparativas temporales.

La granulometría de sedimentos se ha realizado en las cuatro campañas de muestreo y en cuatro barras deposicionales. En cada campaña se ha llevado a cabo: i) muestreo superficial longitudinal por conteo de 100 elementos (repartidos en 2 ó 3 líneas a lo largo de cada barra, de aguas arriba a aguas abajo), tomando un elemento cada metro y midiendo su eje b; ii) muestreo superficial de la coraza, delimitando y pintando un cuadro de 30 cm de lado, donde se han contabilizado todas las muestras pintadas con medición de su eje b y peso; iii) muestreo subsuperficial, una vez medida y extraída la coraza del cuadrado delimitado, tomando una muestra de material de entre 3 y 8 kg, después tratada en laboratorio mediante método volumétrico, calculando los porcentajes en peso de cada clase granulométrica.

Se ha realizado también un análisis del inicio de movimiento y de transporte de sedimentos en cuatro puntos del cauce, empleando datos de los muestreos M2 y M4 y con ayuda del software libre WinXSPRO (Hardy *et al.*, 2005).

La cartografía geomorfológica en varias fechas, con el objetivo de valorar e interpretar visual y cuantitativamente los cambios originados, se ha apoyado en bases de SIG siguiendo las metodologías de Uribe Larrea (2008) e Ibisate *et al.* (2012) y ha resultado muy útil para el análisis de los procesos y para el establecimiento de tendencias y posibles comportamientos derivados. El resultado visual es una cartografía diacrónica que compara las formas y procesos geolocalizados en varios momentos temporales, coincidentes con las campañas de muestreo.

### 3.2. Presa de Inturia

La experiencia en el seguimiento geomorfológico que se llevó a cabo tras la demolición del azud de Mendaraz fue muy útil para poder abordar el de Inturia, que requiere una metodología más compleja. El tramo de trabajo en el río Leitzaran alcanza 3 km (2 km aguas arriba de la presa, ya que la zona embalsada alcanzaba 1.5 km, y 1 km aguas abajo hasta la siguiente presa de Bertxin) y cuenta con sectores de difícil acceso (Fig. 3). El cauce se encuentra muy encajado y las orillas presentan dificultades para la instalación de testigos, la pendiente es mayor que en Mendaraz, son más escasos los sedimentos de tamaño medio (gravas) y más abundantes los bloques y los finos, así como tramos con lecho rocoso. El tamaño de sedimento implica morfologías de depósitos menos nítidas y mayores dificultades para trabajar y para aplicar modelos. Las condiciones de pendiente y caudal han generado dificultades en las mediciones.

En este caso sí ha podido realizarse una campaña de muestreo previa (I0, julio de 2013) a la primera fase del derribo (agosto de 2013), planteándose tres muestreos más (I1 realizándose en noviembre de 2013, I2 previsto para marzo de 2014, I3 previsto para junio de 2014) antes de la segunda fase de derribo (agosto de 2014) y un quinto muestreo (I4) en septiembre de 2014.

Otra diferencia metodológica respecto de Mendaraz, derivada de la preocupación por las minicentrales en uso de Bertxin y Olaberri aguas abajo, es la prolongación del seguimiento de los procesos geomorfológicos aguas abajo hasta la confluencia con el río Oria, planteada en los muestreos I0 y I4.

Los indicadores seleccionados como objeto de seguimiento en Inturia son los procesos geomorfológicos (durante la demolición y después de ella aguas arriba y abajo), las secciones transversales, el perfil longitudinal, la dinámica lateral y vertical en orillas, la granulometría de sedimentos, la morfología y movilidad de las barras sedimentarias (localizadas en la Fig. 3), el transporte de sedimentos y las morfologías de fondo de lecho. En general, la metodología es muy similar a la de Mendaraz pero se ha innovado en varias técnicas concretas.

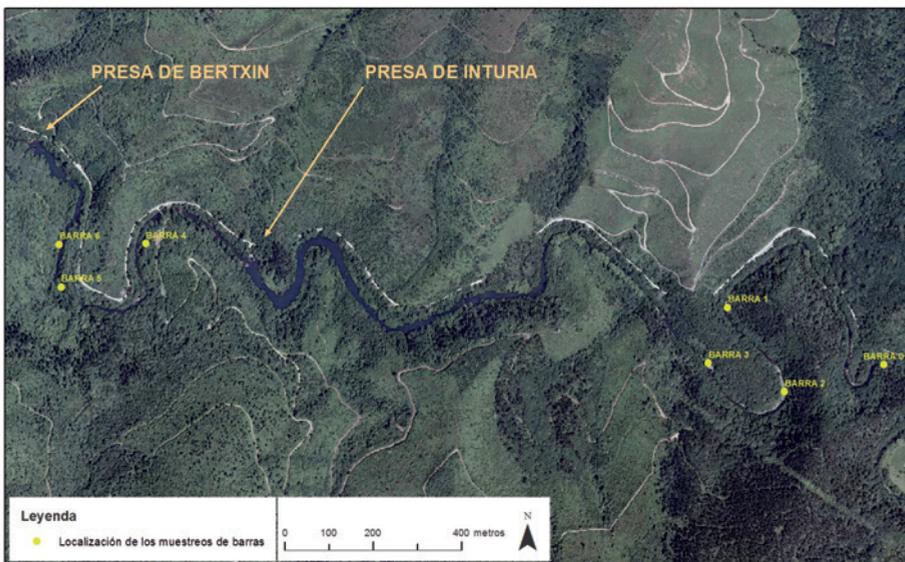


Figura 3. Localización del área de estudio en el río Leitzarán desde 2 km aguas arriba de la presa de Inturia hasta el azud de Bertxin aguas abajo y localización de las barras muestreadas.

No siendo viable la medición a tiempo real del transporte de sedimentos, se ha optado por el empleo de modelos matemáticos basados en las experiencias de Ferrer-Boix (2010) y en las ecuaciones de Parker (1990) y Wong y Parker (2006). Para la aplicación de estos modelos se está midiendo en campo la evolución del lecho entre las diferentes campañas de muestreo, cuantificándose a partir del derribo el volumen de material erosionado en el vaso aguas arriba de la presa y el volumen sedimentado aguas abajo. Estos datos se van obteniendo de las secciones realizadas, como se hiciera en Mendaraz, pero en este caso se han clavado en el *thalweg* creado en el vaso del embalse barras graduadas de hierro de 2 m de longitud.

Para el reconocimiento y análisis de las morfologías y dinámica del fondo del lecho en Inturia se están empleando técnicas novedosas respecto del seguimiento de Mendaraz. En este caso se ha contado con un vuelo LIDAR (*Light Imaging Detection and Ranging*) que ha aportado fotografías aéreas y un MDT. Sin embargo, debido a la forma del valle y al crecimiento de la vegetación densa en las orillas y laderas, el GPS no ha proporcionado una información muy precisa y está siendo necesaria la realización de croquis y la obtención de abundantes fotografías directas para identificar las unidades y microtopografías no apreciables en fotografía aérea ni LIDAR: zonas de flujo dominante, canales de crecida, zonas de erosión, deslizamientos y nuevos depósitos. Además, como apoyo al seguimiento, se ha contado con batimetrías de los embalses de Inturia, Bertxin y Olaberri, realizadas en 2012 por la Diputación Foral de Gipuzkoa y adecuadamente encajadas en la topografía LIDAR disponible, así como una topografía de detalle del tramo fluvial existente en la presa de Inturia y la cola del embalse de Bertxin.

Otra novedad es el empleo de una técnica de registro tridimensional para la valoración tanto de los cambios topográficos como de los sedimentos y su granulometría, tanto en lámina de agua como en las superficies emergidas, en concreto mediante el uso del escáner láser ScanStation C10 de Leica, siguiendo metodologías definidas por Barber *et al.* (2003), Lerma y Biosca (2008), Hodge *et al.* (2009) o Revuelto *et al.* (2013).

Otra técnica no empleada en Mendaraz pero sí incorporada al seguimiento de Inturia es el empleo del durómetro portátil Equotip 3 para la medición de la dureza del sedimento superficial de barras y depósitos (Kawasaki *et al.*, 2002, Kawasaki y Kaneko, 2004, Aoki y Matsukura, 2008, Pérez-Alberti *et al.*, 2013). La hipótesis de partida presupone que el rebote por dureza en sedimentos con baja dinámica fluvial es diferente a aquéllos sometidos de forma periódica a procesos de erosión y transporte. El método se ha basado en comparar el rebote por dureza del sedimento de varias barras antes del derribo (río con dinámica mermada) y después del derribo (río con dinámica activa). Se han realizado una media de 250 medidas de dureza por barra, procediéndose al tratamiento estadístico de los resultados.

## 4. Resultados

### 4.1. Mendaraz

Los cambios fueron mínimos entre mayo (M1) y agosto de 2011 (M2), en un periodo de caudales medios y bajos. El 6 de noviembre de 2011 se registró una crecida extraordinaria en el río Urumea, alcanzándose un caudal punta de  $423 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en el aforo de Ereñozu ( $218.42 \text{ km}^2$  de cuenca vertiente), ubicado 10 km aguas abajo del área de estudio. Este caudal, cuyo periodo de retorno se sitúa alrededor de los 100 años, multiplica por 40 el caudal medio. Diez días después de la crecida se llevó a cabo el tercer muestreo de seguimiento (M3), detectándose cambios geomorfológicos muy notables.

Entre la primera visita (M1) y la segunda (M2), sin circulación de caudales geomórficos, apenas se observaron leves modificaciones aguas arriba de la presa, aún menos apreciables en los perfiles más alejados del azud. Sin embargo, aguas abajo se observó una tendencia a la acreción de las barras, solo de carácter centimétrico, oscilando entre acreciones de 2-3 cm hasta puntos donde se cuantificaron poco más de 10 cm de diferencia con medidas anteriores. También se constató una leve incisión en el cauce principal de unos 10 cm, más apreciable sobre todo en las secciones 11 y 12, en las que la concentración del flujo generó incisiones de pocas decenas de cm.

Tras el episodio de crecida, las mediciones de la tercera campaña (M3) revelaron cambios significativos en el cauce. En las secciones aguas arriba más alejadas del antiguo azud se mantuvo en general una morfología con pocas variaciones en la profundidad del cauce, si bien se apreció tendencia hacia el ensanchamiento del mismo por erosión de las orillas, predominantemente compuestas de materiales finos depositados en el vaso del antiguo azud. El perfil transversal se ensanchó pero sigue siendo homogéneo en su morfología.

En cuanto al perfil longitudinal, la erosión remontante fue avanzando desde el derribo del azud, alcanzando en la campaña M3 una distancia de 560 m desde la presa, ubicándose el punto de ruptura entre las secciones 4 y 5.

Inmediatamente aguas arriba del antiguo azud se constataron cambios más drásticos, con la deposición de barras centrales que dividen la corriente y retroceso de taludes que iban desde pocos centímetros hasta más de 2 m (observados con la ayuda de los testigos fijos en las orillas y a partir del arrastre o desaparición de árboles marcados).

Pero es aguas abajo del antiguo azud donde los cambios han sido más importantes. Se han observado nuevas morfologías de cauce, movilización de las barras, formación de nuevos depósitos, cambios en la forma en planta y en la posición del *thalweg*. Así, la barra 3 ha sido erosionada y la barra 4, aguas abajo, ha crecido en superficie. A todo ello se suman nuevas incisiones allí donde la corriente ha acabado concentrada de forma más clara.

El ejemplo de la sección 12, ubicada al final de la barra 4 (Fig. 4), muestra cómo el *thalweg* se ha desplazado más de 10 m hacia la margen derecha, generando un profundo y estrecho cauce donde antes había depósitos de gravas. Paralelamente el río ha sido capaz de movilizar y redistribuir gran cantidad de materiales que, en el caso de esta sección, ha supuesto una reducción de las antiguas barras de la margen izquierda de unos 80 cm, a la vez que se ha generado un nuevo depósito de unos 70 cm donde anteriormente circulaba el flujo.

Los resultados del análisis granulométrico manifiestan en el tiempo una leve disminución del tamaño del material superficial, así como un ligero aumento del tamaño del subsuperficial entre la primera y la última campaña de campo. No obstante, las clases de mayor tamaño (cantos, >64 mm) del material subsuperficial se reducen considerablemente en todas las barras en la última campaña de campo.

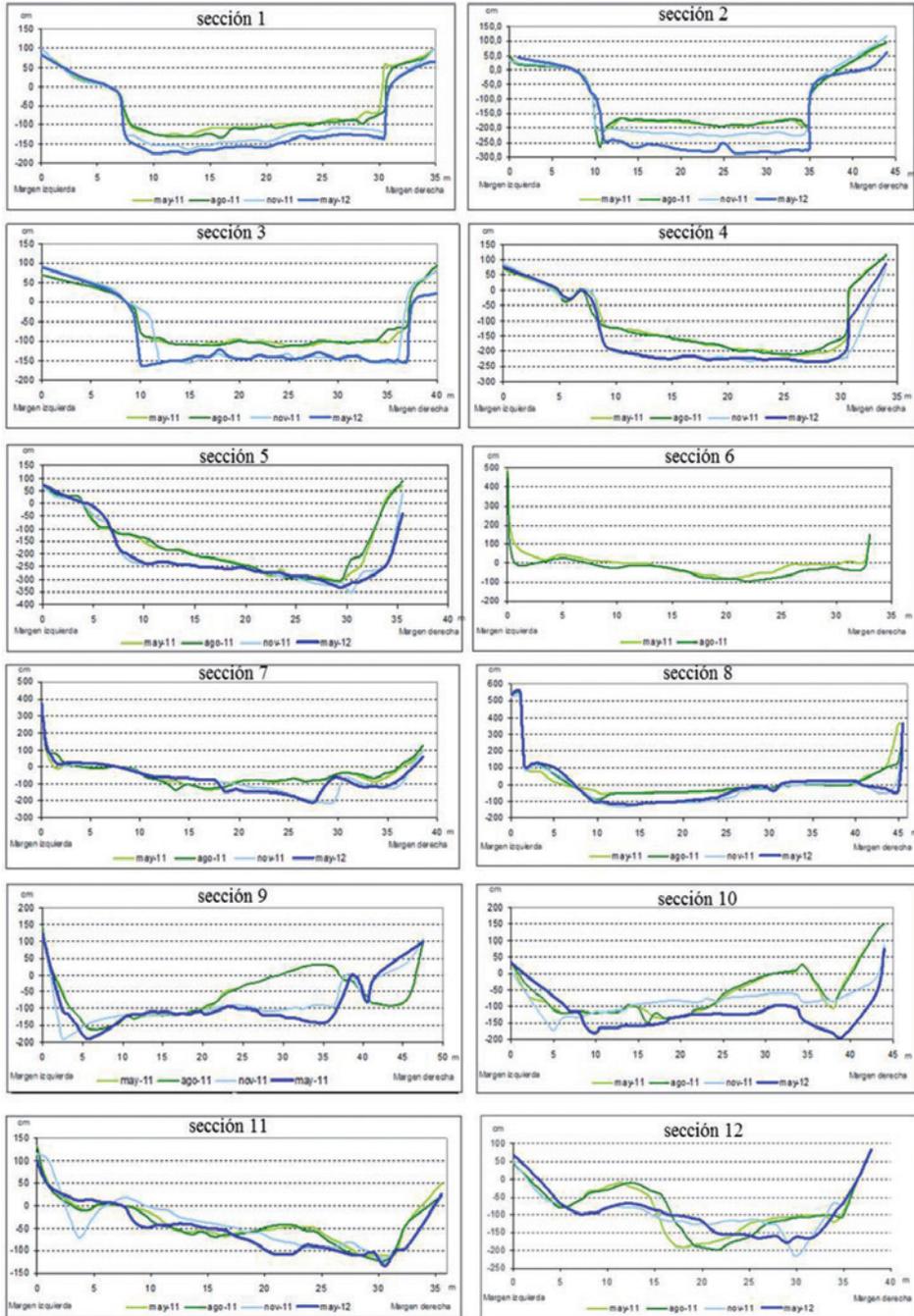


Figura 4. Secciones transversales realizadas en el seguimiento de Mendaraz (en la sección 6 no se pudieron realizar medidas en los muestreos M3 y M4).

Los cambios detectados en el análisis de detalle de las barras (Fig. 5) han sido relevantes, resultando las barras más dinámicas la 2 y la 3. En la barra 2, situada aguas arriba del azud, los resultados han sido heterogéneos. El  $D_{50}$  del material superficial longitudinal se redujo de 57.62 mm en el M1 a 44 mm en el M3. Sin embargo, el tamaño de la coraza aumentó de 31.19 mm en M1 a 34.14 mm en el M3, mientras que el subsuperficial bajo coraza también se incrementó, de 24.70 mm en M1 a 36.85 mm en el M3.

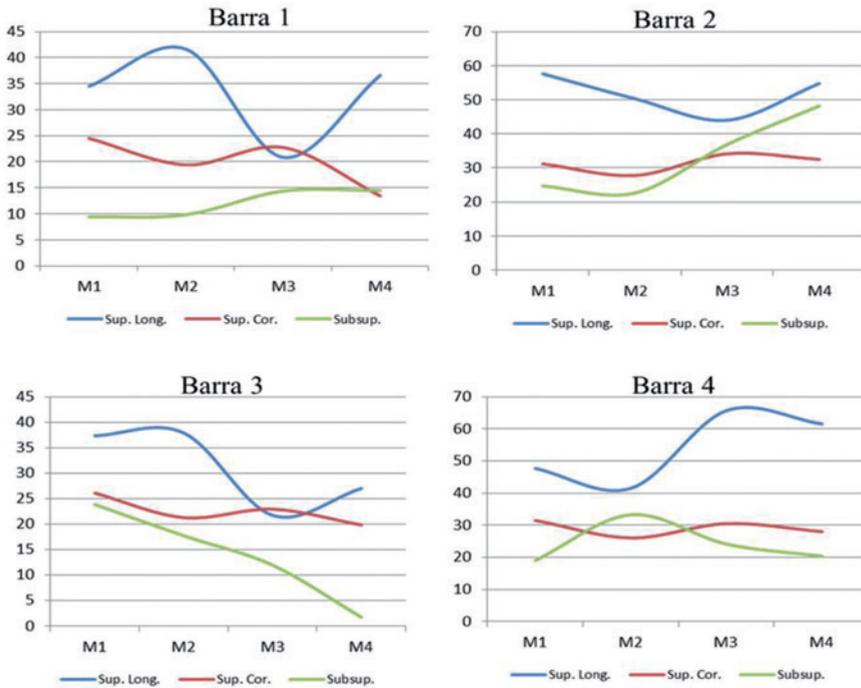


Figura 5. Cambios registrados en los 4 momentos de muestreo en Mendaraz (M1 a M4) en el tamaño medio (en mm) superficial (longitudinal y de la coraza) y subsuperficial de las barras de sedimentos.

En la barra 3, localizada aguas abajo del obstáculo retirado, se redujo el  $D_{50}$  en los tres muestreos entre las campañas M1 y M3. En el superficial longitudinal y el subsuperficial bajo coraza se produjo una drástica disminución, mientras que en el superficial-coraza se redujo levemente. El progresivo avance aguas abajo del material retenido por la presa explica estos cambios.

La distribución de clases granulométricas se vio también modificada a raíz de la crecida del 6 de noviembre de 2011. En el material subsuperficial se observa una disminución del porcentaje de cantos en todas las barras, desapareciendo esta clase en las barras 2 y 3 durante la última campaña. En el material superficial destaca la similitud de la distribución entre las barras 2 y 3, en las que predomina la grava (20 a 64 mm) con

más del 70% de las muestras y un tamaño medio próximo a los 30 mm, y las barras 1 y 4, en las que los cantos de más de 64 mm representan más del 50% de la distribución.

El incremento de la pendiente entre M2 y M4 que se ha producido aguas arriba del antiguo azud (barras 1 y 2) ha conllevado una mayor competencia en la movilidad de sedimentos, así como una reducción del caudal capaz de mover las partículas. Este cambio ha sido especialmente intenso en la barra 2, inmediatamente aguas arriba del azud, donde la tensión crítica se ha incrementado notablemente (de  $0.1017 \text{ nw m}^{-2}$  a  $0.2754 \text{ nw m}^{-2}$ ) y el caudal crítico se ha reducido considerablemente (de  $131.69 \text{ nw m}^{-2}$  a  $46.36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Inmediatamente aguas abajo del azud, en la barra 3, la disminución de la pendiente principalmente ha conllevado la reducción de la tensión crítica y el aumento del caudal capaz de movilizar los sedimentos.

Los escarpes monitorizados se han mostrado activos tanto con crecidas como sin ellas. No están estabilizados, sino que el proceso de retroceso de los mismos es constante. En muchos tramos presentan más de 4 m de desnivel y están próximos a la verticalidad. Se han registrado abundantes descalzamientos, caída de árboles (al menos una veintena durante la crecida de noviembre de 2011) y retrocesos de margen de 4 y 5 metros en algunos sectores.

En resumen, la renaturalización del cauce del río Urumea tras el derribo de la presa de Mendaraz se ha manifestado en cambios notables, destacando los procesos de erosión remontante, una intensa dinámica lateral y vertical, un ligero incremento de la sinuosidad y un aumento de la extensión de las barras sedimentarias afloradas. Con todo ello se han diversificando los hábitats. Aguas abajo de la presa, donde la dinámica se mantiene activa y quedan sedimentos sin movilizar, le queda al río un importante trabajo geomorfológico, observándose líneas de flujo que muestran la tendencia a la formación de una isla central. La Fig. 6 muestra los principales cambios registrados.

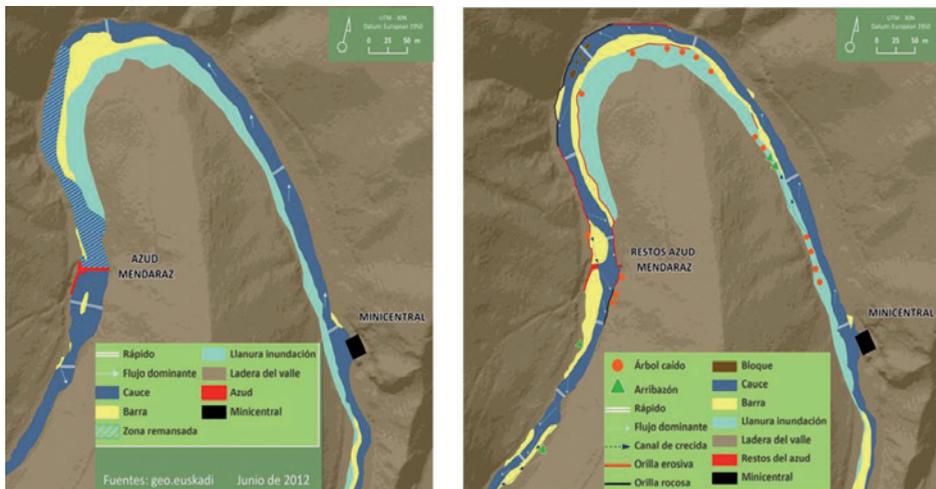


Figura 6. Mapa geomorfológico en Mendaraz antes y después de la demolición.

#### 4.2. Primeros resultados en Inturia

Los resultados del seguimiento en la presa de Inturia son parciales e incompletos, ya que en el momento de redacción del presente artículo solo se había llevado a cabo el muestreo I0 (en julio de 2013), previo al derribo de los tres metros superiores de la presa. Por tanto, se presenta a continuación tan solo una caracterización del cauce del río Leitzarán.

Se realizaron una treintena de secciones transversales, con anchuras de cauce entre 20 y 36 m. Con las realizadas en muestreos posteriores se podrá evaluar la evolución del cauce y la movilización de sedimentos.

La pendiente media del cauce era de  $0.0055 \text{ m m}^{-1}$  aguas arriba de la cola del embalse de Inturia, de  $0.0002 \text{ m m}^{-1}$  en el tramo correspondiente al vaso del embalse y de  $0.0095 \text{ m m}^{-1}$  en el sector aguas abajo de la presa hasta la cola de Bertxin. El perfil longitudinal se representa en la Fig. 7.

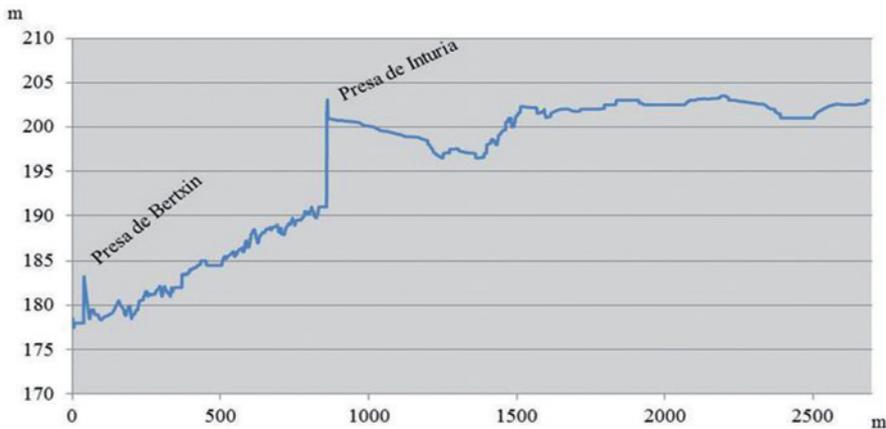


Figura 7. Perfil longitudinal del cauce del río Leitzarán antes del derribo, del vaso de la presa de Inturia y aguas abajo hasta la presa de Bertxin (batimetría realizada por la Diputación Foral de Gipuzkoa en 2013).

Por lo que respecta al muestreo de sedimentos, el material analizado es paleozoico y poco rodado. El tamaño superficial medio en la barra de referencia (barra 0) es de 114.43 mm, mientras en las barras ubicadas dentro del área de estudio la granulometría media oscila entre 103.43 mm (barra 1, aguas arriba) y 49.94 mm (barra 3, en cola de embalse). Solo existe acorazamiento en la barra 1 (índice: 2.17) y en la 6 (barra más baja, próxima a la cola de la presa de Bertxin, índice: 1.86), encontrándose el material de las cuatro barras intermedias totalmente mezclado y mal clasificado.

Las mediciones de dureza con la tecnología Equotip 3 se han realizado sobre las 7 barras muestreadas y han permitido observar que los valores medios son en general más bajos en las barras de aguas abajo (336.6 HL en la barra 3, 391.6 HL en la barra 4, 338.1 en la barra 5 y 319.3 HL en la barra 6) que en las barras ubicadas aguas arriba (453.4 HL

en la barra 1 y 390.4 HL en la barra 2). Aún más arriba, en la barra 0 de referencia el valor ha sido de 373 HL, inferior incluso al de la barra 4. Los coeficientes de variación son mayores en las barras de aguas abajo, con una heterogeneidad de durezas mayor. No se pueden extraer conclusiones de estos resultados antes de nuevos momentos de muestreo, pero puede preverse una efectiva movilización de sedimentos, ya que la variabilidad de durezas dentro de cada barra es notable, evidenciando también una heterogeneidad entre cantos desgastados y elementos sin pulir.

Por último, se han obtenido nubes de puntos generadas mediante laser escáner para la documentación de las barras. Los resultados se compararán con los de campañas de campo posteriores. En la Fig. 8 se representan los datos obtenidos en la barra 4.



Figura 8. Toma de datos con láser escáner en el muestreo de julio de 2013 en la barra 4 (localizada en rojo en el croquis de situación) de Inturia.

Como se ha señalado, no se dispone todavía de datos de mediciones concretas posteriores al derribo, pero sí pueden señalarse algunas observaciones cualitativas. Tras el derribo de los primeros 3 metros de la presa se ha reorganizado el nuevo *thalweg* en la zona de cola del embalse, donde han emergido importantes barras de arenas, produciéndose colapsos de las orillas y una evacuación rápida del material fino. Se aprecia con claridad el inicio de una erosión remontante hacia aguas arriba. En la zona más cercana a la presa se ha producido un descenso del nivel de la lámina de agua, con nuevas orillas que coinciden con la ladera del valle, compuestas de material limo-arcilloso.

## 5. Discusión

El seguimiento geomorfológico desde un conocimiento del cauce previo a la demolición es fundamental para comprender, cuantificar y analizar la evolución de todos los procesos generados por el derribo de la presa, además de su evolución posterior (Pizzuto, 2002). Así, el seguimiento es útil como sistema preventivo, de control y de conocimiento científico aprovechable para futuras actuaciones, como ocurre en cualquier tipo de proceso de restauración fluvial (Ollero *et al.*, 2011). El monitoreo tras el derribo de presas suele centrarse en elementos bióticos y es frecuente que se lleve a cabo por voluntariado, como en los casos de los ríos Elwha, Winnicut o Musconetcong en Norteamérica (Woodward, 2008). Los antecedentes metodológicos específicos para el seguimiento geomorfológico del derribo de presas son escasos (Wohl y Cenderelli, 2000; Doyle *et al.*, 2003b), por lo que en el presente estudio se ha optado por una metodología propia, basada en técnicas habituales en geomorfología fluvial.

La aplicación del seguimiento en Mendaraz lleva a afirmar que la demolición de presas constituye una práctica de restauración fluvial, *sensu* Palmer *et al.* (2007), Beechie *et al.* (2008), Kondolf (2011) y Ollero (2011a), por cuanto contribuye de forma efectiva a la renaturalización geomorfológica de procesos y formas y, como consecuencia de ello, a la mejora ecológica y ambiental. El río recupera naturalidad y un nuevo equilibrio condicionado, entre otros factores, por la historia de represamiento que ha sufrido, que en los casos de Mendaraz e Inturia se prolongó aproximadamente un siglo. En Mendaraz los resultados son claros y el río Urumea ha recuperado en ese tramo su geomorfología, además de su continuidad longitudinal, sin generarse ningún efecto negativo. Por tanto, en Inturia puede esperarse que la respuesta fluvial será igualmente positiva, y las observaciones realizadas tras su derribo, todavía no cuantificadas, permiten considerar que la demolición por fases es una decisión acertada, que el seguimiento geomorfológico será útil y que se pueden mantener los plazos previstos.

El principal trabajo fluvial de recuperación tras el derribo de la presa es el transporte de los sedimentos acumulados en el vaso y para ello es necesario contar con caudales geomórficos (Sawaske y Freyberg, 2012). De acuerdo con testigos directos, en el caso de Mendaraz una parte importante de los sedimentos acumulados, especialmente el material fino, fueron evacuados por la corriente fluvial en las primeras horas tras el derribo, que se realizó con aguas medias, frenándose esta actividad geomorfológica en pocos días. Ya no se registraron caudales geomórficos hasta la crecida extraordinaria del 6 de noviembre de 2011, cuando se produce el segundo momento de evacuación, afectando ya a material más grueso. De acuerdo con las secciones realizadas una semana después de la crecida (muestreo M3), se puede estimar una evacuación próxima a los 7 200 m<sup>3</sup> de sedimento, es decir, el 60% de los aproximadamente 12 000 m<sup>3</sup> de sedimentos atrapados en el antiguo embalse. Entre los muestreos 3 y 4, con aguas medias y altas pero sin crecidas (en 13 días de este periodo se superó el triple del caudal medio y solo en un día se alcanzó un valor que multiplicaba por 5 el caudal medio), se ralentizó la dinámica pero todavía se produjeron cambios y procesos erosivos en el antiguo vaso. Aguas arriba puede esperarse que la erosión remontante siga avanzando, aunque de forma cada vez más atenuada.

Apoyándose en varios ejemplos monitorizados en Norteamérica, Doyle *et al.* (2002) señalaron que la cantidad relativa de sedimento transportado desde el vaso del embalse una vez derribada la presa puede ser desde solo el 10% hasta el 80% del sedimento almacenado. Igualmente constataron que la mayor parte de este sedimento se movilizó durante el primer año tras el derribo. El caso de Mendaraz podría incluirse en estos parámetros, ya que una crecida registrada un año después del derribo ha podido movilizar un 60% de los materiales del vaso.

Se ha puesto de manifiesto que las crecidas con alta capacidad geomórfica son fundamentales para el funcionamiento fluvial como motor del trabajo del río, haciendo rápida y efectiva, como en el caso de Mendaraz, la recuperación del sistema y su naturalización.

Un aspecto de interés como la velocidad de desplazamiento de los sedimentos y la distancia hasta donde se vuelven a depositar no se han logrado predecir por depender de numerosos factores locales, como ya señalaran Wohl y Cenderelli (2000), Pizzuto (2002) o Doyle *et al.* (2002). Por otro lado, se considera imposible que el curso fluvial pueda recuperar totalmente sus primitivas morfologías y equilibrio, previas a la construcción de la presa (Lenhart, 2000). En Mendaraz el trabajo de evacuación del vaso está casi concluido, pero aguas abajo las próximas crecidas habrán de proseguir la clasificación y distribución de sedimentos. La agradación inicial aguas abajo responde a pautas similares a las definidas por Draut *et al.* (2011) en el río Elwha (estado de Washington), y deberá ir ajustándose progresivamente hasta una situación de equilibrio y de definición clara y modelado de las barras que se han formado.

Conforme se avance en el estudio de Inturia se podrá comprobar si el tamaño medio de grano, superior en este caso, constituye un condicionante de la rapidez y eficacia de la labor fluvial de ajuste en busca del nuevo equilibrio. También se constatará el papel de las crecidas y periodos de aguas altas que se vayan registrando. Es imposible pronosticar por el momento si la recuperación geomorfológica de Inturia será tan rápida como la de Mendaraz. La demolición sucesiva en 4 fases de 3 m cada una escalonará de forma adecuada el proceso. De acuerdo con la experiencia de Mendaraz, un plazo de un año entre cada derribo parece adecuado para que el río realice un trabajo de evacuación suficiente.

## 6. Conclusiones

En la realización del presente trabajo se ha contado con dos condicionantes importantes: la ausencia de mediciones previas al derribo en la presa de Mendaraz y la no disponibilidad todavía de datos procedentes de las mediciones post-derribo en el caso de la presa de Inturia. Pero se aporta una metodología de seguimiento que, adaptada a los medios disponibles, se ha mostrado eficaz en Mendaraz y ha sido mejorada para Inturia, donde se espera una mayor cantidad y calidad de información y posibilidades de interpretación y determinación de tendencias. Este protocolo de seguimiento podrá ser aplicado a las siguientes fases de derribo de Inturia y a nuevos casos de estudio.

En líneas generales, el comportamiento post-derribo de los cursos fluviales estudiados ha sido coherente con lo que se esperaba de acuerdo con la consulta de la literatura previa, por lo que puede concluirse que todas las hipótesis de partida reciben una respuesta afirmativa.

En el proceso de renaturalización geomorfológica de Mendaraz fue determinante la crecida extraordinaria del río Urumea un año después del derribo de la presa. Esta crecida ha acelerado los procesos y ha definido con claridad una nueva situación de equilibrio dinámico para el río, que ha ralentizado su trabajo geomorfológico después de la avenida, pero lo va ejecutando sobre las nuevas formas construidas en el evento. Por tanto, para la eficacia en la renaturalización geomorfológica del derribo de presas hay dos procesos clave: la evacuación brusca de agua y sedimentos inmediata al derribo y contar con crecidas posteriores que dirijan y completen el trabajo fluvial.

En suma, y como conclusión final, la demolición de presas obsoletas es una buena práctica en restauración fluvial, imprescindible para recuperar la continuidad longitudinal de todos los procesos geomorfológicos y ecológicos. La recuperación del sistema fluvial es evidente, y más rápida y efectiva si se registran con frecuencia o intensidad crecidas después del derribo. Por tanto, en ríos regulados habría que acompañar a la medida del derribo de la presa con la generación de crecidas artificiales que permitan y aceleren el trabajo del río en su busca de naturalidad.

## Agradecimientos

El seguimiento geomorfológico post-derribo de la presa de Mendaraz se ha realizado en el marco del proyecto BIDUR de Cooperación Transfronteriza (Interreg IV A) para la gestión de los ríos Bidasoa y Urumea, dirigido por la Diputación Foral de Gipuzkoa (Dirección General de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas) a través de un contrato de investigación y desarrollo suscrito por Hazi (Corporación del Gobierno Vasco para el desarrollo del medio rural y marino) y la Universidad de Zaragoza. El trabajo del seguimiento de la presa de Inturia en el río Leizaran se está realizando a través de un contrato suscrito entre la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y la Fundación HAZI en el marco del proyecto INTERREG EFA 221/11 GURATRANS, el cual ha sido financiado por Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), por la Agencia Vasca del Agua – Ur Agentzia y por la Diputación Foral de Gipuzkoa. Nuestro agradecimiento a los evaluadores del artículo por sus aportaciones y sugerencias.

## Referencias

- Alonso, C., Baeza, D., Gortázar, J. 2009. *Liberando ríos. Propuestas de WWF para el desmantelamiento de presas en España*. WWF España, Madrid, 48 pp.
- Álvarez, F., San Emeterio, D., Tames, P. 2011. Criterios de diseño de las actuaciones en obstáculos realizadas por la Diputación Foral de Gipuzkoa. En *Actas del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, Centro Ibérico de Restauración Fluvial, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Confederación Hidrográfica del Duero, León, pp. 397-404.

- Aoki, H., Matsukura, Y. 2008. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 23-29.
- Barber, D.M., Mills, J.P., Bryan, P.G. 2003. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV-5/C15*, 619-624.
- Beechie, T.J., Pess, G.R., Roni, P., Giannico, G. 2008. Setting river restoration priorities: a review of approaches and a general protocol for identifying and prioritizing actions. *North American Journal of Fisheries Management* 28, 891-905.
- Cheng, F., Granata, T. 2007. Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal: field observations. *Water Resources Research* 43, W03444.
- Doyle, M.W., Stanley, E.H., Harbor, J.M. 2002. Geomorphic analogies for assessing probable channel response to dam removal. *Journal of the American Water Resources Association* 38(6), 1567-1579.
- Doyle, M.W., Stanley, E.H., Harbor, J.M. 2003a. Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin. *Water Resources Research* 39(1), 1011, doi:10.1029/2002WR001714.
- Doyle, M.W., Harbor, J.M., Stanley, E.H. 2003b. Toward policies and decision-making for dam removal. *Environmental Management* 31(4), 453-465.
- Draut, A.E., Logan, J.B., Mastin, M.C. 2011. Channel evolution on the dammed Elwha River, Washington, USA. *Geomorphology* 127, 71-87.
- Ferrer-Boix, C. 2010. *Inciisión de ríos por extracción aluvial y retirada de presas. Estudio matemático y experimental*. Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ferrer-Boix, C., Martín-Vide, J.P. 2011. Estudio matemático y experimental de la retirada de presas. Aplicaciones a la restauración fluvial. En *Actas del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, Centro Ibérico de Restauración Fluvial, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Confederación Hidrográfica del Duero, León, pp. 426-434.
- García de Leániz, C. 2008. Weir removal in salmonid streams: implications, challenges and practicalities. *Hydrobiologia* 609, 83-96.
- Gaspar, S., Azpiroz, I. 2011. Seguimiento de la demolición de un obstáculo (azud de Mendaraz) en el río Urumea mediante parámetros biológicos, físicos e hidromorfológicos, En *Actas del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, Centro Ibérico de Restauración Fluvial, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Confederación Hidrográfica del Duero, León, pp. 338-345.
- Grant, G.E. 2001. Dam removal: Panacea or Pandora for rivers? *Hydrological Processes* 15, 1531-1532.
- Hardy, T., Panja, P., Mathias, D. 2005. *WinXSPRO, A channel cross section analyzer, user's manual, version 3.0*. United States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-147, Fort Collins, 95 pp.
- Hart, D.D., Johnson, T.E., Bushaw-Newton, K.L., Horwitz, R.J., Bednarek, A.T., Charles, D.F., Kreeger, D.A., Velinsky, D.J. 2002. Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *BioScience* 52 (8), 669-681.
- Hodge, R., Brasington, J., Richards, K. (2009) Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces: linking morphology to sediment transport processes and hydraulics. *Sedimentology* 56 (7), 2024-2043.
- Ibisate, A., Acín, V., Díaz, E., Granado, D., Ollero, A. 2012. Cartografía geomorfológica: herramienta de análisis de la dinámica fluvial en ríos aluviales. En *Avances de la Geomorfolología en España. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfolología*, A. González Díez (coord.), Universidad de Cantabria, Santander, pp. 505-508.

- Ibisate, A., Díaz, E., Ollero, A., Acín, V., Granado, D. 2013. Channel response to multiple damming in a meandering river, middle and lower Aragón River (Spain). *Hydrobiologia* 712, 5-23.
- Kawasaki, S., Tanimoto, C., Koizumi, K., Ishikawa, M. 2002. An attempt to estimate mechanical properties of rocks using the Equotip hardness tester. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology* 43, 244-248.
- Kawasaki, S., Kaneko, K. 2004. Estimation method for weathering thickness of man-made weathering rocks by using the Equotip hardness tester. En *Proc. ISRM Regional Symp. EURO-ROCK 2004 and 53rd Geomech. Colloquy*, Shubert, W. Verlag Glückauf, Essen, pp. 491-494.
- Kibler, K.M., Tullis, D.D., Kondolf, G.M. 2011 (ed.). Learning from dam removal monitoring: challenges to selecting experimental design and establishing significance of outcomes. *River Research and Applications* 17, 967-975, DOI: 10.1002/rra.1415.
- Kondolf, G.M. 2011. Setting goals in river restoration: when and where can the river "heal itself"? En *Stream restoration in dynamic fluvial systems: scientific approaches, analyses, and tools*, A., Simon, S.J., Bennett, J.M., Castro (eds.), AGU, Geophysical Monograph Series, 194, Washington, 29-43 pp.
- Lerma, J.L., Biosca, J.M. 2008. *Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas*. Proyecto 3DRiskMapping, Vlaams Leonardo da Vinci Agenschap.
- Ollero, A. 2011a. Sobre el objeto y la viabilidad de la restauración ambiental. *Geographica* 59-60, 267-279.
- Ollero, A. 2011b. Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: propuesta metodológica. *Zubía* monográfico 23, 187-200.
- Ollero, A., Ormaetxea, O. 1996. Las aguas de Euskal Herria. En *Geografía de Euskal Herria*, G., Meaza, E., Ruiz Urrestarazu (dirs.), Ostoa, Lasarte, tomo 3, pp. 85-240.
- Ollero, A., Ibisate, A., Horacio, J., Ferrer-Boix, C., Martín-Vide, J.P., Acín, V., Ballarín, D., Díaz, E., Granado, D., Mora, D., Sánchez Fabre, M. 2011. Indicadores geomorfológicos para el seguimiento de la restauración fluvial. En *Actas del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restaurarios*, Centro Ibérico de Restauración Fluvial, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Confederación Hidrográfica del Duero, León, pp. 346-355.
- Ollero, A., Acín, V., Ballarín, D., Díaz, E., Granado, D., Ibisate, A., Mora, D. 2012. Seguimiento geomorfológico tras la demolición de la presa de Mendaraz (río Urumea, Gipuzkoa). En *Avances de la Geomorfología en España. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, A. González Díez (coord.), Universidad de Cantabria, Santander, pp. 469-472.
- Palmer, M.A., Allan, J.D., Meyer, J., Bernhardt, E.S. 2007. River restoration in the twenty-first century: data and experiential knowledge to inform future efforts. *Restoration Ecology* 15 (3), 472-481.
- Parker, G. 1990. Surface bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research* 28 (4), 417-436.
- Pearson, A.J., Snyder, N.P., Collins, M.J. 2011. Rates and processes of channel response to dam removal with a sand-filled impoundment. *Water Resources Research* 47, W08504, doi:10.1029/2010WR009733.
- Pérez-Alberti, A., Gomes, A., Trenhaile, A., Oliveira, M., Horacio, J. 2013. Correlating river terrace remnants using an Equotip hardness tester: An example from the Miño River, northwestern Iberian Peninsula. *Geomorphology* 191, 59-70
- Pizzuto, J.E. 2002. Effects of dam removal on river form and process. *BioScience* 52, 683-692.
- Revuelto, J., López-Moreno, J.I., Azorín-Molina, C., Arguedas, G., Vicente-Serrano, S.M., Serreta, A. 2013. Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de

- procesos geomorfológicos dinámicos: el manto de nieve y heleros en áreas de montaña. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 39 (2), 335-357.
- Rodríguez, I., Santillán, J.I., Huertas, R. 2011. Excursión del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial. En *Actas del I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, Centro Ibérico de Restauración Fluvial, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Confederación Hidrográfica del Duero, León, pp. 891-895.
- Sanz Ronda, F.J., Bravo, F.J., Fuentes, J.F., Ruiz Legazpi, J., García Vega, A., Ramos, N., Salgado, V.M., Martínez de Azagra, A. 2013. Pasos para peces: escalas y otros dispositivos de paso. *Notas técnicas del CIREF* 7, 17 pp.
- Sawaske, S.R., Freyberg, D.L. 2012. A comparison of past small dam removals in highly sediment-impacted systems in the U.S. *Geomorphology* 151-152, 50-58.
- Uribelarrea, D. 2008. *Dinámica y evolución de las llanuras aluviales de los ríos Manzanares, Jarama y Tajo, entre las ciudades de Madrid y Toledo*. Tesis doctoral. Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid.
- Wohl, E.E., Cenderelli, D.A. 2000. Sediment deposition and transport patterns following a reservoir sediment release. *Water Resources Research* 36, 319-333.
- Wong, M., Parker, G. 2006. Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering* 132 (11), 1159-1168.
- Woodward, A., Schreiner, E.G., Crain, P., Brenkman, S.J., Happe, P.J., Acker, S.A., Hawkins-Hoffmann, C. 2008. Conceptual models for research and monitoring of Elwha dam removal; management perspective. *Northwest Science* 82 (1), 59-71.