Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

EVALUACIÓN DE CAMBIOS HIDROMORFOLÓGICOS DE TRAMOS FLUVIALES OBJETO DE ACCIONES DE RESTAURACIÓN (ELIMINACIÓN DE OBSTÁCULOS)

TRABAJO FIN DE MASTER

Trabajo realizado por:
Víctor Liaño de Cos

Dirigido por:
Francisco Jesús Peñas Silva
José Barquín Ortiz

Titulación:
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, julio de 2023

Contenido

RESUMEN 2
SUMMARY 3
1-Introducción 4
2-Materiales y métodos 9
2.1- Área de estudio 9
2.1.1- Azud de la depuradora 10
2.1.2- Azud de la ferrería 12
2.2- Generación de datos hidromorfológicos mediante trabajo *in situ* 14
2.2.1- Delimitación del tramo y selección de perfiles 14
2.2.2- Obtención de datos topográficos 15
2.3- Procesamiento de datos y generación de mallas 22
2.3.1- Extracción de información topográfica 22
2.3.2- Unificación de coordenadas y alineación de la nube de puntos de River Surveyor a la nube de puntos de láser escáner: 24
2.3.3- Unificación de coordenadas y alineación de la nube de puntos de topografía obtenida con ETT/GPS a la nube de puntos de láser escáner 27
2.4- Alineación de la topografía completa de las situaciones pre y post derribo 27
2.5- Comparación de situaciones pre y post derribo 28
2.5.1- Comparación de mallas 28
2.5.2- Comparación de transectos 28
2.5.3- Análisis del volumen de sedimentos movilizados 29
3-Resultados y discusión 29
3.1- Comparación de mallas 29
3.2- Comparación de transectos y perfil longitudinal 31
3.2- Análisis del volumen de sedimentos movilizados 36
4-Conclusiones 38
5- Bibliografía 39

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro de las actuaciones de restauración fluvial impulsadas desde la Unión Europea con el objetivo de renaturalizar los tramos de ríos afectados por barreras trasversales.

Dentro de estas actuaciones, una de las más significativas consiste en la eliminación de azudes obsoletos. Estos azudes son pequeñas presas de hormigón o mampostería (piedra natural tallada obtenida del lecho del propio río) que antiguamente servían para derivar agua para su aprovechamiento en las actividades ganaderas y agrícolas, la puesta en funcionamiento de molinos, aserraderos y ferrerías o, más recientemente, en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, muchas de estas barreras dejaron de usarse hace años (décadas en algunos casos) y se abandonaron.

Por otro lado, el impacto que generan estas barreras sobre el río es muy significativo: son obstáculos infranqueables en la migración de los peces, impiden la libre circulación de sedimentos a lo largo del río y, por su condición de abandono, pueden suponer un riesgo sobre las personas.

En nuestros dos casos de estudio, ambos azudes se localizaban en la cabecera de la cuenca del Deva, en el entorno del Parque Nacional de los Picos de Europa. Allí la presencia de especies piscícolas de gran interés y de necesaria conservación como son el salmón atlántico (*Salmo salar*) y la trucha común (*Salmo trutta*), además de los problemas recientemente citados, llevaron a la demolición de los mismos, impulsadas por el proyecto europeo Life Divaqua, cuya meta es mejorar los ecosistemas acuáticos de las cuencas que drenan los Picos de Europa.

El objetivo del presente trabajo es analizar los cambios hidrogeomorfológicos que se producen tras el derribo de los azudes de la depuradora (río Deva), en Potes, y de la ferrería de Ojedo (río Bullón), aguas arriba de dicho pueblo.

Para ello se emplearon en campo distintas metodologías topográficas para la captura de la información y una serie de programas para su procesado. El fin perseguido fue conseguir dos nubes de puntos de los tramos de río afectados por los azudes para la comparación de las situaciones pre y post derribo en sendas localizaciones. Para poder apreciar los cambios se dejó un espacio temporal de un año entre las campañas de campo de antes y después del derribo, de tal manera que las riadas pudieran recolocar gran cantidad de sedimentos. Con estas nubes de puntos se generaron dos mallas tridimensionales sobre las cuales se representaron los cambios en una paleta de colores de menor a mayor diferencia y se analizaron los perfiles longitudinales y transversales.

Como resultado se observó un cambio notable en la pendiente de ambos tramos debido a la redistribución de los sedimentos, que tras el derribo se recolocaron formando nuevas barras e incisiones en determinados lugares del cauce.

Por estos motivos, y con el fin de comprender los patrones que rigen estos cambios, queda más que justificada la necesidad de realizar este tipo de seguimientos

hidrogeomorfológicos en tramos de ríos objeto de derribo de azudes o, con más motivo, presas de mayor entidad.

SUMMARY

This work is part of the river restoration initiatives promoted by the European Union with the aim of naturalizing river sections affected by transverse barriers.

Among these initiatives, one of the most significant is the removal of outdated weirs. These weirs are small concrete or masonry dams (made of carved natural stone obtained from the riverbed) that were previously used to divert water for livestock and agricultural activities, operate mills, sawmills, forges, or more recently, generate electricity. However, many of these barriers ceased to be used years ago (decades in some cases) and were abandoned.

On the other hand, the impact of these barriers on the river is highly significant: they are insurmountable obstacles to fish migration, impede the free flow of sediment along the river, and due to their abandoned condition, they can pose risks to people.

In our two case studies, both weirs were located at the headwaters of the Deva River basin, in the vicinity of the Picos de Europa National Park. The presence of ecologically important fish species such as Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*), along with the aforementioned problems, led to their demolition, driven by the European project Life Divaqua, whose goal is to improve the aquatic ecosystems of the Picos de Europa drainage basins.

The objective of this study is to analyze the hydrogeomorphological changes that occur after the demolition of the weirs at the wastewater treatment plant (Deva river) in Potes, and at the Ojedo ironworks (Bullón river), upstream of the mentioned village.

Different topographic methodologies were employed in the field to capture the information, along with a series of programs for data processing. The aim was to obtain two point clouds of the river stretches affected by the weirs for the comparison of pre- and post-demolition situations at each location. To observe the changes, a one-year time gap was left between the field campaigns before and after the demolition, allowing floods to redistribute a significant amount of sediment. With these point clouds, two three-dimensional meshes were generated, on which the changes were represented using a color palette indicating the magnitude of the differences. Also, both transverse and longitudinal profiles were analized in the two locations.

As a result, a notable change in the slope of both stretches was observed due to the redistribution of sediment, which formed new bars and incisions in certain locations along the channel after the demolition.

For these reasons, and in order to understand the patterns governing these changes, the need for this type of hydrogeomorphological monitoring in river stretches subject to the demolition of weirs, or even more so, larger dams, is more than justified.

1- Introducción

El aprovechamiento de los recursos hídricos por parte del hombre ha llevado a la modificación de los ecosistemas acuáticos, generando impactos sobre los mismos. Este aprovechamiento requiere, en muchos caos, la construcción de infraestructuras para la captación o derivación del agua que posteriormente será utilizado para consumo humano, agrícola, ganadero o para la generación de energía (García 2004). Dichas infraestructuras y su explotación implican una alteración del régimen natural de caudales y una interrupción de la libre circulación de sedimentos, recursos y organismos por los ríos (García de Jalón).

En el Parque Nacional de los Picos de Europa (PNPE) y su entorno ha existido, tradicionalmente, una explotación de los recursos hídricos que han conllevado la construcción de una serie infraestructuras que han modificado en mayor o menor medida las redes fluviales comprendidas en este espacio. Dentro de ellas, las infraestructuras más comunes son los azudes, barreras de entorno a los 2 metros de altura construidos en mampostería (rocas talladas procedentes del cauce de los propios ríos) u hormigón, cuyo objetivo es sobreelevar la lámina de agua para su derivación a un canal. Además, se han construido presas de mayor entidad como las que interrumpen el curso del río Cares en Posada de Valdeón, Caín, Poncebos o Niserias o el río Dobra (afluente del Sella) en Restaño o la Jocica (Tabla 1).

 Presa de Poncebos	 Presa de Caín
 Presa de la Jocica	 Presa de Niserias

Tabla 1: Ejemplos de barreras construidas en la cuenca del Deva-Cares y Sella

Dentro de los impactos que producen presas y azudes en los ecosistemas, uno de los más negativos está relacionado con el movimiento de la fauna piscícola a lo largo de la red fluvial, es decir, con la continuidad (Beck and Basson 2003). Este impacto es especialmente negativo para las especies migradoras que necesitan acceder y ocupar distintos hábitats y zonas de la red fluvial con características determinadas para completar su ciclo vital (Alvarez et al. 2010). En los ríos del PNPE existen dos especies especialmente vulnerables a la alteración de la continuidad y que, además, poseen gran

interés ecológico y socio-económico: la trucha común (Figura 1) y el salmón atlántico (Figura 2).

Figura 1: Trucha común adulta

Figura 2: Salmón atlántico juvenil (izquierda) y adulto (derecha)

El salmón atlántico es una de las especies migradoras más emblemáticas de los sistemas fluviales, con una distribución natural que va desde los fiordos escandinavos hasta los ríos de la cornisa Cantábrica.

Su ciclo de vida es complejo, ya que nacen en los ríos, donde se desarrollan durante 1 ó 2 años hasta llegar a una talla mínima de 12 ó 13 cm, momento en el que emigrarán al mar. Los jóvenes migradores, denominados esguines, preparan su organismo para pasar de la vida en agua dulce a la vida en el mar durante un periodo de adaptación en el estuario.

Una vez en el mar todos los salmones viven por lo menos un invierno en este medio, antes de iniciar su regreso al río, conocidos como “añales”. Parte de la población, una proporción más o menos importante pasará dos, tres o incluso más inviernos en el mar. Son los salmones “multinvierno”, que en su aventura marina llegan hasta el Atlántico septentrional y se concentran en los caladeros que se extienden desde las Islas Feroe hasta Islandia, Groenlandia y Labrador, a más de 5000 kilómetros de su origen. Los salmones, agrupados en pequeños bandos, se trasladan en mar abierto en busca del “krill” que, junto con otros crustáceos, moluscos y pequeños peces, constituye la base de su alimento en el océano.

El inicio de la maduración sexual es el evento que desencadena el viaje de regreso a sus ríos de origen, llevando a los adultos a remontarlos hasta sus cabeceras, donde se

encuentran las condiciones idóneas para desovar y culminar su ciclo de vida (Alvarez et al. 2010).

En el caso de la Península Ibérica, sus poblaciones de la cornisa cantábrica suponen el límite sur de su distribución mundial, con una genética única adaptada a las características ambientales de nuestros ríos, pero con unos números en una preocupante tendencia a la baja prácticamente desde que hay registros, y en especial desde la década de los 90 hasta la actualidad (Figura 3).

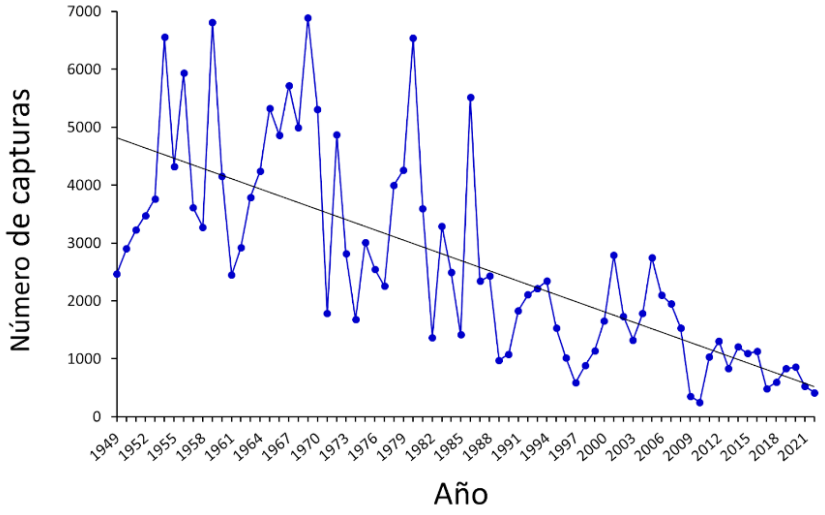


Figura 3: Número de salmones precintados en Asturias procedentes de la pesca deportiva (fuente: guardería del Medio Natural)

Esta situación atiende a diversos motivos, tales como la contaminación de los ríos, modificación de los hábitats (como encauzamientos o eliminación del bosque de ribera), sobrepesca de las poblaciones marinas y fluviales o el cambio climático (p.ej. el aumento de la temperatura del agua de los ríos o estiajes y riadas más severos). Sin embargo, una de las presiones que ejerce mayor impacto sobre este salmónido y que, precisamente, concierne al presente trabajo son las barreras que interrumpen la continuidad fluvial. Estas barreras transversales son obstáculos de difícil o imposible franqueo para el salmón, impidiendo que los ejemplares reproductores accedan a las mejores zonas para el desove.

Por ello, con el objetivo de recuperar esta especie, estas circunstancias negativas han propiciado la creación e instauración de diversos planes y figuras de protección.

Una de estas figuras es la Directiva Hábitats, un listado de especies de flora y fauna silvestres de interés comunitario dentro del territorio europeo de los estados miembros de la Unión Europea. Estas se incluyen en la directiva ya sea por encontrarse en peligro (riesgo de desaparición bajo las actuales amenazas), ser vulnerables (es decir, con probabilidad real de pasar a estar en peligro si se mantienen los factores actuales de amenaza sobre ellas), ser raras (es decir, con poblaciones pequeñas que sin estar actualmente en peligro o ser vulnerables lo podrían estar en un futuro próximo) o ser endémicas y, por ello, requerir especial atención a causa de la singularidad de su hábitat o de posibles repercusiones que su explotación pueda tener en su conservación.

Por otro lado, en el caso de la trucha, la construcción de barreras produce, principalmente, una desconexión de las poblaciones aguas arriba y aguas abajo de la misma, y un aislamiento de las primeras que, tras sucesivas generaciones, produce una homogeneización de su diversidad genética. Esto puede conducir a la desaparición de estas poblaciones por la incapacidad a adaptarse a los cambios en el río (Horreo et al. 2011).

Como consecuencia, dado el estado actual, no solo del salmón, sino también de otras especies y hábitats considerados en la Directiva Hábitats, la Comisión Europea puso en marcha el programa LIFE, siendo uno de sus objetivos la promoción y financiación de proyectos y acciones que mejorasen ese estado de conservación. En este contexto, el proyecto Divaqua (https://lifedivaqua.com/) ha propuesto actuaciones para mantener y mejorar, según el caso, el estado de conservación de los hábitats y las especies de interés comunitario (aquéllas que se describen en los anejos I, II y IV de la Directiva Hábitats; 92/43/CEE) que aparecen en los ecosistemas acuáticos continentales del área DIVAQUA, que incluye las cuencas que drenan por el PNPE: las cuencas del Deva-Cares y Sella. Varias de las actuaciones consideradas en DIVAQUA tienen como objetivo restaurar y mejorar la conectividad fluvial, a través de la eliminación de obstáculos obsoletos y la construcción y mejora de escalas para peces asociadas a infraestructuras en uso.

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 a través de diversos programas (https://damremoval.eu/). En este sentido, el principal objetivo de muchos de estos programas ha sido favorecer la migración anual de los salmónidos.

En la Península Ibérica ha habido que esperar a la entrada del siglo XXI para que el derribo de obstáculos y barreras a la continuidad longitudinal haya empezado a ser una práctica común. Aunque no se están cuantificando sistemáticamente el número de casos, se podrían estimar en varias decenas (Ibisate et al. 2017), destacando algunas áreas con un mayor número de actuaciones como Cantabria, Extremadura, Navarra o Guipúzcoa. Ejemplos de estas actuaciones son el derribo de la presa de La Gotera (en el río Bernesga, en León) o las presas de Mendaraz (río Urumea), Inturia (río Leitzarán) o Alzolabea (río Deba), las tres en el País Vasco.

Estos azudes demolidos en la Península Ibérica pertenecen, en la mayoría de los casos, al tipo de presas de pequeñas dimensiones, cuyo uso fue abandonado y cuya concesión ha caducado. Esto significa que estas barreras no sólo no aportan ningún beneficio a la sociedad, sino que su mera presencia en los cauces de los ríos genera unos daños ecológicos (interrupción de la continuidad fluvial e impacto sobre el libre movimiento de la fauna y los sedimentos en el río) y socio-económicos (pérdida de valor recreativo, disminución de la pesca, etc.) que justifican plenamente la eliminación de las mismas.

Sin embargo, la demolición de estos obstáculos implica unos cambios en el ecosistema fluvial que deben ser objeto de seguimiento, cuantificación y valoración. En esta línea, los cambios de mayor importancia son los asociados a la geomorfología del tramo afectado por la barrera, entre los que destacan la acumulación de sedimentos finos

aguas arriba del azud y su disminución aguas abajo, con lo que ello supone: incisión o acreción del cauce, cambio de la pendiente y de la geomorfología del tramo, cambio de la granulometría, etc.

Se puede estimar que en las primeras horas/días tras el derribo la respuesta del sistema geomorfológico fluvial sea rápida, los procesos intensos y se movilicen y reordenen buena parte del material atrapado en la barrera. Esta intensa dinámica se reduce progresivamente conforme el sistema fluvial se autorregule y vaya alcanzando el equilibrio entre caudales circulantes, sedimentos y pendiente del cauce (Ibisate et al. 2017).

Es de esperar la aparición de zonas donde el río incidirá en el cauce, rebajando la cota del mismo, y zonas en las que se formarán depósitos de sedimentos, produciendo una elevación del cauce, habiendo lugares con más predilección para una cosa u otra, como se verá más adelante.

Por tanto, el seguimiento geomorfológico de presas es una labor científico-técnica fundamental, imprescindible para evaluar y comprender los patrones de cambio de la geomorfología tras la eliminación de estas barreras.

El objetivo de este trabajo es, por tanto, el análisis de los cambios geomorfológicos de dos tramos fluviales de la cuenca Deva-cares tras la eliminación de sendos azudes. Para estudiar estos cambios se han aplicado unas metodologías topográficas de captura de la información y unos programas para el análisis de la misma. En concreto se han analizado los cambios en los perfiles longitudinales y transversales del río en los tramos afectados por los azudes tras la eliminación de los mismos debido al arrastre de sedimentos durante eventos de crecida.

2- Materiales y métodos

2.1- Área de estudio

Los tramos fluviales donde se realizaron los trabajos de restauración de la conectividad fluvial están ubicados en la vertiente cántabra de la cabecera de la cuenca del Deva-Cares, concretamente en los ríos Deva y Bullón (Figura 4).

El azud de la Depuradora se encontraba en el río Deva, a la altura de la localidad de Potes (Cantabria) a una distancia del mar de 40’1 km y una altitud de 274 msnm. Por su parte, el azud de la ferrería se encontraba en el río Bullón (afluente del Deva), aguas arriba del pueblo de Ojedo (municipio de Cabezón de Liébana, Cantabria) a una altitud de 280 msnm y una distancia al mar de 38 km.

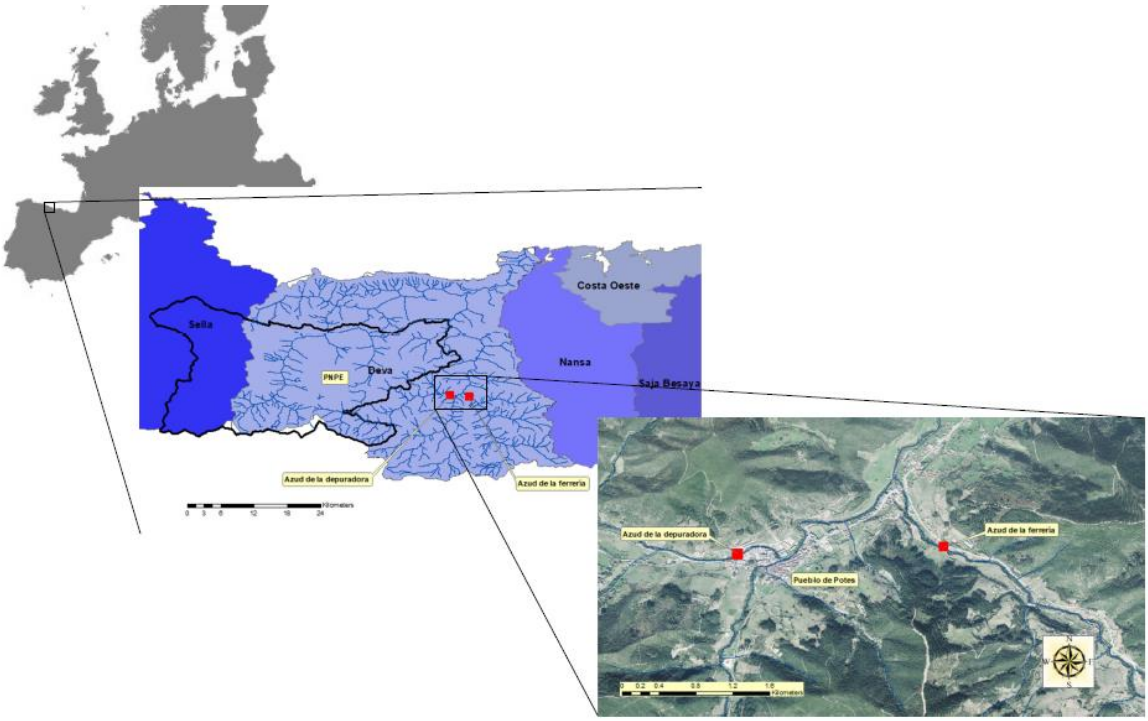


Figura 4: Mapas de situación de la cuenca del Deva y localización de los azudes objeto de derribo

2.1.1- Azud de la depuradora

Este azud estaba construido en mampostería, con perfil vertical, alcanzando una altura de 2'5 m y se encontraba abandonado, aunque históricamente se utilizaba para la producción hidroeléctrica (Figura 5).

Su concesión pertenecía a María Blanca Martínez Garanda, aunque durante más de 10 años consecutivos estuvo fuera de uso, hasta el momento del derribo.

En lo que a impacto ambiental se refiere, éste era muy severo. Atendiendo, principalmente, a la altura del obstáculo y a que carecía de escala para peces, esta barrera era infranqueable en cualquier situación de caudal, lo que imposibilitaba el remonte del salmón atlántico y de la trucha común a los tramos de cabecera del río, donde se encuentran los mejores frezaderos (zonas de desove). Además, es probable que la paralización y "acumulación" de individuos en la zona de agua remansada como en la poza formada aguas abajo pudiera favorecer la depredación de especies oportunistas y la posible aparición y contagio de enfermedades infecciosas.

Figura 5: Vistas desde la carretera (izquierda) y desde aguas abajo (derecha) del azud de la depuradora

Cabe mencionar que el derribo de este azud (Figura 6) se llevó a cabo en dos fases para minimizar, en la medida de lo posible, los problemas asociados a una hipotética inestabilidad de taludes, ya que se encontraba en zona urbana. La primera fase se ejecutó a finales de verano de 2021, dejando un pequeño escalón sin derribar de alrededor de 0,5 m de altura (Figura 7), y la segunda fase se llevó a cabo en verano de 2022, eliminando lo que resta.

Figura 6: Proceso de demolición del azud de la depuradora mediante martillo neumático

Figura 7: Resultado de la primera fase de demolición del azud de la depuradora

2.1.2- Azud de la ferrería

El azud de la ferrería de Ojedo (Figura 8) estaba construido en mampostería, presentando un perfil vertical con un salto de hasta 2’6 m de altura y encontrándose en buen estado de conservación en el momento previo a su derribo. Históricamente, se utilizaba para derivar agua hacia una ferrería situada en el margen derecho del río, la cual se encontraba en desuso desde hace años. Además, posee un canal de derivación en la margen derecha, sin rejillas y utilizado para derivar agua hacia el aserradero.

La concesión pertenecía a los herederos de Severiana Días Vélez, aunque en el momento de la demolición dicha concesión se encontraba caducada.

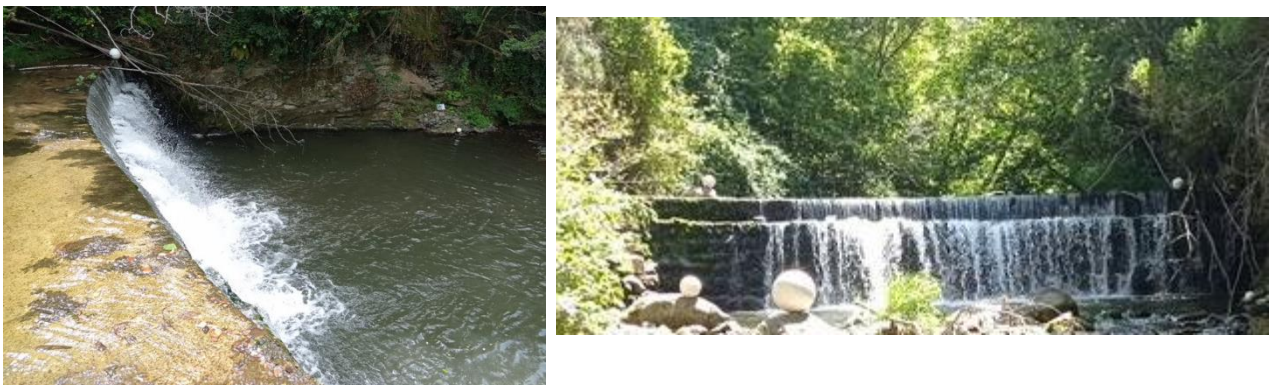


Figura 8: Vista desde coronación (izquierda) y desde aguas abajo (derecha). Se aprecian algunas esferas para la referencia topográfica

El franqueo del azud era imposible para cualquier condición de caudal debido a su altura y características, así como de la ausencia de paso para peces, por lo que su impacto era muy alto, representando el límite máximo de accesibilidad para el salmón atlántico en el Bullón. Impedía el remonte de los reproductores y la normal colonización del río. La acumulación de ejemplares en zonas como la poza al pie del azud podía favorecer la depredación de especies oportunistas y la aparición y contagio de enfermedades infecciosas.

El derribo de este azud se llevó a cabo en una sola fase a finales de verano de 2021 (Figura 9).

Figura 9: Mini retroexcavadora durante la demolición del azud de la ferrería

Figura 10: Aspecto del lugar donde se alzaba la barrera el verano posterior a su demolición

Por último, cabe señalar que, debido a la naturaleza de ambos azudes, construidos en mampostería, es decir, piedras obtenidas del propio río, no fue necesario retirar los restos del cauce (como sí se debe hacer si hubiera elementos de hormigón).

2.2- Generación de datos hidromorfológicos mediante trabajo *in situ*

El trabajo de campo para la obtención de los datos topográficos necesarios se llevó a cabo en verano, cuando los caudales son más bajos, por dos motivos: la facilidad para moverse por el tramo de río y para que haya una mayor superficie del cauce seco y poder obtener mayor cantidad de puntos mediante láser escáner.

Este trabajo se repartió en dos campañas de campo para la caracterización topográfica de la situación pre derribo en verano de 2021 y post derribo (fase 1 en el caso del azud de la depuradora) en verano de 2022.

En verano de 2023 se espera terminar de demoler el pequeño escalón que queda en el azud de la depuradora, con lo que la campaña de obtención de datos sería al verano siguiente.

2.2.1- Delimitación del tramo y selección de perfiles

Lo primero que se hizo fue determinar el límite de tramo bajo la influencia del azud, tanto hacia aguas arriba como hacia agua abajo. Hacia aguas arriba del azud se produce un remanso de agua, por lo que se considera como límite superior el primer rápido que nos encontramos. Medimos la distancia entre dicho rápido y el azud y la llevamos desde el azud hacia aguas abajo como límite inferior del tramo, quedando una longitud total

del orden de 200 m. Una vez que el tramo ha quedado definido, se localizan entre 5 a 6 transectos (secciones transversales) tanto para el tramo aguas abajo como aguas arriba, que van a servir como una de las fuentes de información para evaluar los cambios en la disposición de los sedimentos.

Estos transectos se repartieron de forma equidistante entre sí, aunque también se situaron en puntos donde había cambios significativos de sección, con el objetivo de evaluar la afección resultante del derribo del azud. La localización de los transectos se determinó clavando varillas de acero marcadas en su extremo con spray naranja allí donde se puede, o marcando directamente con spray una "x" donde haya roca madre, lugar imposible para clavar la varilla. Estas marcas se hicieron lo más discretas posibles para minimizar el impacto visual y se complementó con una grabación en vídeo del tramo y de las localizaciones de los transectos, a fin de localizarlos con mayor facilidad en la campaña post derribo.

2.2.2- Obtención de datos topográficos

La evaluación de los cambios geomorfológicos en los tramos de estudio requirió la caracterización topográfica de los mismos en los periodos pre y post derribo. En particular, fue necesario 1) caracterizar una serie de perfiles trasversales y longitudinales aguas arriba y aguas debajo de los obstáculos y 2) generar datos topográficos de la superficie seca en continuo. En cada tramo fluvial se realizaron 10 u 11 transectos, 5 aguas arriba y 5 ó 6 aguas abajo.
Para recabar esta información se combinaron 4 técnicas topográficas distintas que, tras su procesado, se integró en una nube de puntos única del tramo previamente delimitado. Además de los datos topográficos propiamente dichos fue necesario la colocación de una serie de elementos de referencia, en este caso dianas, que permitieron, por un lado, unificar los sistemas de referencia de las 4 fuentes de información topográfica para crear las nubes de puntos y, por otro, unificar los sistemas de referencia de las nubes de puntos de la situación pre y post derribo.

- **Estación total topográfica:**

La ETT se utilizó para obtener puntos tanto del lecho seco (zona emergida) como del lecho húmedo (zona sumergida) del tramo fluvial seleccionado (Figura 11). Fundamentalmente se obtienen puntos discretos de los transectos y del perfil longitudinal y de las dianas (puntos de referencia).

La obtención de datos mediante ETT requiere un equipo de trabajo formado por 2 personas: una opera la ETT y la otra va colocando el jalón con el prisma reflector sobre los puntos de interés. Se trabaja en coordenadas locales, sin sistema de referencia con coordenadas conocidas, de ahí la necesidad de colocar dianas a lo largo del tramo que, en este caso, además de las funciones pre explicadas, nos permiten referenciar cada cambio de localización de la ETT y unificar todos los datos obtenidos a un punto inicial común.

Figura 11: ETT Leica y dianas colocadas en árboles

Por comodidad de manejo de los puntos, al primer estacionamiento (exclusivamente) se le dotó con coordenadas (1000, 1000, 100 m) y a partir de ahí se radiaron los puntos de interés.

Es fundamental que se establezca visual con al menos 3 dianas comunes a un estacionamiento y el siguiente, para la correcta composición de la nube de puntos.

Además, a todos los puntos se les dota de un identificador para saber qué tipo de punto es (lecho húmedo, lecho seco, orilla, margen, diana). Este identificador es especialmente importante a la hora de tomar datos de las dianas de referencia y de los puntos de las orillas del río, es decir, el punto de corte entre el lecho húmedo y el lecho seco.

Aunque se trate de una técnica ampliamente utilizada en trabajos topográficos, el mayor inconveniente de los levantamientos topográficos con ETT es la gran cantidad de tiempo requerido para la obtención de un número muy limitado de puntos. Esto es más evidente en los tramos fluviales objeto de este estudio donde debido a su propia morfología y a la existencia de abundante vegetación de ribera el uso de este dispositivo requería una continua relocalización de la ETT para tener la visibilidad óptima de los transectos.

- **Antena GPS**:

La antena GPS (Figura 12) permite la obtención de una cantidad discreta de puntos en coordenadas geográficas (latitud y longitud en sistema de referencia WGS84) y altitud respecto al nivel medio del mar (en m) con una precisión centimétrica (± 2 cm). Además, el software utilizado permite la introducción de un identificador de cada punto para caracterizar el tipo de punto de forma paralela a lo explicado previamente. Es decir, es una técnica que nos permite generar unos datos similares a los obtenidos mediante ETT, pero de una forma mucho más rápida, precisa y referenciada a un sistema de coordenadas conocido.

Figura 12: Antena GPS con su monitor

Para el uso de este equipo solo es necesaria una persona (Figura 13) que obtiene los puntos de interés colocando la antena en vertical en la posición objetivo y guardando las coordenadas mediante una aplicación móvil. Además, no hace falta colocar dianas de referencia. El único inconveniente es la cobertura de satélite y de datos móviles, sobre todo en enclaves montañosos y zonas con cobertura aérea significativa. No obstante, en las campañas realizadas mediante esta técnica, pese a estar en la zona próxima a los picos de Europa y en tramos fluviales con abundante vegetación de ribera, se han tenido que descartar muy pocos puntos por su mala captura de coordenadas.

Figura 13: Personal operando la antena GPS

- **River Surveyor**:

El River Surveyor es un instrumento que se utiliza para medir profundidad del lecho y velocidad del aguante tecnológica de doppler acúsitco-ADCP (Acosutic Doppler Current Profiler; Figura 14). Esta técnica se empleó para obtener datos topográficos de los transectos y perfiles longitudinal en aquellas zonas cuya profundidad era tal que hacía imposible emplear la ETT o la antena GPS.

El sistema se compone de un elemento flotante sobre el que se instala la antena GPS y el Correntímetro propiamente dicho que se conecta mediante un sistema de radio a una aplicación informática donde se van registrando los datos.

Figura 14: Correntímetro River Surveyor

Como se ve en la Figura 14, dispone de un mosquetón que une los cables de enganche a la cuerda que se pasa de una orilla a otra del río. De esta manera hay una persona a cada lado que suelta y tira de la cuerda, respectivamente, para desplazar el correntímetro poco a poco a lo largo del transecto.

La información que nos interesa es la de la distancia del River Surveyor al inicio del transecto hasta la orilla de inicio, ya que este dispositivo no está diseñado para funcionar en zonas muy someras, y la profundidad del río en cada punto, habiendo medidas en intervalos de distancia del orden de 10 ó 15 cm, si bien nos da también información de la velocidad del flujo en cada momento y una estimación del caudal.

- **Láser escáner:**

Metodología topográfica moderna (Figura 15) que captura la localización (X, Y, Z) de millones de puntos en cada escaneado. Pese a la abundante información recogida, su funcionamiento es relativamente sencillo, ya que únicamente hay que ir situando el

escáner en emplazamientos que nos ofrezcan buena visualización del lecho seco, incluyendo los transectos defendidos previamente, y poniéndolo en funcionamiento.

Figura 15: Láser escáner Faro Focus 3D

En cuestión de aproximadamente 10 minutos el instrumento habrá capturado los puntos a su alrededor, tanto del talud como de la vegetación, y habrá tomado fotografías esféricas.

Figura 16: Extracto de fotografía de 360 º (las zonas en negro corresponden a puntos borrados a posteriori)

Teniendo en cuenta que los tramos de estudio tienen una longitud aproximada de unos 200 metros mientras que el láser escáner captura datos en un radio mucho menor y que

debido a la morfología de los tramos y la vegetación de ribera es imposible tener una visual completa del tramo desde una única posición, es necesario hacer varios escaneos en continuo que posteriormente habrá que unir en el procesado de los datos. Para poder unir los diferentes escaneos hay que poner elementos reconocibles en 2 o más escaneos. En este caso, se colocan esferas de poliespán de 30 cm de diámetro a modo de referencia, y como mínimo debe haber 3 esferas con visual común entre un escáner y el siguiente, para solaparlos después correctamente, y esferas de 15 cm de diámetro junto con carteles informativos que marcan la localización y el número de cada transecto.

El inconveniente que tiene esta metodología es que los puntos del cauce de la parte sumergida son imposibles de capturar, ya que el agua hace que el rayo láser rebote y se pierda. Es por ello que esta información ha de tomarse con ETT o con antena GPS.

Otro inconveniente que tiene es la captura de información irrelevante (para el objetivo de este trabajo), esto es de la vegetación de ribera, que no nos aporta nada en nuestros casos de estudio, ya que sólo nos interesa la topografía del terreno, propiamente dichos. Los puntos que no son de interés se eliminarán en procesado de los datos.

2.3- Procesamiento de datos y generación de mallas

Como paso previo al análisis de cambio de las condiciones pre y postderribo es necesario generar las nubes de puntos de cada periodo. Para ello hay que extraer la información de cada fuente de datos y técnica empleada y generar una nube de puntos a parir de la misma y, posteriormente, unificar esas nubes de puntos.

2.3.1- Extracción de información topográfica

- **Generación de nubes de puntos a partir de información obtenida con ETT y antena GPS** :

Los datos guardados en ambos aparatos se descargan en un fichero de texto o '.csv' en formato "ID, x, y, z", es decir, identificador o etiqueta de cada punto (fundamental sobre todo para saber cuáles son las dianas, los puntos de las márgenes y los puntos del perfil longitudinal) y sus coordenadas. En el caso de los datos de la ETT, como se ha comentado previamente, los datos se extraen directamente en metros, con unas coordenadas locales. En el caso de la antena GPS, los datos se extraen coordenadas geográficas (el sistema de referencia WGS84). Estas coordenadas se transformaron a coordenadas UTM (ETRS89 30N) mediante ArcGis, para poder trabajar con todo en metros.

Estas nubes de puntos servirán no solo para complementar la información de la nube de puntos terrestre del Faro Focus, sino que se importarán en el programa Civil 3D para la creación de los perfiles longitudinales (ver los perfiles adjuntos al final del documento).

En lo que a los transectos se refieren, se pueden crear directamente en Civil 3D (Figura 17) o, como es el caso, en Cyclone 3DR, cuando tengamos las mallas tridimensionales sacadas a partir de las nubes de puntos de la topografía completa referidas al mismo sistema de referencia.

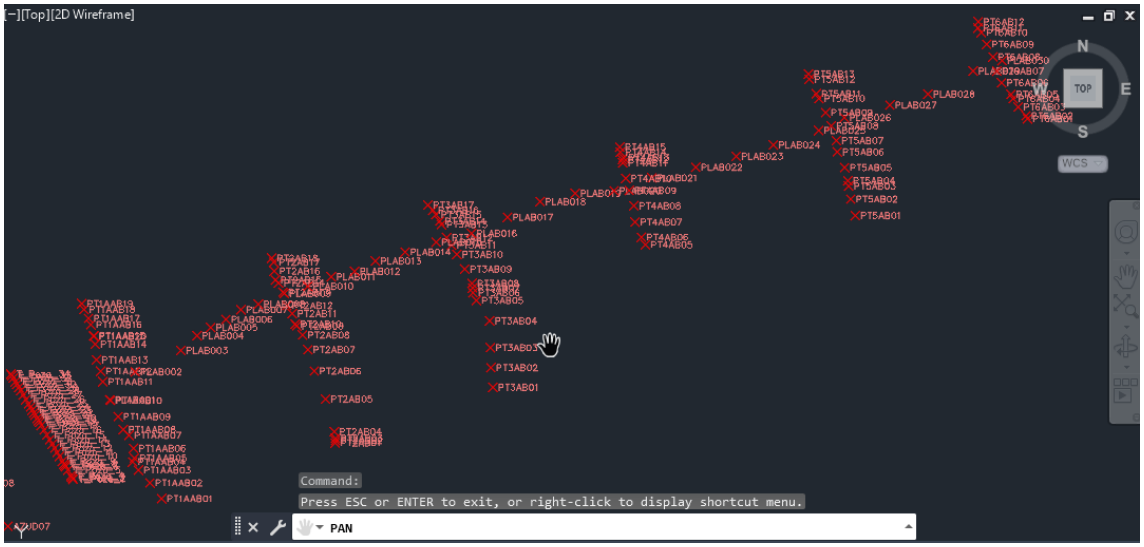


Figura 17: Detalle de la topografía ETT aguas abajo del azud de la depuradora en Civil 3D

- **Generación de nubes de puntos a partir de información obtenida con River Surveyor:**

Los archivos generados con el correntímetro se importan mediante el programa "RiverSurveyor Live" y se pueden trascribir en un archivo Excel, siendo los datos que nos interesan los que figuran con la etiqueta "In transect", correspondientes a la columna (columna A), de las cuales los datos clave son los de la columna "Track (m)", que es la distancia desde la orilla al punto, y la columna "Depth (m)" (F), que es la profundidad del río en cada punto medido del transecto. La columna G "Profundidad (m)" se ha insertado a posteriori para que el dato aparezca con signo negativo y se opere en Excel mediante la suma.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Step	Sample	Time	Track (m)	DMG (m)	Depth (m)	Profundidad (m)	Lámina agua (m)	# Pings	# Cells	Satellites	GPS Quality	Mean Speed (m/s)
46	Start Edge (45)	45	3:56:42 p. m.	2.71	0.64	0.21	-0.21	0	35	0	6	2	0
47	Start Edge (46)	46	3:56:43 p. m.	2.73	0.66	0.2	-0.2	0	35	0	6	2	0
48	Start Edge (47)	47	3:56:44 p. m.	2.82	0.61	0.21	-0.21	0	35	0	6	2	0
49	Start Edge (48)	48	3:56:45 p. m.	2.86	0.59	0.22	-0.22	0	34	0	6	2	0
50	Start Edge (49)	49	3:56:46 p. m.	2.97	0.48	0.22	-0.22	0	35	0	6	2	0
51	In Transect	50	3:56:47 p. m.	0.12	0.12	0.22	-0.22	0	35	0	6	2	0
52	In Transect	51	3:56:48 p. m.	0.13	0.11	0.21	-0.21	0	35	0	6	2	0
53	In Transect	52	3:56:49 p. m.	0.21	0.05	0.2	-0.2	0	35	0	5	2	0
54	In Transect	53	3:56:50 p. m.	0.5	0.32	0.23	-0.23	0	35	0	5	2	0
55	In Transect	54	3:56:51 p. m.	0.65	0.46	0.3	-0.3	0	35	0	5	2	0
56	In Transect	55	3:56:52 p. m.	0.78	0.59	0.32	-0.32	0	35	0	5	2	0
57	In Transect	56	3:56:53 p. m.	0.97	0.74	0.31	-0.31	0	10	7	5	2	0.261
58	In Transect	57	3:56:54 p. m.	1.03	0.79	0.34	-0.34	0	11	8	5	2	0.17
59	In Transect	58	3:56:55 p. m.	1.34	0.95	0.36	-0.36	0	11	8	5	2	0.158
60	In Transect	59	3:56:56 p. m.	1.37	0.96	0.37	-0.37	0	11	9	5	2	0.328
61	In Transect	60	3:56:57 p. m.	1.39	0.96	0.37	-0.37	0	11	11	5	2	0.139
62	In Transect	61	3:56:58 p. m.	1.51	1.07	0.36	-0.36	0	11	8	5	2	0.279
63	In Transect	62	3:56:59 p. m.	1.75	0.99	0.38	-0.38	0	11	10	5	2	0.24
64	In Transect	63	3:57:00 p. m.	1.78	1	0.42	-0.42	0	11	11	5	2	0.363
65	In Transect	64	3:57:01 p. m.	1.81	1.01	0.53	-0.53	0	11	11	5	2	0.218

Figura 18: Excel final de un transecto dado obtenido con River Surveyor

- **Generación de nubes de puntos a partir de información obtenida con láser escáner**:

El primer paso de procesado de las distintas nubes de puntos obtenidas con el láser escáner, es decir, los diferentes escaneos realizados en cada tramo de estudio, es componer una única nube de puntos mediante el empleo del programa Faro Scene (Figura 19).

Lo primero que se hizo fue hacer una búsqueda de las esferas de 30 cm de diámetro en todos los escáners y, tras haber comprobado que sean las correctas esferas colocadas en campo, se juntaron todos los escaneos en una única nube de puntos. Además, se procedió a eliminar de forma manual toda la vegetación, dejando únicamente aquellos troncos o ramas donde estaban colocadas las dianas de referencia (Figura 16). Dicha nube se exportó a un archivo de texto en formato "x, y, z, R, G, B", es decir, sus coordenadas correspondientes y el código de colores de cada punto.

Si bien es cierto que hay programas como Cyclone 3DR, que tienen procesos automáticos para hacer este proceso en poco tiempo, al ser la primera vez que se manejaba esta información topográfica se decidió hacer a mano este proceso de eliminación de la

vegetación, además de que tiene el inconveniente de que borraría dianas que nos harían falta más adelante y nos implicaría cambiar toda la forma de proceder con el trabajo.

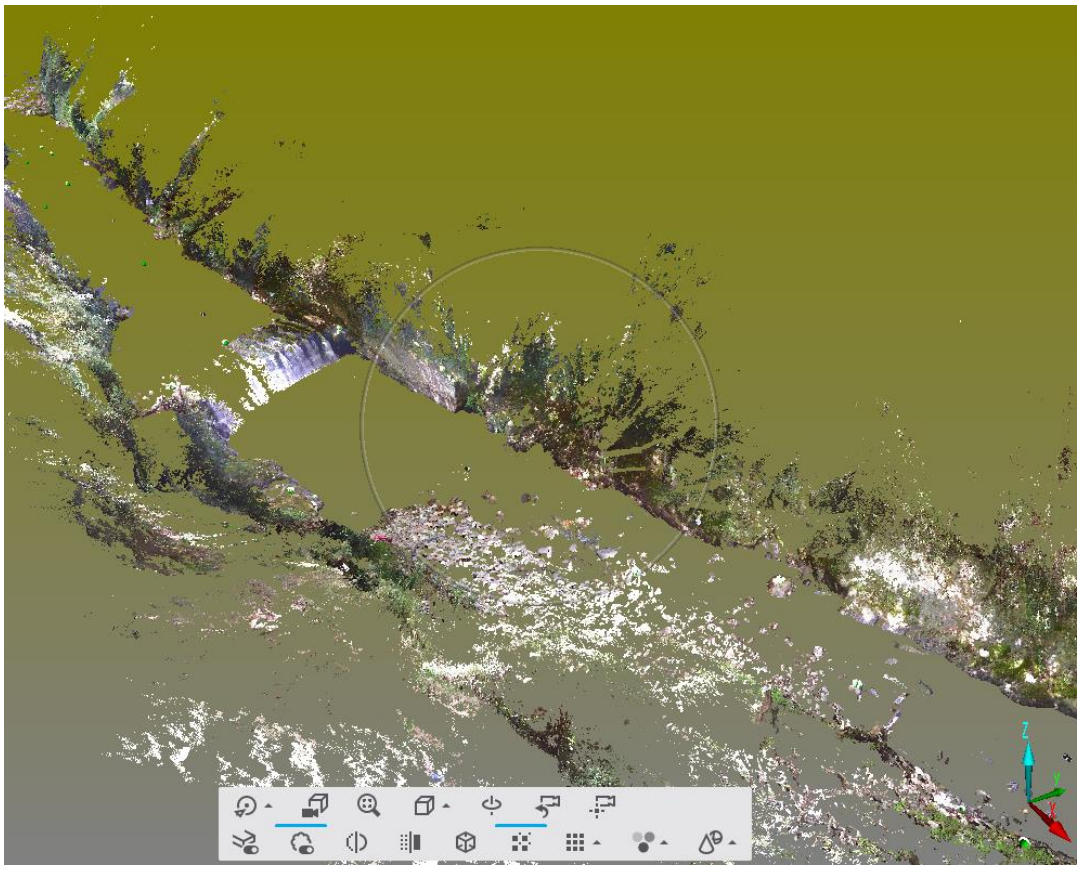


Figura 19: Detalle del aspecto final de la nube de puntos completa, ejemplo del azud de la depuradora

2.3.2- Unificación de coordenadas y alineación de la nube de puntos de River Surveyor a la nube de puntos de láser escáner:

En ambos tramos de estudio, tanto en el azud de la depuradora como en el de la ferrería, hay un transecto medido con el correntímetro, y es el que está inmediatamente aguas abajo del azud, donde el continuo impacto del agua genera una socavación en el cauce, alcanzando una poza con profundidades de 2 m o más.

Conocida la localización exacta de dicho transecto, se hace una consulta en Faro Scene (Figura 20) para conocer la distancia entre ambas orillas en la nube de puntos del escáner y comprobar que esta sea prácticamente la misma que la que la obtenida mediante el River Surveyor

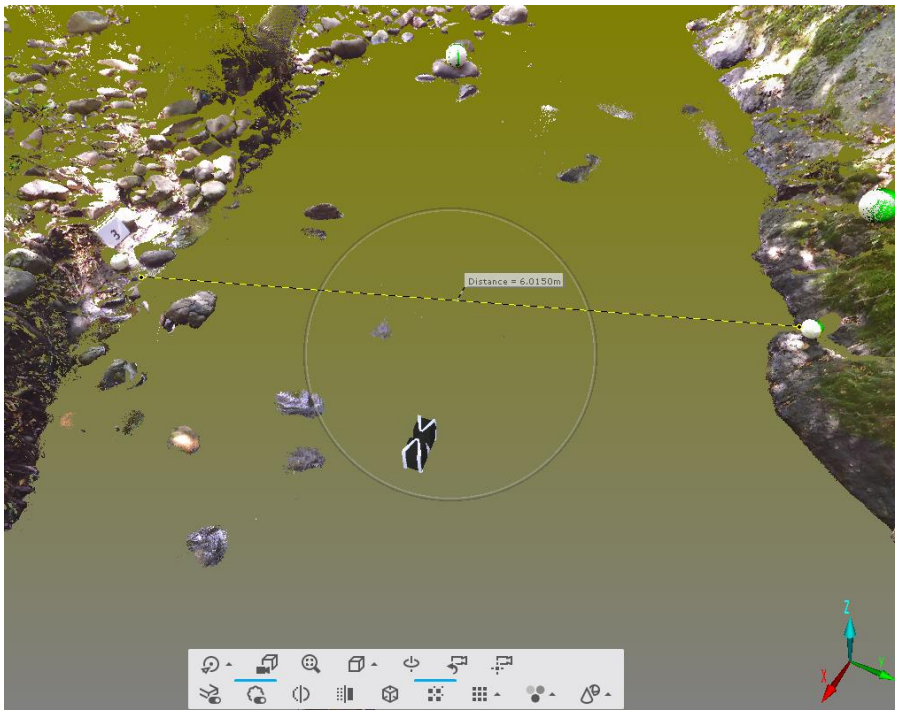


Figura 20: Ejemplo de consulta en Faro Scene de la distancia entre márgenes de un transecto

A continuación, se realiza la consulta de las coordenadas de ambas orillas, debiendo ser la z de ambos puntos aproximadamente la misma. Conocidas las coordenadas de ambos puntos y la distancia y profundidad de cada punto registrado con el correntímetro,

mediante la formulación trigonométrica se dota de coordenadas a todos los puntos del transecto (Figura 20):

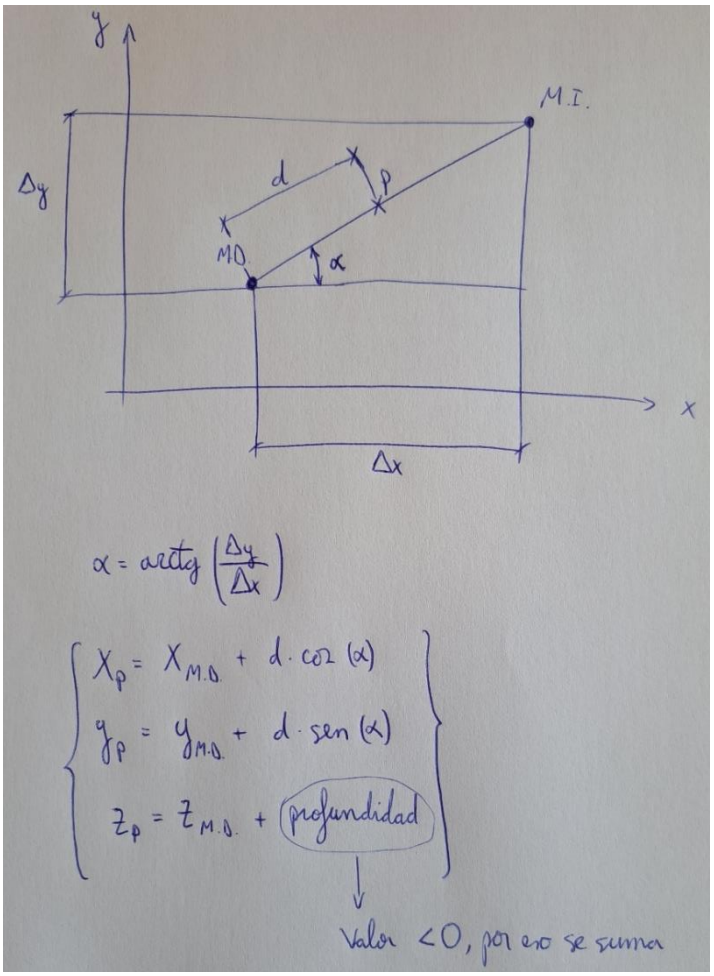


Figura 21: Formulación empleada para la obtención de coordenadas de los puntos de los transectos medidos con el correntímetro

En la figura 21, el ángulo α nos indica la dirección del transecto respecto al sistema de referencia, X_P y X_{MD} son las coordenadas X (m) del punto genérico P del transecto y del margen derecho, Y_P e Y_{MD} son las coordenadas Y (m) del punto genérico P del transecto y del margen derecho, Z_{MD} y Z_P son las coordenadas Z (m) del punto genérico P del transecto y del margen derecho, la profundidad es la registrada por el correntímetro y "d" es la distancia ("Track (m)") al punto P desde el margen de inicio (en el croquis de la ilustración sería el derecho).

Hecho esto, nuestro transecto de la poza quedará referido a la nube de puntos del láser escáner. Por comodidad, la información de estos puntos se copiará al archivo de texto de la nube de puntos ETT/GPS, una vez esta haya sido referida al mismo sistema de referencia que la nube de puntos del láser escáner, como se explica en la siguiente subsección.

2.3.3- Unificación de coordenadas y alineación de la nube de puntos de topografía obtenida con ETT/GPS a la nube de puntos de láser escáner

Haciendo uso del programa CloudCompare, se procedió a solapar la nube de puntos obtenida con ETT/GPS con la nube de puntos de láser escáner (Figura 22). El número mínimo de puntos de referencia comunes es 4. Como norma general, se toman como referencia las dianas comunes en ambas nubes, logrando una precisión en el solape muy alta.

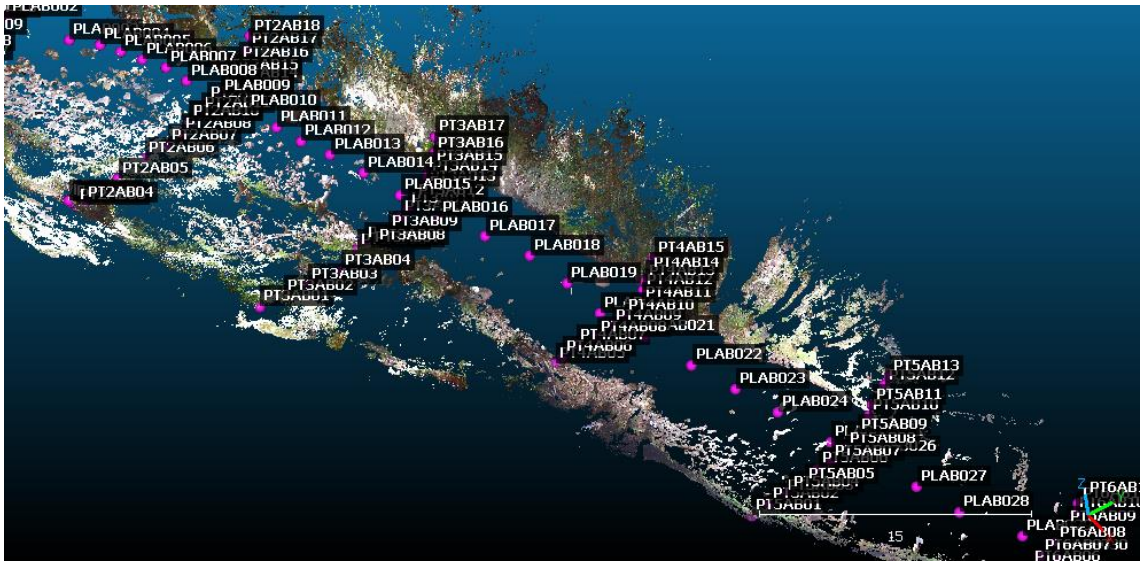


Figura 22: Detalle del solape de ambas nubes en el azud de la depuradora

Sin embargo, si no se dispone de suficientes dianas (como en el caso del azud de la ferrería), se utilizan como referencia los puntos de las márgenes de los transectos, es decir, las coordenadas de los puntos así identificados con su etiqueta en la nube de puntos de ETT/GPS con los puntos a consultar del láser escáner cercanos a las esferas de diámetro 15 cm que marcan los límites de la parte emergida del transecto.

2.4- Alineación de la topografía completa de las situaciones pre y post derribo

Una vez hemos generado una única nube de puntos unificando las coordenadas de los Laser escáner, ETT/Antena GPS y River Surveyor en la situación pre y postderribo de cada tramo de estudio, el siguiente paso requiere solapar las nubes de puntos de cada situación para poder realizar las posteriores comparaciones. Esta tarea se realizó mediante el programa CloudCompare, tomando como referencia las dianas dispuestas en campo y (si fuera estrictamente necesario) puntos del talud o de roca madre que permanecen invariables tras el derribo del azud.

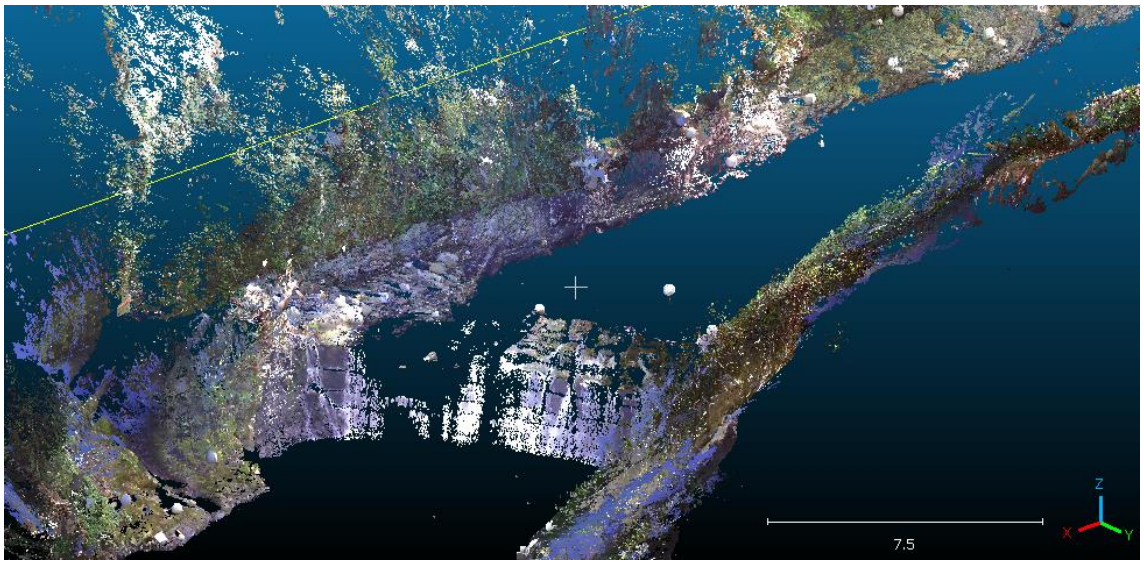


Figura 23: Ejemplo de solape de nube de puntos de láser escáner en el azud de la depuradora (se aprecia la zona socavada aguas arriba del azud)

Es de destacar el gran nivel de solape (Figura 23) entre las nubes de puntos de las situaciones pre y post derribo del azud de la depuradora. En cambio, en el caso de la ferrería no se consigue tanta precisión debido a los grandes cambios producidos aguas arriba del azud y la gran pérdida de puntos de referencia. No obstante, se utilizaron otros puntos de referencia comunes, por ejemplo, puntos visibles en grandes rocas del cauce que permanecieron invariables, que permitieron generar una precisión de solape adecuada para los objetivos del trabajo.

2.5- Comparación de situaciones pre y post derribo

2.5.1- Comparación de mallas

Para visualizar los cambios producidos entre las situaciones pre y post derribo de ambos azudes se empleó la herramienta "Inspect: mesh vs mesh" que nos proporciona el programa Leica Cyclone 3DR. El resultado de esta herramienta es un mapa de colores sobre la malla post derribo de ambas localizaciones en función de la ganancia o pérdida de cota debido al arrastre o acumulación de sedimentos.

2.5.2- Comparación de transectos

Para la extracción de datos topográficos de los transectos se intersecaron las mallas tridimensionales ya alineadas con planos verticales en la localización de cada transecto mediante el empleo del programa Cyclone 3DR. Esta intersección arrojó como resultado dos perfiles transversales, que se editaron en colores distintos para la distinción de las situaciones pre y post derribo.

Además, haciendo uso del programa Civil 3D y de las nubes de puntos de ETT/GPS de la parte sumergida del cauce, se confeccionaron los perfiles longitudinales, los cuales recorren el tramo completo del río aproximadamente por la parte más profunda del mismo. Para la obtención de los mismos se siguió una alineación única que se intersecó con la malla tridimensional de ambas situaciones, de tal manera que dichos perfiles

siguen a priori el mismo camino (es decir, sus coordenadas "x" e "y" son comunes en las situaciones pre y post derribo y únicamente cambia su cota).

2.5.3- Análisis del volumen de sedimentos movilizados

La movilización de sedimentos se cuantificó empleando, de nuevo, el programa Cyclone 3DR mediante la herramienta "Cut and fill" (la cual calcula los volúmenes encerrados entre las mallas de las situaciones pre y post derribo).

El volumen calculado mediante este procedimiento depende de cuán refinada haya quedado la malla TIN y, evidentemente, de lo bueno que haya sido el solape de las nubes de puntos. Además, hay zonas con gran cantidad de puntos donde dicha malla habrá quedado muy bien modelizada y otras zonas donde la escasez de puntos en el talud y/o el cauce habrá llevado a una modelización más grosera, arrojando unos volúmenes menos precisos.

Por ello, para contrastar resultados, también se han calculado los volúmenes de sedimentos movilizados teniendo en cuenta las distancias entre transectos y el área erosionada (como ocurre aguas arriba del azud) o sedimentada (como ocurre aguas abajo del azud), siendo el volumen: $V = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} * d$. Donde "$S_i$" es la sección (erosionada o sedimentada) de un transecto (m^2) entre las situaciones pre y post derribo, "S_{i+1}" es la sección del transecto siguiente (m^2) y "d" es la distancia entre los dos transectos (m).

3- Resultados y discusión

La respuesta hidromorfológica de ambos tramos de río tras la demolición de los azudes es bastante rápida. Tras menos de un año, tiempo suficiente para que se produjeran las crecidas invernales y primaverales típicas de los ríos cantábricos, las grandes cantidades de sedimentos que se acumulaban aguas arriba de los azudes fueron arrastradas aguas abajo, rellenando la poza y redistribuyéndose a lo largo del lecho o transportándose aguas abajo. Es decir, como era esperable, se generaron importantes zonas de socavación del cauce en la zona aguas arriba de los azudes y de depósito de los acarreos y/o transporte de sedimentos finos en las zonas aguas abajo (Ollero et al. 2014).

3.1- Comparación de mallas

- **Azud de la depuradora**:

En el caso del azud de la depuradora, los cambios tras la eliminación del azud fueron muy significativos. Como se aprecia en la Figura 24, aguas arriba del azud (mitad derecha de la imagen) se observa una incisión severa en el cauce, con valores de pérdida de cota de hasta 1'5 m en las proximidades del mismo, que se va reduciendo progresivamente hacia aguas arriba hasta los 15 ó 20 cm en la parte más alejada del tramo.

En este tramo aguas arriba del azud esta movilización de sedimentos dejó al descubierto gran parte del talud de roca, sobre todo en la margen derecha. De la mitad del cauce

hacia la margen izquierda quedó un pequeño depósito de sedimentos, sobre todo de cantos rodados y grava gruesa.

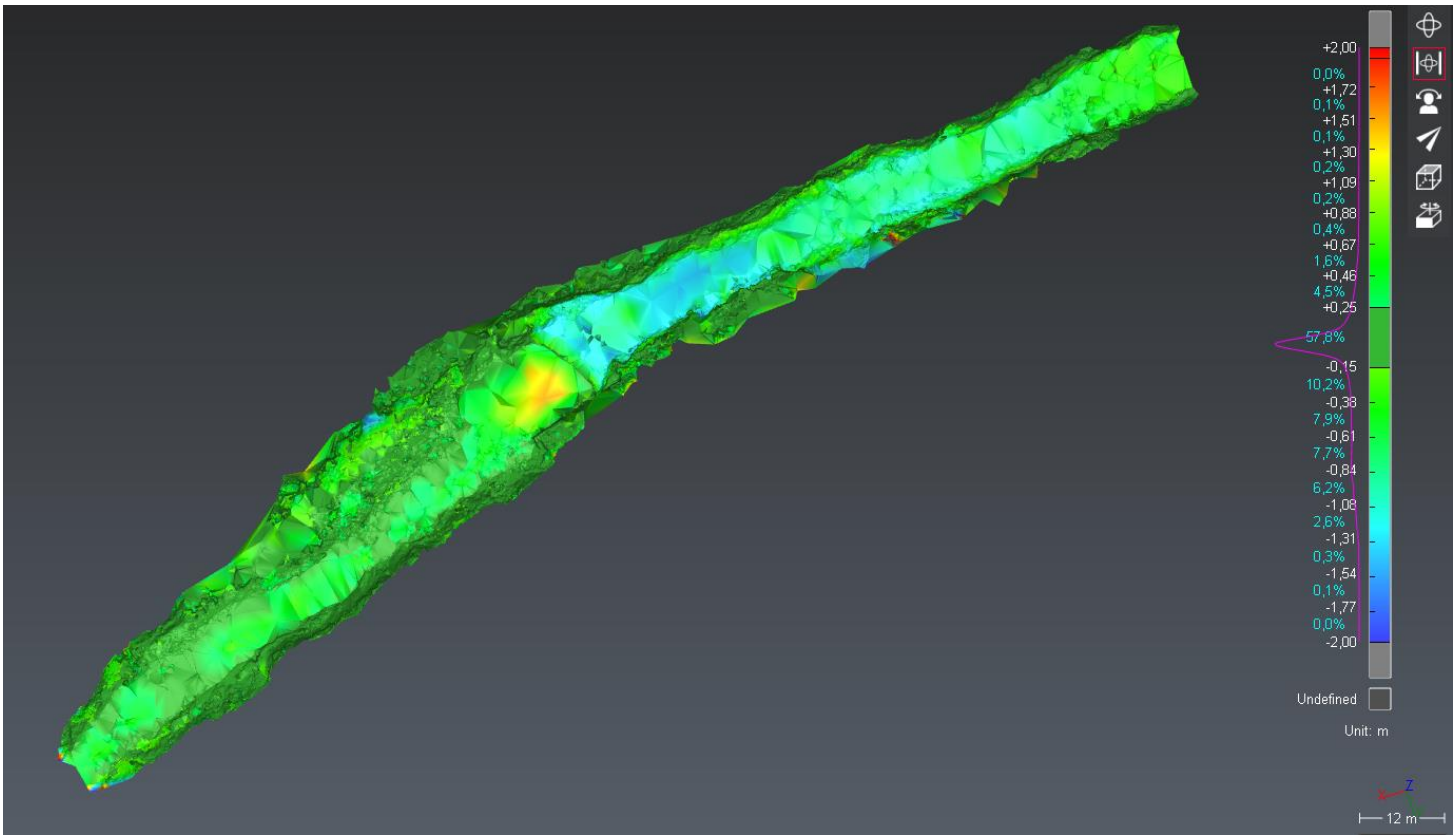


Figura 24: Malla post derribo del azud de la depuradora coloreada en función de la pérdida o ganancia de cota, en comparación a la situación pre derribo

Por el contrario, en la parte de aguas abajo del azud derribado, es decir, hacia la izquierda de la malla (Figura 24), el principal cambio observado es la desaparición de la poza debido a la sedimentación de la grava y cantos rodados procedentes desde aguas arriba. Además, se produce la elevación de cota a lo largo del cauce de entorno a los 30 ó 40 cm, sobre todo de la zona originalmente más profunda.

- **Azud de la ferrería:**

El tramo afectado por el azud de la ferrería experimentó cambios mayores que en el tramo de la depuradora, sobre todo aguas arriba de donde se localizaba el obstáculo. La demolición del azud no sólo repercutió en una gran movilización de sedimentos, sino en la caída al río de numerosos árboles que habían crecido a lo largo de los años sobre el talud próximo al cauce. Este hecho supuso la pérdida de todos los puntos de referencia de la mitad superior del tramo estudiado, convirtiéndolo, además, en casi irreconocible a simple vista y bastante difícil de recorrer.

Como se aprecia en la Figura 25, la socavación del cauce aguas arriba del azud (mitad derecha de la malla, en tonos azules) llega a valores de casi 3 metros, que disminuyen progresivamente según remontamos el tramo, tendiendo a la estabilización en su parte más alta (valores aproximados de 15 cm). Dicha socavación tiende a ser mayor hacia la margen derecha del cauce.

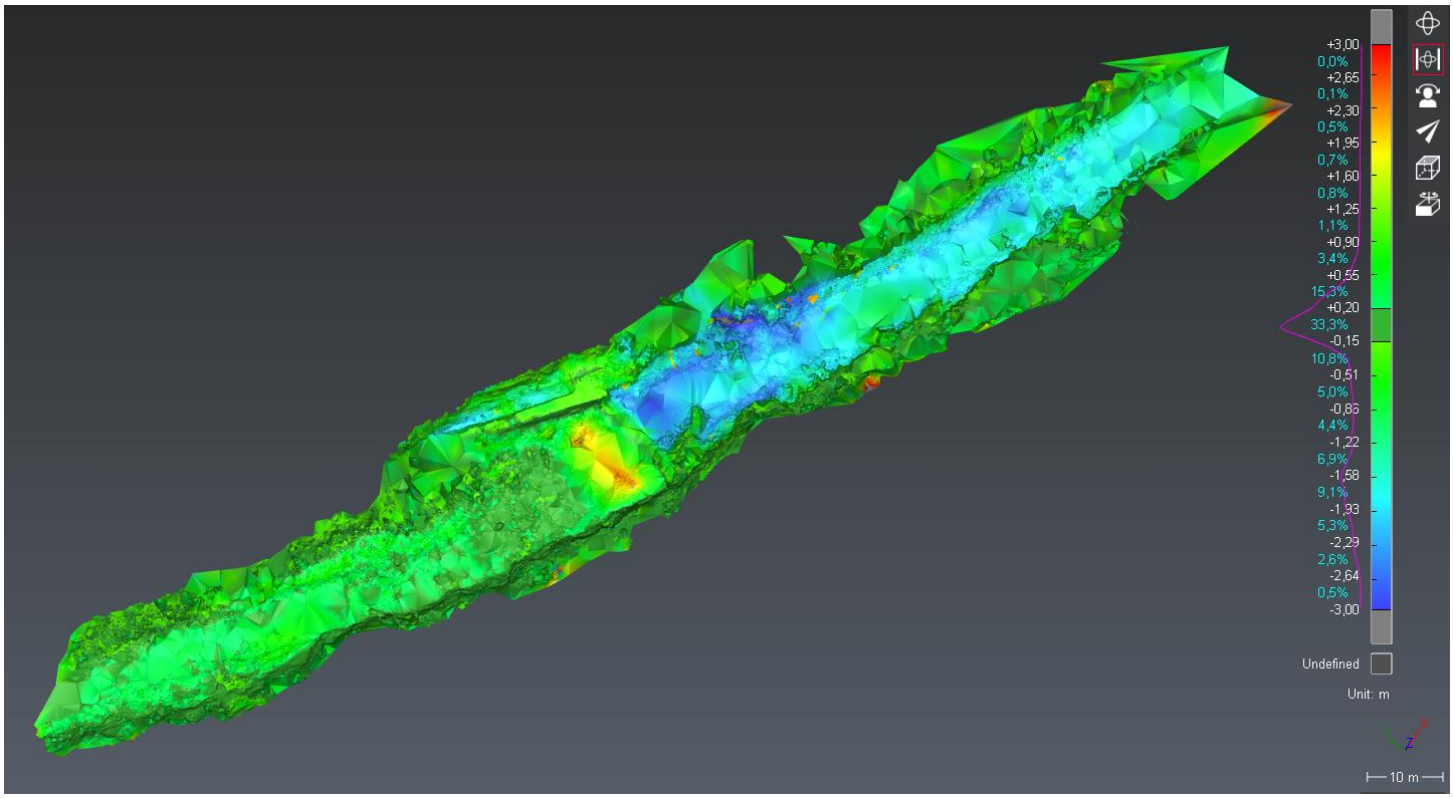


Figura 25: Malla post derribo del azud de la ferrería coloreada en función de la pérdida o ganancia de cota, en comparación a la situación pre derribo

Aguas abajo, y de manera paralela a los resultados obtenidos en el otro tramo fluvial estudiado, la poza inmediatamente agua abajo del azud derribado se ha visto rellenada con sedimentos, que llegan a subir la cota del cauce en valores cercanos a los 2 metros. Seguidamente en dirección hacia aguas abajo, se observa un tramo de 10 m de longitud aproximadamente donde la variación es prácticamente nula, para continuar con elevaciones de la cota del cauce de valores aproximados entre 20 y 50 cm respecto de la situación pre derribo. Estas elevaciones de cota del cauce se producen también a lo largo del *thalweg*, y quedan reflejadas a lo largo de los perfiles longitudinales, como se verá en la sección 3.2.

3.2- Comparación de transectos y perfil longitudinal

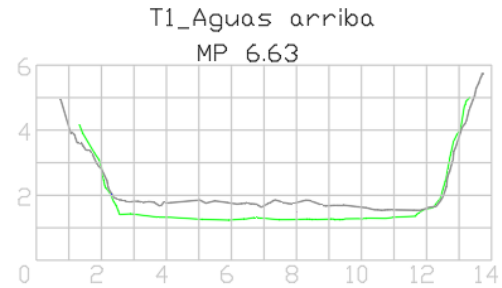
- **Azud de la depuradora:**

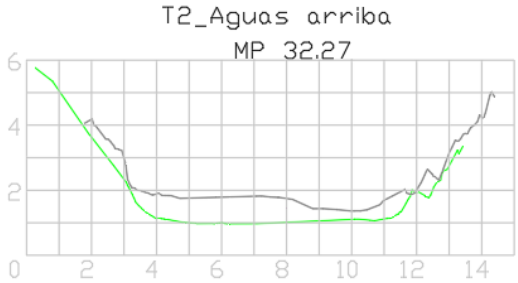
El análisis de la localización de los transectos ha puesto de manifiesto, en primer lugar, el buen solape de las nubes de puntos de las situaciones pre y post-derribo, quedando reflejado en la coincidencia de los transectos en aquellos puntos donde no ha habido variación tras el derribo del azud (Figura 26). Sin embargo, en el transecto 3 aguas arriba se ve una gran diferencia de su sección transversal, ya que en la situación post derribo no se pudieron capturar sufrientes puntos de ese emplazamiento, resultando en una triangulación de la malla mucho más imprecisa. Esto pudo haber sido debido a la sombra arrojada por la vegetación situada entre el láser escáner y el talud, o a haber dejado demasiada distancia entre un escáner y el siguiente.

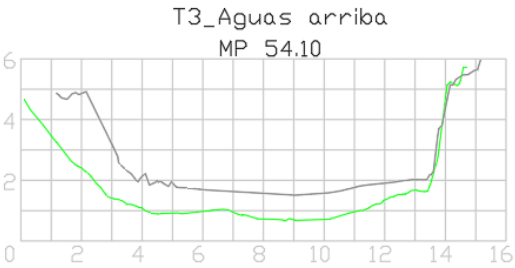
En análisis de los transectos indican una tendencia a la incisión del *thalweg* en los transectos aguas arriba del obstáculo (T5, T4, T3 y T2) que va disminuyendo a medida que nos alejamos del azud. Esta tendencia se podrá corroborar (o no) cuando se termine de derribar el pequeño escalón que aún mantiene inmóviles algunos sedimentos y transcurra, al menos, un año.

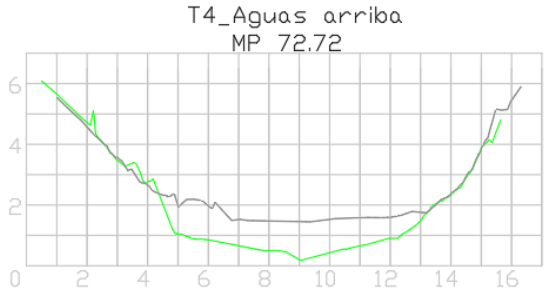
Este análisis también ha puesto de manifiesto una clara acreción del lecho en el tramo aguas abajo del azud derribado, de entre 10 y 60 cm aproximadamente, dependiendo del lugar. También se observa la formación de alguna pequeña barra de sedimentos en la margen derecha, sobre todo en los transectos T3, T4 y T5. Al contrario que aguas arriba, una característica común a estos transectos es la tendencia a la horizontalización del *thalweg*, es decir, la homogenización de las profundidades en el transecto y una menor incisión en un punto determinado.

Por último, en general, en los extremos de cada transecto se aprecian sensibles diferencias en las secciones debido a que cuanto más nos alejamos del centro del cauce (donde se colocó el láser escáner) menos puntos se radian y más grosera es la triangulación de la malla. Esta información es irrelevante para nuestro caso, ya que en la realidad no hay ningún cambio en la geometría de los transectos en puntos tan lejanos al agua.









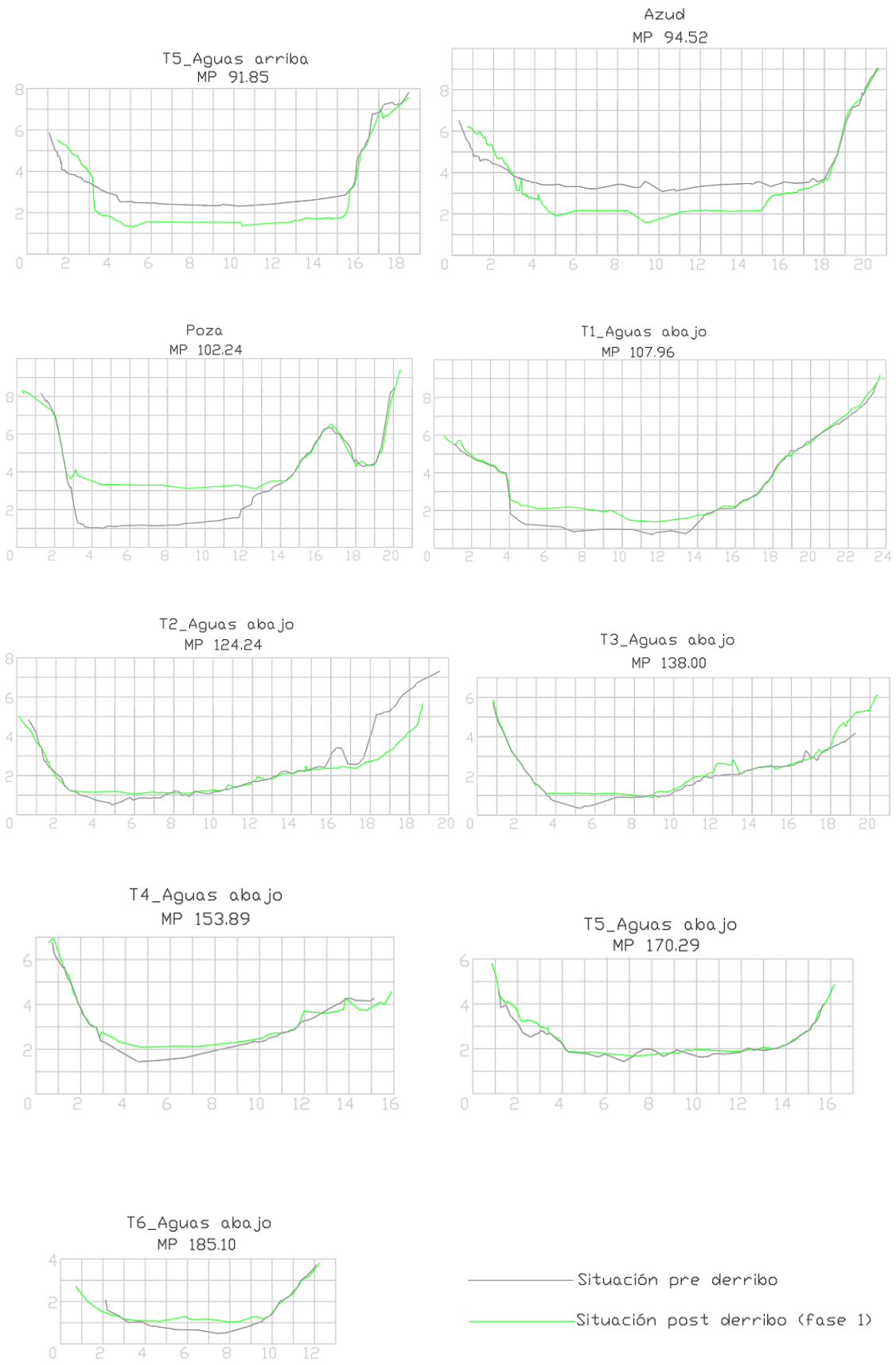


Figura 26: Transectos antes y después del derribo, fase 1, del azud de la depuradora (medidas en metros). Margen izquierda – Margen derecha

En lo que se refiere a los cambios en el perfil longitudinal (Figura 27), como ya se observaba en la comparación de mallas, la pérdida de cota aguas arriba del azud se compensa con una acreción a lo largo del cauce aguas abajo del mismo, localizándose la diferencia más notable precisamente a lo largo del *thalweg*.

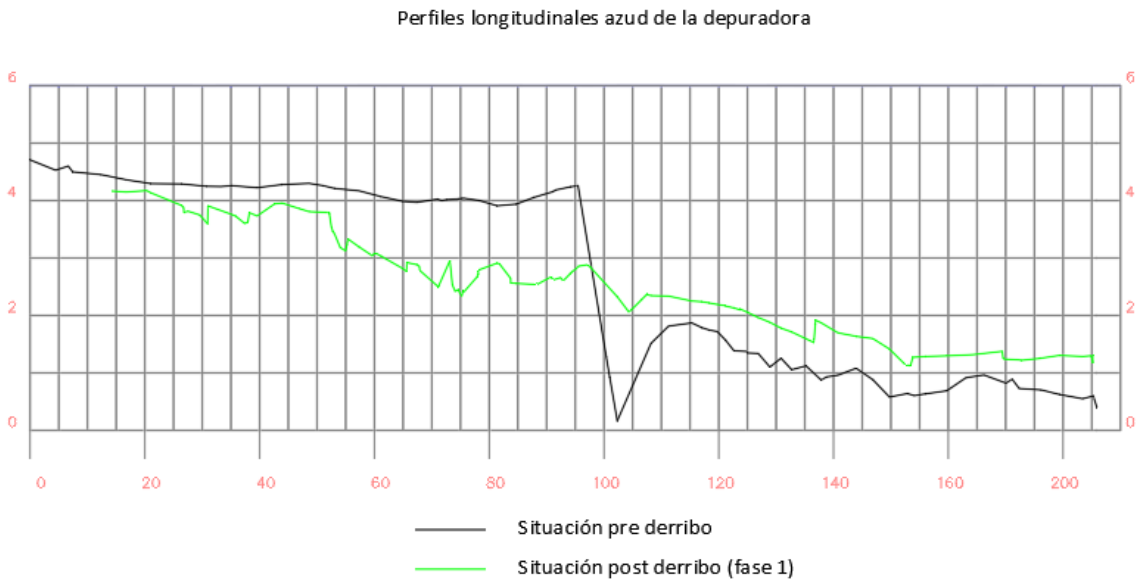


Figura 27: Comparación de perfiles longitudinales de las situaciones pre y post derribo (fase 1) del azud de la depuradora, aguas arriba – aguas abajo (medidas en metros)

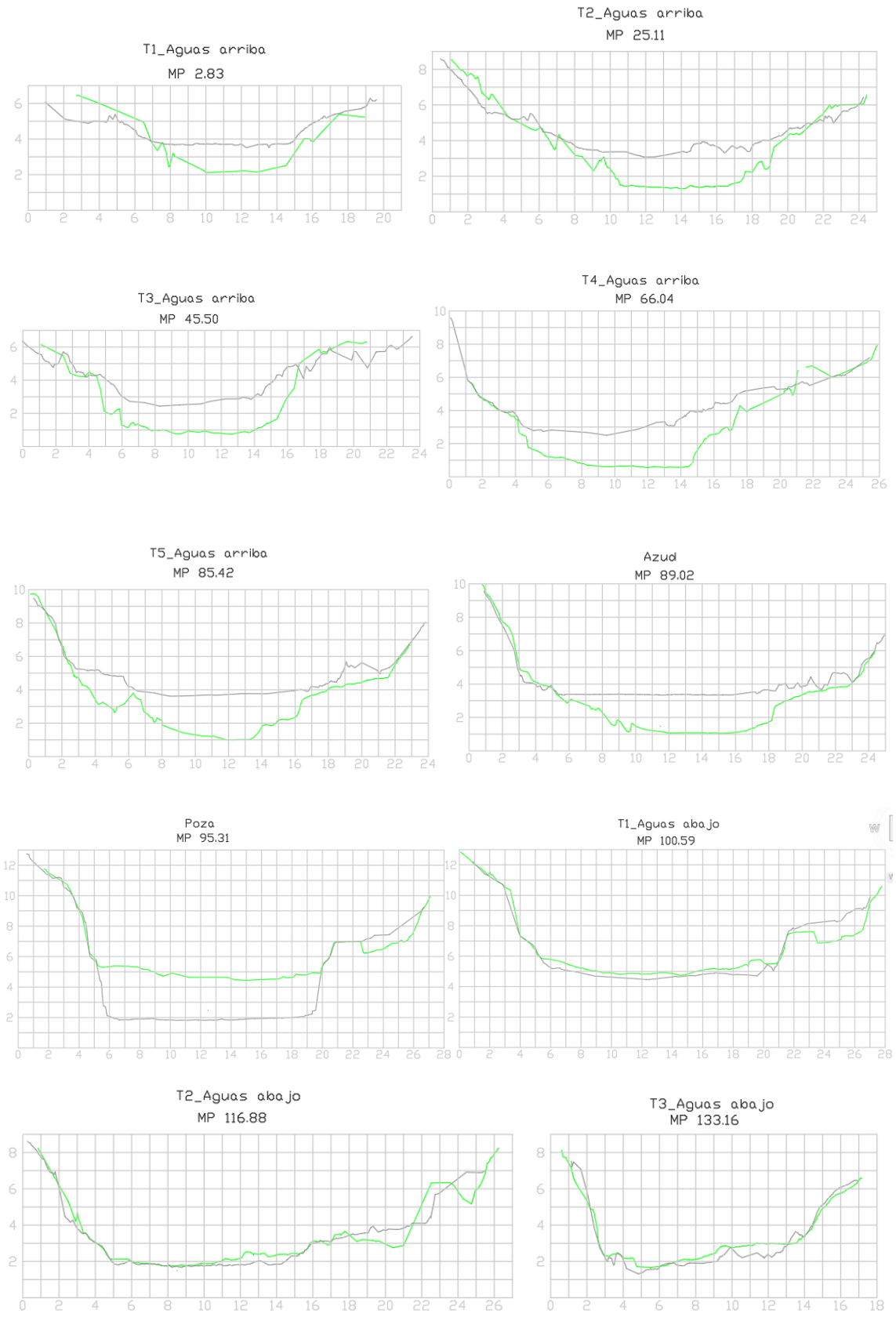
- **Azud de la ferrería**:

En análisis de la localización de los transectos (Figura 28) indica que existen grandes diferencias en los dos transectos localizados más aguas arriba del azud (T1 y T2). No obstante, estas diferencias pueden ser no sólo debidas a los cambios consecuencia al arrastre de sedimentos, sino también a un problema de caracterización del tramo relacionado con la escasez de puntos capturados en esa zona. En este sentido, durante el escaneo de ese último emplazamiento se produjo un fallo en el láser escáner que impidió recuperar la información topográfica. A pesar de ello, se completó de manera satisfactoria una relativamente buena cobertura del terreno.

Según avanzamos hacia aguas abajo y nos acercamos al emplazamiento del azud derribado, el solape de mallas es muy bueno. Los análisis muestran que se acentúa la incisión en el cauce, alcanzando valores de 2’5 m (T5 aguas arriba y azud). Así mismo, se intuye, aunque no de manera completamente clara, una tendencia de localización del *thalweg* hacia la derecha en el tramo aguas arriba del azud, que es posible que se acentúe con el paso del tiempo.

Por su parte, en el tramo aguas abajo del azud se observa que la poza gana cota, rondando valores de 3 m. Seguidamente, se produce una pequeña acreción de sedimentos en los transectos T1, T2 y T3 aguas abajo, en especial en sus márgenes derechas que rondan valores de entre 30 y 40 cm, con máximos en torno a los 80 cm. En los puntos más alejados del cauce también se aprecian diferencias, pero estas son debidas a los errores de triangulación de las mallas, no a la movilización de sedimentos.

En los transectos T4 y T5 aguas abajo, la ganancia de cota también se encuentra entre valores de 30 a 50 cm, pero se produce a lo ancho del cauce, sin mostrar zonas de preferencia.



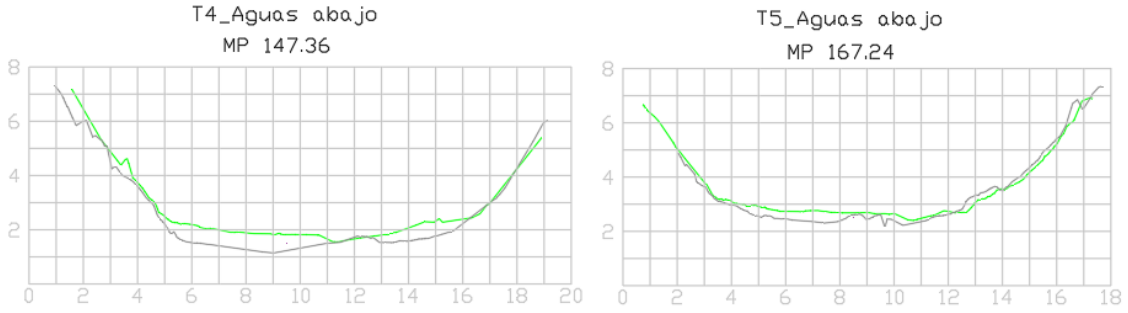


Figura 28: Transectos antes y después del derribo del azud de la ferrería (medidas en metros). Margen izquierda – Margen derecha

Por su parte, el perfil longitudinal presenta pérdidas de cota muy importantes entre el azud y el punto más aguas arriba, aunque en esta zona más alejada del azud, como se ha comentado, hay falta de puntos radiados, es decir, faltaría un área de unos 20 ó 25 m de longitud a añadir aguas arriba donde, en teoría, la diferencia entre perfiles debería disminuir.

Hacia aguas abajo se aprecia un tramo de unos 15 m donde se erosionó una pequeña barra, guardando cierta correlación con la desaparición de la poza. Esta forma de barra de sedimento puede actuar como control hidráulico. Seguidamente, se da paso al tramo inferior, con ganancias de cota que se acercan a los 80 cm en los casos máximos.

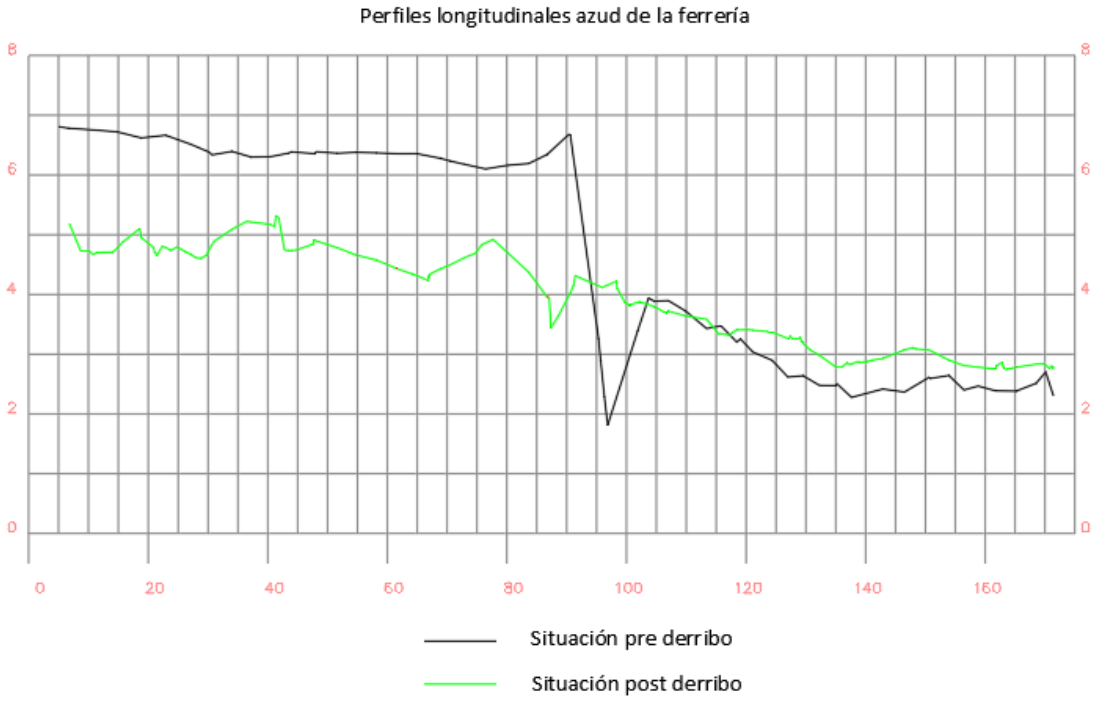


Figura 29: Comparación de perfiles longitudinales de las situaciones pre y post derribo del azud de la ferrería, aguas arriba – aguas abajo (medidas en metros).

3.2- Análisis del volumen de sedimentos movilizados

- **Azud de la depuradora**:

Al comparar las mallas TIN de las situaciones pre y post derribo en Cyclone 3DR, se ha llegado a unos resultados de 929 m^3 de erosión y 410 m^3 de sedimentación. Sin embargo,

estos resultados están directamente afectados por factores externos como puntos capturados lejanos al centro del cauce que nos aportan información irrelevante.

Por ello, también se ha procedido a calcular dichos volúmenes a partir de las secciones transversales (Tabla 2):

Transecto	Distancia al anterior transecto (m)	Área (m^2)	Sedimentación/erosión	Volumen entre transectos (m^3)
T1 aguas arriba	0	4.015	Erosión	
T2 aguas arriba	25.64	5.971	Erosión	128
T3 aguas arriba	21.83	12.979	Erosión	207
T4 aguas arriba	18.62	8.234	Erosión	197
T5 aguas arriba	19.13	11.656	Erosión	190
Azud	2.67	15.938	Erosión	37
Poza	7.72	19.876	Sedimentación	
T1 aguas abajo	5.72	8.485	Sedimentación	81
T2 aguas abajo	16.28	1.823	Sedimentación	84
T3 aguas abajo	13.76	3.191	Sedimentación	34
T4 aguas abajo	15.89	3	Sedimentación	49
T5 aguas abajo	16.4	0.79	Sedimentación	31
T6 aguas abajo	14.81	2.52	Sedimentación	25
			Erosión total	**759**
			Sedimentación total	**304**

Tabla 2: Cálculo de volúmenes en el azud de la depuradora

En este caso se obtiene una menor estimación de los volúmenes movilizados, siendo ésta la que se acepta como más cercana a la realidad, ya que está sometida a un menor grado de incertidumbre, por el motivo comentado con anterioridad.

Se observa una distribución con tendencia a la baja de los sedimentos depositados aguas abajo del azud, como también pasa en el azud de la ferrería, siendo este volumen total de la mitad del erosionado. Esto significa que el volumen restante se depositó más abajo del tramo delimitado, aunque con el analizado es suficiente para estudiar estos cambios, como bien se observa en el perfil longitudinal.

- **Azud de la ferrería**:

La herramienta "Cut and fill" arrojó unos resultados de 2539 m^3 de volumen erosionado y 1045 m^3 de volumen sedimentado, lo cual, a priori es bastante elevado. Esto se puede deber a la gran cantidad de vegetación caída sobre el cauce en la mitad superior del tramo que arrojó bastante sombra sobre el talud de puntos radiados.

Sin embargo, al calcularlo como se explica en el punto 3, se obtuvieron estos resultados (Tabla 3):

Transecto	Distancia al anterior (m)	Área (m^2)	Sedimentación/erosión	Volumen entre transectos (m^3)
T1 aguas arriba	0	11	Erosión	
T2 aguas arriba	22.28	19.074	Erosión	335
T3 aguas arriba	20.39	21.189	Erosión	410
T4 aguas arriba	20.54	28.618	Erosión	512
T5 aguas arriba	19.38	34.203	Erosión	609
Azud	3.6	31.518	Erosión	118
Poza	6.29	37.273	Sedimentación	
T1 aguas abajo	5.28	5.532	Sedimentación	113
T2 aguas abajo	16.29	1.939	Sedimentación	61
T3 aguas abajo	16.28	3.246	Sedimentación	42
T4 aguas abajo	14.23	4.825	Sedimentación	57
T5 aguas abajo	19.88	1.945	Sedimentación	67
			Total erosión	**1984**
			Total sedimentación	**340**

Tabla 3: Cáculo de volúmenes en el azud de la ferrería

Estos volúmenes son los que también se admiten como razonables, ya que es la mejor aproximación, teniendo en cuenta los errores propios de triangulación de la malla, y más teniendo en cuenta la enorme cantidad de vegetación que arrojó bastante sombra a la hora de capturar los puntos con láser escáner.

Los transectos del azud y el 5 aguas arriba fueron los que mayores cambios sufrieron, por ser los más cercanos a la barrera, lugar donde más sedimentos se acumulan. Por su parte, aguas abajo de la barrera el transecto que más varió fue el de la poza, rellenándose hasta alcanzar la nueva situación de equilibrio.

4- Conclusiones

El presente trabajo aporta una metodología de toma de información y procesado de datos topográficos para el seguimiento de los cambios hidromorfológicos de tramos afectados por el derribo de azudes, que se ha demostrado eficaz en ambas localizaciones. En líneas generales, el comportamiento post-derribo de los dos tramos fluviales estudiados ha sido coherente con lo que se esperaba de acuerdo con la consulta de bibliografía previa.

No obstante, también es importante mencionar que esta metodología, aunque estaba basada en bibliografía y experiencias previas, ha sido probada por primera vez para este estudio, en el marco del proyecto LIFE-DIVAQUA. Por tanto, esta metodología es susceptible de mejoras. Por ejemplo, dada la gran precisión obtenida con la antena GPS y la gran cantidad de puntos que se pueden extraer con mayor facilidad que mediante el levantamiento topográfico clásico con ETT, se puede plantear no sólo sacar puntos a lo largo de los transectos previamente establecidos, sino obtener una malla completa de la topografía acuática en su totalidad. Esto permitirá complementar la información topográfica obtenida mediante láser escáner y conseguir una nube de puntos de toda la

topografía del tramo que dé lugar a la generación de la malla TIN con mucha más precisión, con lo que eso conlleva en las mediciones posteriores.

Como conclusión final, la demolición de presas obsoletas es una buena práctica en restauración fluvial, imprescindible para recuperar los procesos geomorfológicos e hidromorfológicos impactados por la construcción de estos obstáculos y con ello la morfología de equilibrio de los tramos, jugando las crecidas anuales un importante papel en la aceleración de esta restauración. Además, esta práctica permite mantener la continuidad longitudinal de todos los procesos ecológicos, en especial el movimiento de salmónidos y otras especies piscícolas y su acceso a diferentes tramos fluviales a lo largo de su ciclo de vida.

5- Bibliografía

Alvarez, J et al. 2010. *Atlas de Los Ríos Salmoneros de La Península Ibérica. Iberian Peninsula Salmon Rivers Atlas.*

Beck, J S, and G R Basson. 2003. Water Research Comission Report No. 1102/1/03, South Africa. *The Hydraulics of the Impacts of Dam Development on the River Morphology*.

García, Leandro. 2004. "Agua y Turismo: Nuevos Usos de Los Recursos Hídricos En La Península Ibérica. Enfoque General." *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*: 250.

Horreo, Jose L. et al. 2011. "Impact of Habitat Fragmentation on the Genetics of Populations in Dendritic Landscapes." *Freshwater Biology* 56(12): 2567–79.

Ibisate, A et al. 2017. "Geomorphic Monitoring of Two Dam Removals in Northern Iberian Peninsula: Methodology, Results and Lessons Learned." *EGU General …* (November 2018). http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1914558I.

Ollero, A et al. 2014. "Geomorfología Y Restauración Fluvial :" 40(1): 67–88.