



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



---

**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE  
BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE PARA LA  
RECUPERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA  
DIVERSIDAD MORFOFUNCIONAL Y LA  
BIODIVERSIDAD EN RÍOS CANALIZADOS.  
APLICACIÓN AL RÍO GUADARRAMA A SU PASO  
POR COLLADO VILLALBA.**

---

TRABAJO DE FIN DE MASTER

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ETSI MONTES, FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

**MASTER: “EL AGUA EN EL MEDIO NATURAL.  
USOS Y GESTIÓN”**

SONIA BOROWIECKA KOPACKA

2024

**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA  
DEL PAISAJE PARA LA RECUPERACIÓN Y CONSERVACIÓN  
DE LA DIVERSIDAD MORFOFUNCIONAL Y LA  
BIODIVERSIDAD EN RÍOS CANALIZADOS. APLICACIÓN AL  
RÍO GUADARRAMA A SU PASO POR COLLADO VILLALBA.**

**Autora: Sonia Joanna Borowiecka Kopacka**

**Titulación: Master. El agua en el medio natural. Usos y gestión**

**Departamento: Ingeniería y gestión forestal y ambiental**

**Directora: Leticia de Salas Regalado**

**Codirector: Guillermo Tardío Cerrillo**

**Año de presentación: 2024**

©UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, año 2024.

Todos los derechos reservados

## HOJA DE CALIFICACIÓN

TÍTULO
AUTOR / AUTORA
TITULACIÓN

### MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente	
	Fdo.
Secretario	
	Fdo.
Vocal	
	Fdo.

Reunido el Tribunal de calificación con fecha \_\_\_\_\_ ,

acuerda otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL de \_\_\_\_\_ .

Se propone la concesión de Matrícula de Honor.

Informe explicativo de calificación

## AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos son para Guillermo Tardío Cerillo, quien desde el primer momento me transmitió su entusiasmo y dedicación por realizar este Trabajo de Fin de Máster, aún sin conocerme. Su pasión por el proyecto me motivó diariamente a esforzarme al máximo y me proporcionó valiosos conocimientos que, sin duda, aprovecharé en mi futuro profesional. Agradezco enormemente todas las tutorías ofrecidas y las horas extra dedicadas durante la salida de campo, donde aprendí mucho sobre el tema en cuestión. Espero que en el futuro tengamos la oportunidad de colaborar nuevamente en algún proyecto.

Mi agradecimiento también es para Leticia de Salas Regalado, no solo por aceptar la dirección de este proyecto, sino también por su apoyo continuo a lo largo de todo su desarrollo y por el tiempo dedicado a las tutorías, que sin duda, han guiado correctamente el presente trabajo. Sé que no fue un camino fácil, pero sus recomendaciones y orientación fueron esenciales para superar los desafíos y alcanzar una versión enriquecida de mi trabajo. Estoy convencida de que sin su acompañamiento, no habría podido alcanzar los mismos resultados con el nivel de calidad logrado.

A mi pareja, le agradezco por estar siempre disponible, por dedicar tiempo a leer el proyecto, ofrecerme sus valiosas opiniones y por escuchar pacientemente mis numerosas presentaciones. Gracias por tu infinita paciencia, comprensión y generosidad.

Por último, a mis padres, a quienes les debo todo, como siempre, han sido mi mayor apoyo. Sin ellos, no estaría donde estoy ahora.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL Y  
DEL MEDIO NATURAL

**Título del proyecto:** Análisis y aplicación de técnicas de bioingeniería del paisaje para la recuperación y conservación de la diversidad morfofuncional y la biodiversidad en ríos canalizados. Aplicación al río Guadarrama a su paso por Collado Villalba.

**Autora del proyecto:** Sonia Joanna Borowiecka Kopacka

**Directora del proyecto:** Leticia de Salas Regalado

**Codirector:** Guillermo Tardío Cerrillo

## RESUMEN

El presente estudio aborda la problemática de la pérdida de diversidad morfofuncional y biodiversidad en ríos urbanos canalizados, tomando como caso de estudio el río Guadarrama a su paso por Collado Villalba. Para alcanzar este objetivo, se desarrolla una metodología basada en la identificación y aplicación de técnicas de bioingeniería del paisaje. El estudio se implementa en tres fases principales: situación actual, situación pre-operacional y situación post-operacional.

En la primera fase, denominada situación actual, se realiza una modelización hidráulica detallada del estado actual del río, caracterizado por un canal encajonado en hormigón. Esta modelización inicial permite diagnosticar el problema existente y determinar las áreas prioritarias de intervención, así como las técnicas de bioingeniería más adecuadas para cada tramo del río.

La fase pre-operacional implica la modificación del cauce del río para conferirle una apariencia y funcionalidad más natural. Este proceso incluye la remoción de la solera de hormigón, con el objetivo de establecer una nueva base sobre la cual se aplicarán las técnicas de bioingeniería. En esta etapa, se calculan los valores de calado y velocidad del flujo, parámetros esenciales para el correcto dimensionamiento y efectividad de las intervenciones de bioingeniería.

Finalmente, en la fase post-operacional, se evalúan las hipótesis planteadas en las fases anteriores mediante un análisis comparativo de las condiciones actuales y las condiciones post-intervención. Se analizan las mejoras logradas en términos de diversidad hidrodinámica, conectividad ecológica y biodiversidad. Los resultados obtenidos permiten validar la eficacia de las técnicas de bioingeniería aplicadas. Se espera que este estudio pueda conformar una base replicable para la restauración y conservación de otros ríos de características similares.

**Palabras clave:** Pérdida de diversidad morfofuncional, técnicas de bioingeniería, modelización hidráulica

## ABSTRACT

This study addresses the problem of the loss of morphofunctional diversity and biodiversity in channelled urban rivers, taking as a case study the Guadarrama River as it passes through Collado Villalba. To achieve this objective, a methodology based on the identification and application of landscape bioengineering techniques is developed. The study is implemented in three main phases: current situation, pre-operational situation and post-operational situation.

In the first phase, known as the current situation, a detailed hydraulic modelling of the current state of the river, characterised by a channel encased in concrete, is carried out. This initial modelling makes it possible to diagnose the existing problem and determine the priority areas for intervention, as well as the most appropriate bioengineering techniques for each section of the river.

The pre-operational phase involves the modification of the river channel to give it a more natural appearance and functionality. This process includes the removal of the concrete base, with the aim of establishing a new base on which the bioengineering techniques will be applied. At this stage, the values of draught and flow velocity are calculated, essential parameters for the correct sizing and effectiveness of the bioengineering interventions.

Finally, in the post-operational phase, the hypotheses raised in the previous phases are evaluated by means of a comparative analysis of the current conditions and the post-intervention conditions. The improvements achieved in terms of hydrodynamic diversity, ecological connectivity and biodiversity are analysed. The results obtained allow validation of the effectiveness of the bioengineering techniques applied. It is hoped that this study can form a replicable basis for the restoration and conservation of other rivers with similar characteristics.

**Keywords:** Loss of morpho-functional diversity, bioengineering techniques, hydraulic modelling

# ÍNDICE

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	4
3. OBJETIVOS .....	4
4. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO .....	4
4.1. Caracterización de la masa de agua .....	4
4.1.1. Localización y caracterización general .....	5
4.1.2. Problemática actual .....	7
4.1.3. Diagnóstico y posibilidades de mejora .....	9
4.2. Caracterización del tramo de estudio .....	9
4.2.1. Localización y caracterización general .....	9
4.2.2. Uso del suelo .....	11
4.2.3. Uso social .....	13
4.2.4. Régimen hidrológico. Régimen de caudales.....	14
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
5.1. Materiales .....	16
5.1.1. Técnicas de bioingeniería del paisaje.....	16
5.1.2. Modelo hidráulico. Selección del software y tipo de modelo.....	20
5.2. Metodología .....	22
5.3. Situación actual.....	23
5.3.1. Preparación del modelo.....	23
5.3.2. Selección de los tramos de estudio y de las técnicas de bioingeniería a utilizar. .....	27
5.3.3. Síntesis de la situación actual.....	37
5.4. Situación pre-operacional.....	38
5.4.1. Preparación del modelo.....	38
5.4.2. Análisis del resultado del modelo. Situación pre-operacional. ....	40
5.4.3. Dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería seleccionadas .....	42
5.4.4. Síntesis de la situación pre-operacional.....	51
5.5. Situación post-operacional .....	52
5.5.1. Preparación del modelo.....	52
5.5.2. Análisis del resultado del modelo .....	53
5.5.3. Síntesis de la situación post-operacional. ....	68

6. RESULTADO Y DISCUSIÓN .....	70
6.1. Resultado y discusión en el tramo A (curvo) .....	70
6.2. Resultado y discusión en el tramo B (recto).....	73
7. MONITOREO Y SEGUIMIENTO .....	80
8. CONCLUSIONES .....	83
9. BIBLIOGRAFÍA .....	86
ANEXOS .....	89

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Beneficios que proporciona la biodiversidad hidrodinámica. Fuente: Elaboración propia ..3	
Figura 2. Cuenca Hidrográfica del Tajo y su localización dentro de España, río Guadarrama y tramo de estudio con su cuenca hidrográfica. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS a partir de la información disponible en el CNIG. ....5	
Figura 3. Cuenca hidrográfica del tramo de estudio dominada por la Sierra de Guadarrama. Se remarca la red hidrográfica que influye sobre la masa de agua ES030MSPF0404021 Río Guadarrama y Arroyo de los Linos. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS a partir de la información disponible en el CNIG ..... 6	
Figura 4. Masa ES030MSPF0404021 Río Guadarrama y Arroyo de los Linos sobre el mapa topográfico (BTN50). Fuente: Elaboración propia en ArcGIS. .... 7	
Figura 5. Localización del tramo objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia. .... 10	
Figura 6. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio 1/2. Fuente: Elaboración propia basado en la información extraída del SIOSE. .... 11	
Figura 7. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio 2/2. Fuente: Elaboración propia basado en la información extraída del SIOSE. .... 12	
Figura 8. Ejemplo del funcionamiento de la técnica subgrid integrada en el programa HEC-RAS Fuente: Elaboración propia..... 21	
Figura 9. Esquematización de la metodología aplicada. Situación actual (color naranja), situación pre-operacional (color rosa) y situación post-operacional (color verde). Fuente: Elaboración propia. .... 22	
Figura 10. Capa de usos de suelo con los valores de "n" de manning definidos. Fuente: Elaboración propia. .... 24	
Figura 11. Detalle de la malla tras elaborar las líneas de refinamiento correspondientes. Fuente: Elaboración propia ..... 25	
Figura 12. Localización de las condiciones de contorno (entrada/salida) definidas. Fuente: Elaboración propia ..... 26	
Figura 13. Mapa de valores de velocidad máxima (m/s) para un caudal constante de T2 donde se aprecia el desbordamiento resultante del efecto "ola". Fuente: Elaboración propia..... 28	
Figura 14. Mapa de valores de velocidad máxima (m/s) para un caudal constante de T2. Zonas A y B propuestas para el estudio. Fuente: Elaboración propia. .... 28	
Figura 15. Mapa de valores de tensión de fondo máximos (m/s) para un caudal constante de T2. Zonas A y B propuestas para el estudio. Fuente: Elaboración propia..... 29	
Figura 16 Ejemplo de deflector en el río Arkansas. Fuente: Richer et al., 2017 ..... 31	
Figura 17. Esquema de las hipótesis propuestas en el tramo curvo (A). A la izquierda se refleja la hipótesis A1 (deflectores de 45°) y a la derecha la hipótesis A2 (deflectores de 90°). Fuente: Elaboración propia ..... 32	
Figura 18. Ejemplo de barras laterales e islas fluviales en el río Itachi. Fuente: Nakamura (2008)... 34	
Figura 19. Ejemplo de la disposición de las hileras de rocas. Fuente: Fernández et al., 2023 ..... 34	
Figura 20. Ejemplo de rampa centradora (izq.) y doble rampa o W-weir (dcha.). Fuente: Soil & Environmental Consultants, Pa. (izq.) / Rich Marovich ..... 35	
Figura 21. Esquema de las hipótesis propuestas en el tramo recto (B) A la izquierda se refleja la hipótesis B1 y a la derecha la hipótesis B2. Fuente: Elaboración propia. .... 36	
Figura 22. Sección transversal modificada para obtener un cauce que represente la realidad. La línea gris clarita representa el cauce de hormigón, mientras que la línea con puntos negros representa el cauce natural. Fuente: Elaboración propia. .... 38	
Figura 23. Ejemplo ilustrativo del efecto de la corriente en deflectores sumergidos (derecha) y no sumergidos (izquierda). Fuente: Elaboración propia. .... 40	
Figura 24. Ejemplo de cómo se han obtenido los valores máximos de cada parámetro. El recuadro inferior izquierdo representa los valores medios, desviación estándar, mínimos y máximos del modelo completo que pueden llevar a error. Fuente: Elaboración propia..... 41	

Figura 25. Parámetros por dimensionar de un deflector visto en una sección transversal. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 26. Parámetros que definen el diseño de una serie de deflectores visto en planta. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 27. Diseño de una rampa centradora constituida por una única estructura. Fuente: Design Methods for In-Stream Flow Control Structures (2014) .....	48
Figura 28. Esquema de la disposición de las hileras de roca. Fuente: Guillermo Tardío. ....	49
Figura 29. Resultados en 3D de la incorporación de los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia. ....	52
Figura 30. Resultados en 3D de la incorporación de las técnicas de bioingeniería correspondientes a la hipótesis B1 (izquierda) y B2 (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia .....	53
Figura 31. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal $Q_5$ sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Figura 32. Cota de la lámina de agua alcanzada sobre el deflector para los distintos caudales. Justificación de un correcto dimensionamiento de lo deflectores. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Figura 33. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Figura 34. Detalle de la convergencia de la velocidad resultado de la acción de los deflectores y sus respectivas zonas de sedimentación. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 35. Detalle del efecto que se produce en la zona entre los deflectores. Fuente: Elaboración propia. ....	59
Figura 36. Sección transversal donde se representa la cota de lámina de agua obtenida en las simulaciones (T2) en el corto plazo (con arena) y la situación futura (con vegetación). Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 37. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal $Q_5$ sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. ....	61
Figura 38. Detalle del efecto que se produce sobre las hileras de piedra para un cuantil de $Q_5$ . Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 39. Detalle del efecto que se produce sobre la rampa centradora para un cuantil de $Q_5$ . Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 40. Detalle del efecto que se produce sobre la doble rampa centradora (W). A la izquierda se muestra la eficacia de la estructura mientras que a la derecha pierde eficacia con velocidades superiores a 4.2m/s. Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Figura 41. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Figura 42. Zonas potenciales de sedimentación en las rampas centradoras simples (Remarcado en rojo). Mapa de velocidad (m/s) para $Q_5$ . Fuente: Elaboración propia. ....	67
Figura 43. Zonas potenciales de sedimentación en las hileras de rocas (Remarcado en rojo). Mapa de velocidad (m/s) para $Q_5$ . Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 44. Representación de la velocidad (m/s) de la hipótesis A1 para un caudal $Q_5$ en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 45. Representación del calado (m) de la hipótesis A1 para un caudal $Q_5$ en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia .....	72
Figura 46. Representación de la velocidad (m/s) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal $Q_5$ en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia .....	74
Figura 47. Ejemplo de diversificación hidrodinámica y morfofuncional desencadenado por la isla fluvial. Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad para caudales $<Q_5$ . Fuente: Elaboración propia. ....	75

*Figura 48. Representación del calado (m) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal  $Q_5$  en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia ..... 76*

*Figura 49. Representación del calado (m) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal  $Q_{50}$  en la situación a largo plazo. Fuente: Elaboración propia. .... 78*

*Figura 50. Localización de las hipótesis propuestas para cada tramo. Fuente: Elaboración propia. 79*

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coordenadas UTM y longitud en metros que delimita cada uno de los ríos componentes del tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Distribución de caudales para cada uno de los ríos que pertenecen al tramo de estudio (aguas arriba y aguas abajo de la confluencia), en función de los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años en m<sup>3</sup>/s. Fuente: Elaboración propia basado en la información del Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Definición de los caudales de simulación Q<sub>5</sub>, Q<sub>50</sub>, T2 y T10 (m<sup>3</sup>/s), aplicando el reparto de 72%/28% para cada uno de los ríos que pertenecen al tramo de estudio Fuente: Elaboración propia basado en la información del Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba. ....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 4. Resumen de las técnicas de bioingeniería valoradas como posibles alternativas para el presente proyecto. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 5. Condiciones de contorno definidas para las simulaciones. Fuente: Elaboración propia. ...</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6. Resumen de los objetivos establecidos para cada tramo. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. Valores máximos de calado, velocidad y tensión de fondo obtenidos para los caudales seleccionados y en función del sustrato definido. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 8. Resumen de los valores calculados del dimensionamiento de los deflectores seleccionados para el tramo A. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 9. Resumen de los valores calculados del dimensionamiento de las cuatro técnicas seleccionadas del para el tramo B.. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>50</i>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Río Guadarrama a su paso por Collado Villalba antes del año 1980. Fuente: Aquí en la sierra.....</i>	<i>1</i>
<i>Ilustración 2. Río Guadarrama en la actualidad (2024). Fuente: Fotografías propias. ....</i>	<i>2</i>
<i>Ilustración 3. Fotografía tomada en el tramo de estudio donde se ve reflejado la discontinuidad, longitudinal, transversal y vertical, del cauce y de la ribera, debido al urbanismo. fuente: Fotografías propias.....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 4. Río Guadarrama al inicio del tramo de estudio, donde se localiza un parque urbano. Fuente: Ilustraciones propias.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 5. Río Guadarrama encajonado entre paredes de hormigón con vallas y jardineras que impiden las vistas al río. Fuente: Ilustraciones propias. ....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 6. Tramo natural del río Guadarrama después de atravesar el T.M. Collado Villalba. Fuente: Ilustraciones propias.....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 7. Ejemplo de deflector de roca (rock vanes). Fuente: Virginia Tech (izq.) y McCullah, J (drcha.).....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 8. Ejemplo de deflector con gancho en J (J-hook vanes). Fuente: Virginia Tech .....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 9. Ejemplo de espigón en curva (Bendway waiers). Fuente: Elaboración propia (izq.) y McCullah, J (drcha.).....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 10. Ejemplo de púa de arroyo (stream barbs). Fuente: Elaboración propia (izq.) y Virginia Tech (drcha.).....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 11. Ejemplo de rampa centradora (Cross vanes). Fuente: Virginia Tech (izq.) y David L. Rosgen (drcha.).....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 12. Ejemplo de diques. Fuente: Elaboración propia (izq.) y Deepika Sharma (drcha). ....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 13. Ejemplo de islas fluviales en el río Itachi. Fuente: Nakamura (2008) .....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 14. Ejemplo de barras laterales. Fuente: Woodland Water &amp; gardens and D. Longley ...</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 15. Idea basada en el ejemplo de rampa de flujo ascendente. Fuente: Fernández et al, (2023).....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 16. Tramo canalizado que transcurre por debajo de una glorieta. Fuente: Fotografías propias.....</i>	<i>80</i>

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

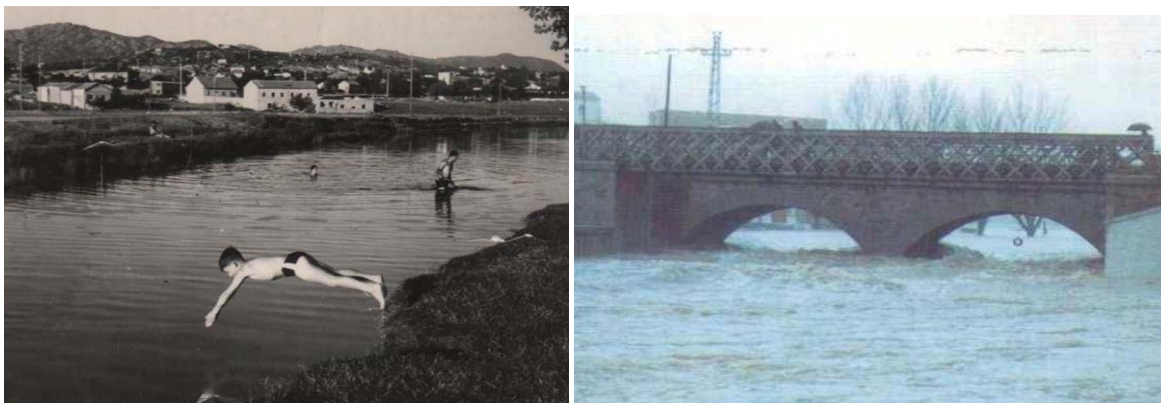
CHT – Confederación Hidrográfica del Tajo
CHD – Confederación Hidrográfica del Duero
DMA – Directiva Marco del Agua
MCO – Máxima Crecida Ordinaria
MDT – Modelo Digital de elevaciones
MDS – Modelo Digital de superficies
PHT – Plan Hidrológico del Tajo
T – Periodo de retorno

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia, los asentamientos humanos se han establecido fundamentalmente en las proximidades de los ríos, no sólo por la ventaja que supone el acceso al agua, elemento fundamental para la vida, sino también, por su capacidad para el transporte, el comercio, así como el interés paisajístico y social. No obstante, esta proximidad, ha provocado ciertos riesgos entre los que se destaca el riesgo de inundación y la alteración del ecosistema fluvial.

La zona propuesta en este estudio es el término municipal de Collado Villalba y es un claro ejemplo de expansión urbana cercana a un río; el río Guadarrama. Hasta 1980 el río Guadarrama era propenso a crecidas significativas durante periodos de precipitaciones intensas o deshielos, lo que ocasionaba inundaciones en el municipio.



*Ilustración 1. Río Guadarrama a su paso por Collado Villalba antes del año 1980. Fuente: Aquí en la sierra*

En 1980 se realiza una canalización del río, con muros verticales de hormigón para mitigar el riesgo de inundación. La canalización ha supuesto una constricción del espacio fluvial, una pérdida de la conectividad vertical y horizontal, y desde un punto de vista biológico también ha tenido efectos negativos, al reducir la diversidad tanto en cantidad como en calidad de hábitats.

En los años subsiguientes se han construido varias barreras transversales a lo largo del río. Estas barreras se diseñan con el propósito de retener láminas de agua permanente para mantener caudales mínimos. No obstante, como toda actividad humana, provocará impactos ambientales, alterando la dinámica natural del río y el ecosistema circundante.



*Ilustración 2. Río Guadarrama en la actualidad (2024). Fuente: Fotografías propias.*

La transformación del río de un elemento natural a otro completamente canalizado muestra como se ha perdido la **diversidad hidrodinámica**. Este concepto se explica como la variabilidad en los regímenes de flujo de agua, que se ven influidos por factores como la velocidad, dirección y patrones de movimiento. La diversidad hidrodinámica resulta fundamental para la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como para la prestación de servicios ecosistémicos esenciales. Influye en procesos ecológicos clave como la sedimentación, la erosión, el transporte de nutrientes y la oxigenación del agua. Estos procesos modelan la morfología del lecho de los ríos y la estructura de los hábitats acuáticos (promueven la **diversidad morfofuncional** del río), lo que afecta directamente a la biodiversidad y la disponibilidad de recursos para la fauna y flora. Además, la diversidad hidrodinámica promueve la resiliencia de los ecosistemas al proporcionar una **variedad de hábitats y condiciones ambientales** que permiten la adaptación y supervivencia de numerosas especies. Esta diversidad incrementa la capacidad de los ecosistemas para resistir perturbaciones y cambios ambientales, manteniendo su estabilidad y funcionalidad a largo plazo. La gestión adecuada de esta diversidad resulta esencial para la adaptación de los ecosistemas a los cambios globales y la degradación ambiental, lo que garantiza la sostenibilidad de los recursos hídricos y el bienestar humano. Para un análisis más profundo de la importancia de la biodiversidad hidrodinámica consultar el anexo 1.

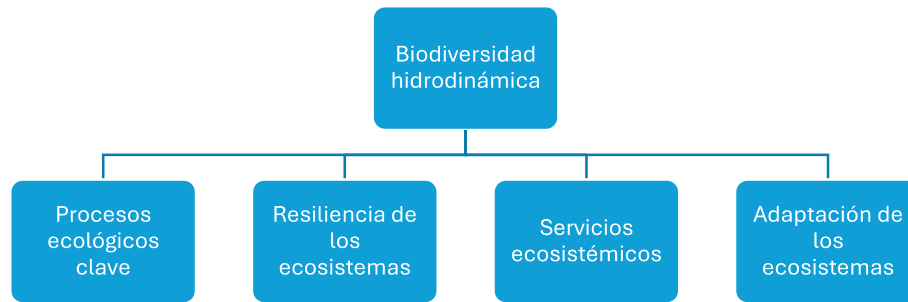


Figura 1. Beneficios que proporciona la biodiversidad hidrodinámica. Fuente: Elaboración propia

El presente proyecto surge en el ámbito del máster “El agua el medio natural. Usos y gestión” tras la redacción del proyecto de “Caracterización, diagnóstico y propuesta de actuaciones para la mejora ambiental del tramo del río Guadarrama a su paso por el término municipal de Collado Villalba”. En este trabajo, se caracterizó y analizó la problemática del río Guadarrama a su paso por el T.M de Collado Villalba, con el objetivo de proponer actuaciones de rehabilitación. Durante la redacción del mismo se utilizó la información disponible del “Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba”, cuyo objetivo es la renaturalización del tramo de estudio.

Dado el contexto de los estudios previamente mencionados, resulta relevante establecer que en el marco del presente proyecto se hará alusión a ambos trabajos mediante una notación específica para su referencia adecuada:

El proyecto titulado: “Caracterización, diagnóstico y propuesta de actuaciones para la mejora ambiental del tramo del río Guadarrama a su paso por el término municipal de Collado Villalba” realizado por Sonia Borowiecka Kopacka y Rayza Coca Guzmán, será referenciado como **P. Caracterización**.

El trabajo titulado “Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba” realizado por MN Consultores en ciencias de la conservación, será referenciado como **Anteproyecto**.

Esta notación permitirá una clara identificación y referencia cruzada entre ambos trabajos en el curso del estudio actual.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se centra en la recuperación de la **diversidad hidrodinámica** en un cauce artificial y homogéneo. Tal y como se indica en el epígrafe anterior, la diversidad hidrodinámica tiene un papel fundamental para el funcionamiento adecuado del ecosistema acuático, y su recuperación es aún más relevante en tramos urbanos altamente antropizados. Por lo tanto, se proponen diversas alternativas que incluyen técnicas de bioingeniería para restablecer la diversidad hidrodinámica. Además, se busca optimizar las técnicas de intervención en función de las necesidades específicas del sistema fluvial.

## 3. OBJETIVOS

El presente estudio tiene como **objetivo general**:

- Recuperar la funcionalidad de los sistemas fluviales en el río Guadarrama a su paso por Collado Villalba.
- Mejorar su biodiversidad hidrodinámica y morfofuncional, además de su capacidad de autodepuración.

Se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificar las técnicas de bioingenierías más adecuadas a este tramo.
- Optimizar la distribución y efectividad de las técnicas de bioingeniería.
- Analizar e identificar las mejoras y limitaciones que ofrecen las alternativas seleccionadas.

## 4. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO

### 4.1. Caracterización de la masa de agua

El presente estudio se localiza en el noroeste de la Comunidad de Madrid, a 40 km de la capital, en el **término municipal de Collado Villalba**, donde se encuentra la masa de agua objeto de análisis. Este apartado proporciona una síntesis de la caracterización de dicha masa de agua con el objetivo de contextualizar al lector. Para obtener información más detallada sobre la caracterización de la masa de agua, se recomienda consultar el Informe P. Caracterización.

#### 4.1.1. Localización y caracterización general

A través del término municipal de Collado Villalba fluye el río Guadarrama, que se enmarca en la jurisdicción de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT). El tramo de estudio concreto aborda la masa de agua identificada como “ES030MSPF0404021 **Río Guadarrama y Arroyo de los Linos**”.

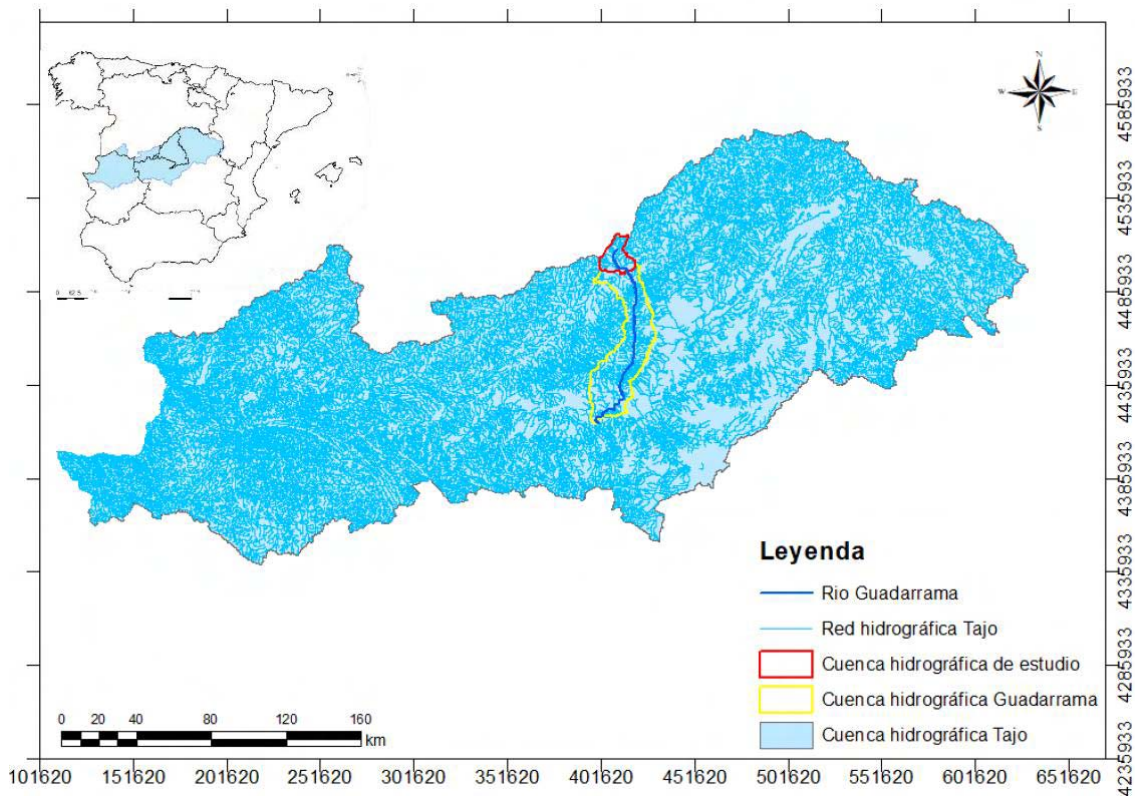


Figura 2. Cuenca Hidrográfica del Tajo y su localización dentro de España, río Guadarrama y tramo de estudio con su cuenca hidrográfica. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS a partir de la información disponible en el CNIG.

La **cuenca hidrográfica** del tramo de estudio tiene una superficie de  $242\text{km}^2$  y está localizada en el tramo alto del río Guadarrama (figura 2 y 3). La cuenca se caracteriza por su extensa cobertura forestal, la cual abarca un 77% de su superficie y se asienta mayoritariamente sobre suelos graníticos (anexo 2). Estos suelos, compuestos por rocas ígneas altamente resistentes a la erosión, presentan una baja susceptibilidad a la fragmentación. La combinación de estas características limita la disponibilidad de sedimentos para el transporte fluvial. Este dato adquiere relevancia fundamental en el marco de este proyecto, ya que influye directamente en los procesos geomorfológicos y en la gestión de recursos hídricos en la cuenca.

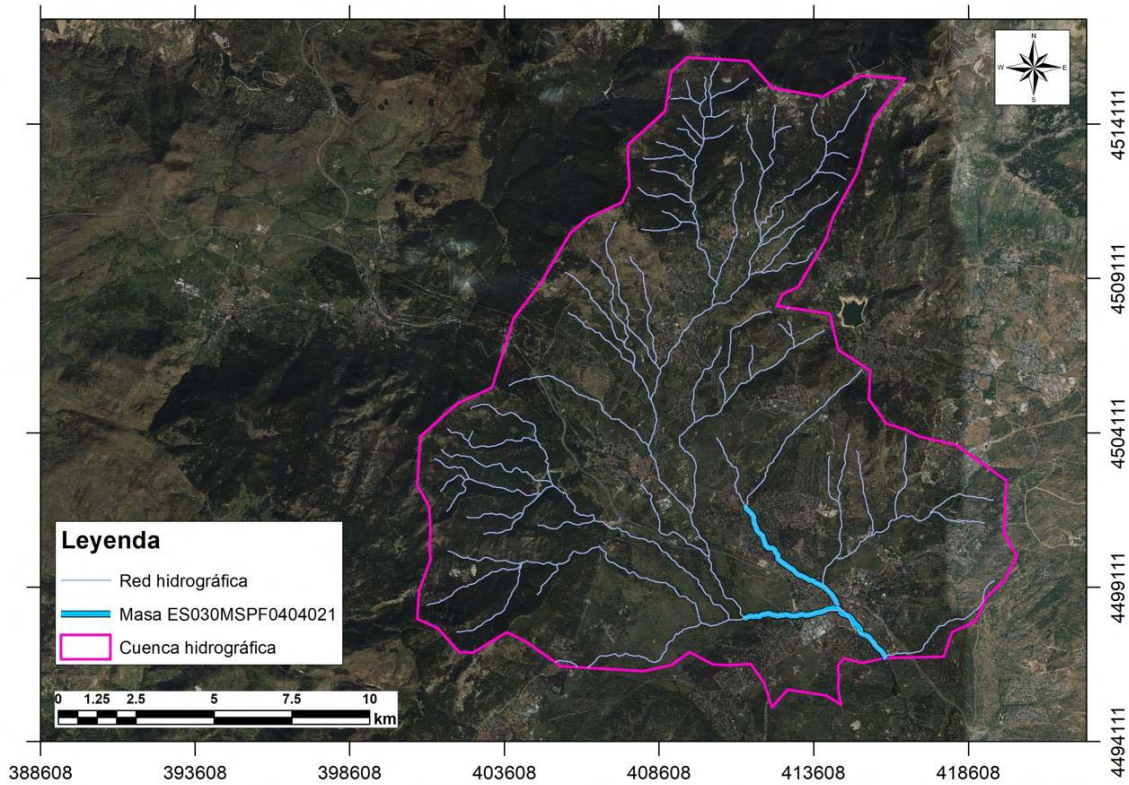


Figura 3. Cuenca hidrográfica del tramo de estudio dominada por la Sierra de Guadarrama. Se remarca la red hidrográfica que influye sobre la masa de agua ES030MSPF0404021 Río Guadarrama y Arroyo de los Linos.

Fuente: Elaboración propia en ArcGIS a partir de la información disponible en el CNIG

La masa de agua discurre por los municipios de Guadarrama, Alpedrete, El Escorial, Galapagar y Collado Villalba, pertenecientes a la provincia de Madrid. Por consiguiente, los dos cauces pertenecientes a la masa de agua son de carácter urbano (figura 4).

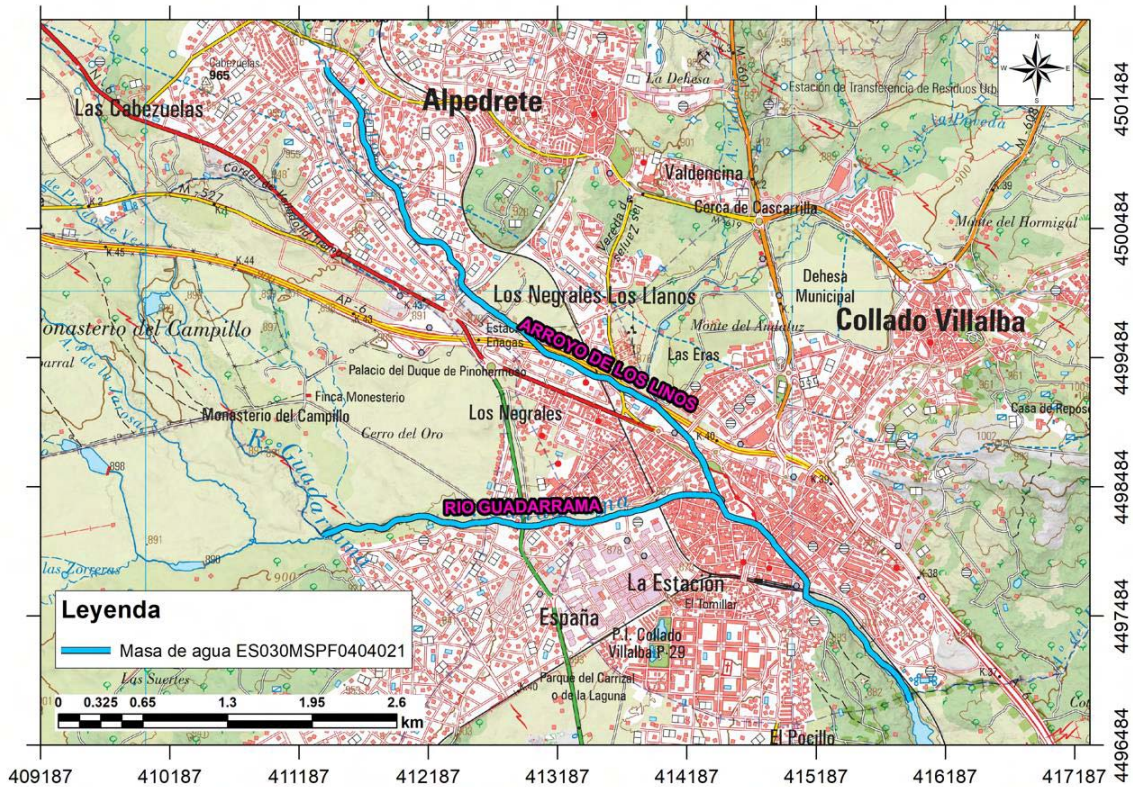


Figura 4. Masa ES030MSPF0404021 Río Guadarrama y Arroyo de los Linos sobre el mapa topográfico (BTN50). Fuente: Elaboración propia en ArcGIS.

#### 4.1.2. Problemática actual

A través de los siguientes dos epígrafes, dedicados al potencial ecológico y a las presiones e impactos, se expondrá la problemática que enfrenta el tramo de estudio.

##### 4.1.2.1. Potencial ecológico

Según el Plan hidrológico CHT 2022-2027, Apéndice 2 del Anexo 1 esta masa de agua está catalogada como R-T11 “ríos de montaña mediterráneos silíceos” y su naturalidad es considerada “muy modificada” por “Canalizaciones y protecciones de márgenes” y se encuentra en un “estado ecológico deficiente”.

Como resultado del P. Caracterización se determina que el **potencial ecológico** es “DEFICIENTE” debido al elemento de calidad biológico e hidromorfológico, en este orden de prioridad según establece la Directiva Marco del Agua (DMA). Aunque es importante destacar que la calidad biológica y la hidromorfología están estrechamente interrelacionadas en los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, cualquier mejora en la hidromorfología, como la restauración de hábitats naturales o la corrección de la alteración del flujo del agua, puede tener un impacto positivo en la biodiversidad y el funcionamiento del ecosistema.

#### 4.1.2.2. Presiones e impactos

El listado completo de las presiones identificadas en la masa de agua se puede consultar en las tablas 4-7 del proyecto P. Caracterización o así mismo, en el Apéndice 1, del anexo 10 de PHT (2021-2027). En este epígrafe se va a comentar el impacto con mayor importancia sobre el tramo de estudio: **La alteración del hábitat por cambios morfológicos incluida la falta de conectividad.**

En el proyecto de caracterización se identificó una imponente estructura de hormigón en forma de U que sirve como canalización para una extensa longitud de la masa de agua. Concretamente 1.6km en el río Guadarrama y 965m en el Arroyo de la Poveda. Esta canalización, aunque puede parecer una solución de ingeniería eficiente, en realidad limita significativamente la funcionalidad del ecosistema. La estructura no permite la movilidad fluvial natural, ya que no proporciona espacio para la expansión y contracción natural del cauce del río (ilustración 3). Además, carece de la conectividad vertical del cauce con el lecho, de la conectividad transversal del cauce con la ribera, en caso de existir y por último, de la conectividad longitudinal del propio cauce ya que a lo largo de la canalización se ha verificado la presencia de 8 barreras transversales identificadas como azudes. La funcionalidad de los azudes es de mantener una lámina de agua permanente para ofrecer al usuario un aspecto de un río más saludable, ya que sin estas barreras, en muchas ocasiones, y dada la naturalidad del río Guadarrama, permanecería prácticamente seco. Además, estas barreras transversales, dificultan el transporte de sedimentos y obstaculizan el movimiento de las especies piscícolas, lo que afecta negativamente a la biodiversidad y al equilibrio ecológico del ecosistema acuático en su conjunto. Por tanto, se puede concluir que el potencial del ecosistema fluvial se ve seriamente comprometido.



*Ilustración 3. Fotografía tomada en el tramo de estudio donde se ve reflejado la discontinuidad, longitudinal, transversal y vertical, del cauce y de la ribera, debido al urbanismo. fuente: Fotografías propias.*

### 4.1.3. Diagnóstico y posibilidades de mejora

A la vista de los dos apartados anteriores, se determina que la masa de agua presenta un potencial ecológico deficiente mientras que su estado químico es bueno. Respecto al potencial ecológico los elementos de calidad determinantes son el biológico y el hidromorfológico. En el contexto de este estudio, se aborda específicamente cómo mejorar la hidromorfología, que implica un impacto significativo en el tramo objeto de análisis. La mejora hidromorfológica está directamente asociada a una mejora de la diversidad hidrodinámica, lo que a su vez, puede fortalecer la presencia de comunidades biológicas que actualmente son escasas en dicho tramo (Li et al, 2022). Aunque algunos estudios indican que los resultados positivos esperados del aumento heterogeneidad del hábitat no siempre se traduce en un aumento de la biodiversidad esperada, especialmente si no se consideran todos los factores ecológicos y ambientales involucrados (Palmer et al. 2020).

## 4.2. Caracterización del tramo de estudio

### 4.2.1. Localización y caracterización general

El tramo de estudio abarca los dos cauces principales que se identifican como la masa de agua; el río Guadarrama y el arroyo de la Poveda (también conocido como Arroyo de los Linos según el PHT), que atraviesan el municipio de Collado Villalba (figura 5).

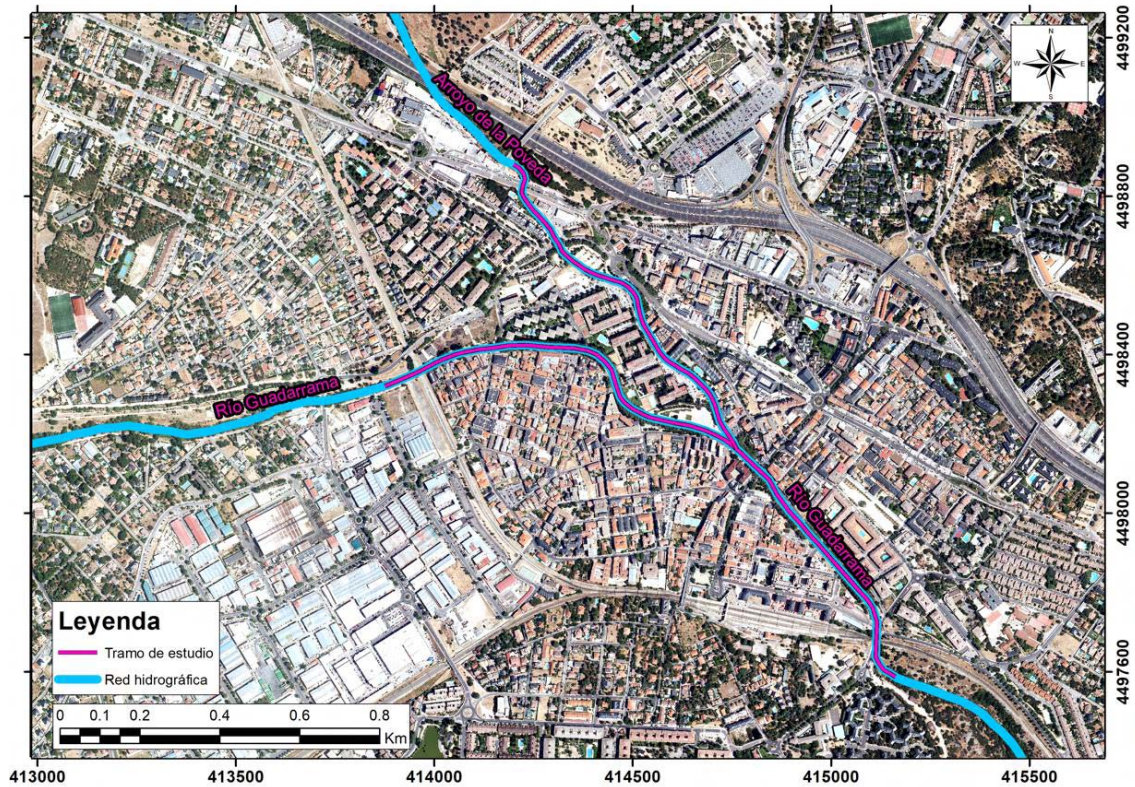


Figura 5. Localización del tramo objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan las coordenadas de inicio y fin, así como la longitud de ambos cauces de la parte correspondiente al tramo de estudio:

Tabla 1. Coordenadas UTM y longitud en metros que delimita cada uno de los ríos componentes del tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Coordenadas UTM y longitud que delimita el tramo de estudio					
Cauce	Longitud (m)	Coordenadas X inicial (m)	Coordenadas Y inicial (m)	Coordenadas X final (m)	Coordenadas Y final (m)
Río Guadarrama	1737.93	413875.72	4498321.22	415162.60	4497586.68
Arroyo de la Poveda	965.64	414199.65	4498879.92	414762.63	4498161.396

En el caso del río Guadarrama, el tramo de interés se circunscribe completamente al segmento que ha sido canalizado mediante hormigón, con una longitud total de 1737m. En lo que respecta al arroyo de la Poveda, su extensión se limita exclusivamente a los primeros 965m dirección aguas arriba desde el punto de confluencia con el curso principal, es decir, el río Guadarrama.

El rasgo más notable del tramo de estudio radica en su **carácter completamente urbano**, lo que conlleva una serie de limitaciones. Entre estas limitaciones se incluye la pérdida total de la movilidad fluvial, la pérdida de conectividad entre tramos de agua, la pérdida de la naturalidad del entorno acuático, y, de manera significativa, la pérdida de calidad

del agua. En la actualidad, el tramo únicamente cumple la función de desagüe, lo que lo convierte en un paisaje altamente degradado (Anteproyecto). Esta situación refleja la consecuencia de una urbanización intensiva y el desarrollo urbano desordenado, que han transformado profundamente el entorno fluvial y comprometido su funcionalidad ecológica.

#### 4.2.2. Uso del suelo

Caracterizar el uso de suelo en la zona de estudio es fundamental para llevar a cabo las modelizaciones hidráulicas. En la siguientes figuras 6 y 7 se puede observar la asignación de usos de suelo sobre la ortofoto.

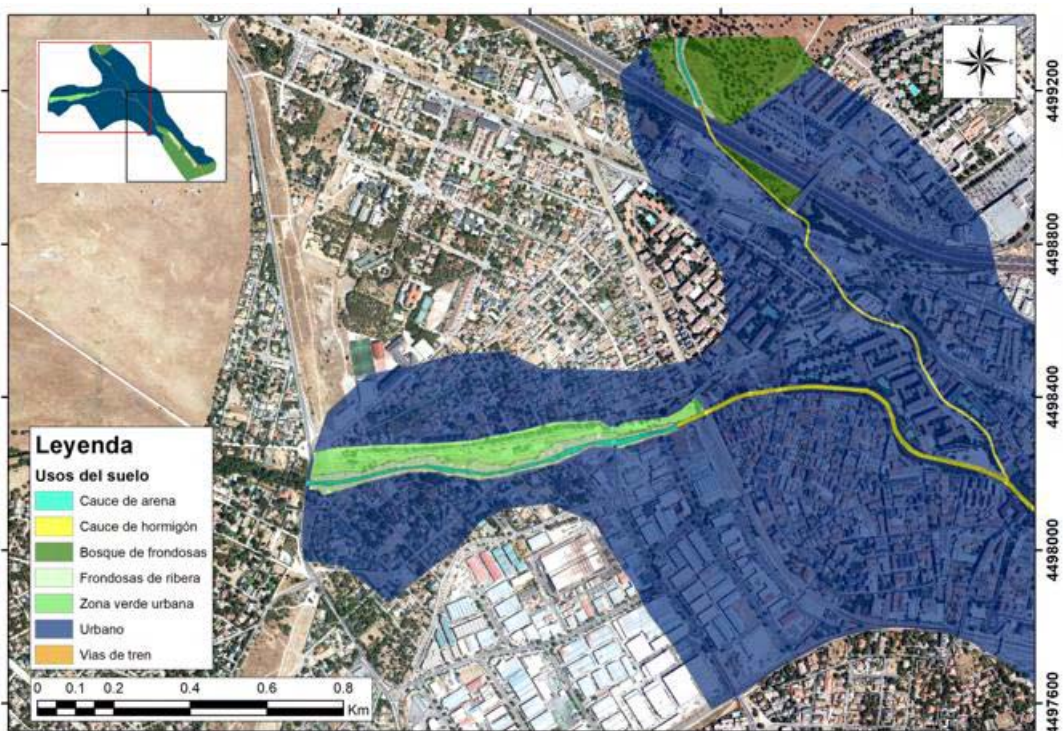


Figura 6. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio 1/2. Fuente: Elaboración propia basado en la información extraída del SIOSE.

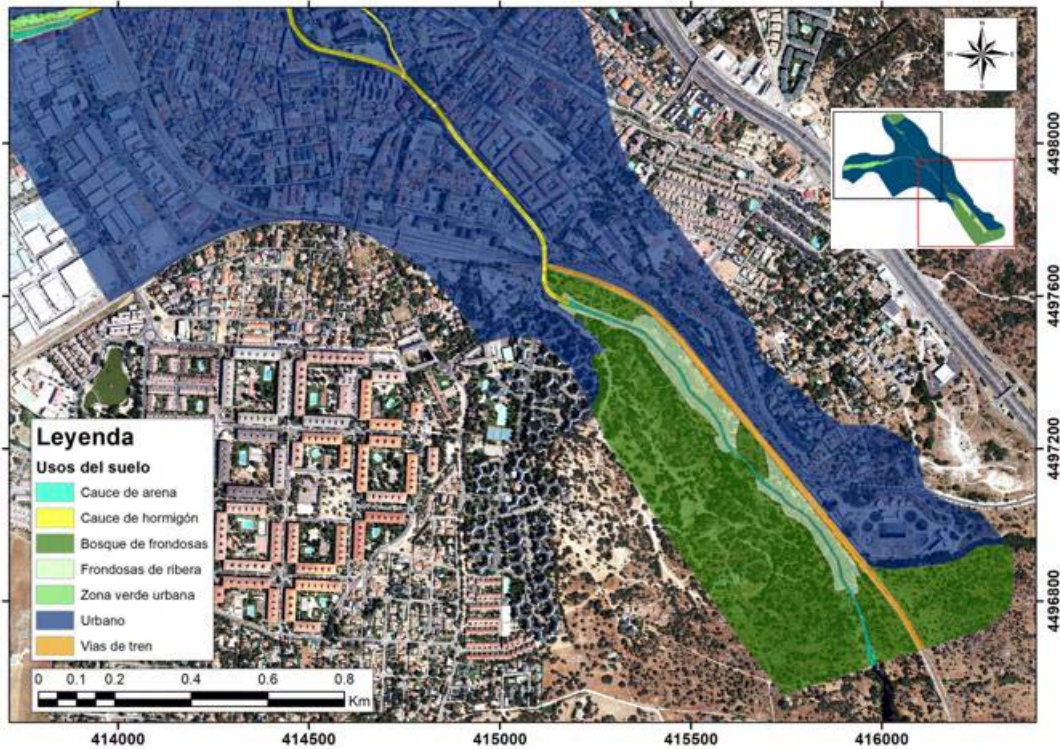


Figura 7. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio 2/2. Fuente: Elaboración propia basado en la información extraída del SIOSE.

Como se ha indicado previamente, el tramo de estudio atraviesa la zona urbana del municipio de Collado Villalba. Dentro de este tramo, se pueden identificar **tres subtramos distintos** en el río Guadarrama.

En primer lugar, el subtramo que se encuentra en el inicio del recorrido (figura 6), está limitado en su margen derecha por áreas residenciales y en su margen izquierda por un parque verde urbano. Esta configuración confiere una geometría de sección más natural en comparación con el siguiente subtramo (figura 6 y 7), que está completamente canalizado con hormigón y se encuentra rodeado por zonas urbanas en ambas márgenes. El subtramo final transcurre a través de un entorno natural con vegetación característica de un bosque mediterráneo, y su espacio fluvial no está restringido en ninguna de las márgenes. (figura 7). Este tramo se puede considerar como la imagen objetivo del análisis. Por otro lado, se encuentra el arroyo de la Poveda, que se extiende a lo largo de 7.444m principalmente a través de zonas urbanas. Sin embargo, solo el 13% de su longitud total está revestido con hormigón. Este porcentaje se corresponde al tramo final del arroyo el cual forma parte integral del proyecto.

Tal y como se explicará y detallará más adelante, los escenarios de caudal utilizados en el presente TFM, dan lugar a flujos de corriente que quedan completamente confinados

dentro del propio encauzamiento, es decir, no se producen en ningún caso, situaciones de desbordamiento. Por ello no es necesario hacer un desglose más detallado de los usos del suelo circundantes.

#### 4.2.3. Uso social

Como síntesis del apartado de caracterización del uso social (P. Caracterización) es reseñable destacar que existen varias zonas recreativas próximas al río. En el inicio del tramo se ubica el Parque Romacalderas, que ofrece un espacio para desarrollar diversas actividades como pasear, hacer deporte, montar en bici o pasear mascotas (ilustración 4). Sin embargo, tanto el mantenimiento municipal como el compromiso social resultan insuficientes para preservar este entorno seminatural.



*Ilustración 4. Río Guadarrama al inicio del tramo de estudio, donde se localiza un parque urbano. Fuente: Ilustraciones propias.*

En la parte central del tramo, objeto de estudio, se observa un encajonamiento de casi 4m de altura, acompañado de grandes jardineras. Esta configuración dificulta la visualización del río, lo que impide a los transeúntes apreciar el río y, por ende, comprender la problemática que enfrenta actualmente (ilustración 5).



*Ilustración 5. Río Guadarrama encajonado entre paredes de hormigón con vallas y jardineras que impiden las vistas al río. Fuente: Ilustraciones propias.*

Por último, la parte final del tramo se encuentra dentro del Coto de Las Suertes (ilustración 6). Aunque este entorno natural cuenta con múltiples senderos, ninguno de ellos ofrece una vista adecuada del río, lo que disminuye considerablemente su atractivo y su uso social.



*Ilustración 6. Tramo natural del río Guadarrama después de atravesar el T.M. Collado Villalba. Fuente: Ilustraciones propias.*

En conclusión, el río Guadarrama a su paso por el municipio de Collado Villalba no exhibe un uso social frecuente o notable en la actualidad. Se observa una falta de participación y aprovechamiento significativo por parte de la comunidad local en las actividades recreativas y de ocio relacionadas con este recurso hídrico. Resulta evidente que la mejora del aspecto y la calidad del río tendría un impacto positivo en su uso social. Por lo tanto, la inversión en la recuperación y conservación del río, así como en la creación de infraestructuras y servicios complementarios, podría contribuir significativamente a la activación de su potencial como espacio de uso social en el municipio.

#### 4.2.4. Régimen hidrológico. Régimen de caudales.

En el marco de los proyectos desarrollados por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) para la identificación de Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI), se ha llevado a cabo el análisis de los caudales asociados a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Específicamente, en el caso del río de la Poveda, se han determinado los caudales aguas arriba de la confluencia, mientras que para el río Guadarrama, los caudales se han estimado aguas abajo de dicho punto de confluencia.

La diferencia entre el caudal total del río Guadarrama y el caudal del arroyo de la Poveda

(aguas arriba de la confluencia) proporciona el caudal deseado del río Guadarrama aguas arriba de la confluencia (tabla 2).

Tabla 2. Distribución de caudales para cada uno de los ríos que pertenecen al tramo de estudio (aguas arriba y aguas abajo de la confluencia), en función de los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años en m<sup>3</sup>/s. Fuente: Elaboración propia basado en la información del Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.

DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES					
Curso fluvial	Ubicación	T10 (m <sup>3</sup> /s)	T100 (m <sup>3</sup> /s)	T500 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (%)
Río Guadarrama	Aguas abajo de la confluencia	119.42	248.17	346.12	100%
Arroyo de la Poveda	Aguas arriba de la confluencia	34.50	69.87	96.40	28%
Río Guadarrama	Aguas arriba de la confluencia	84.92	178.30	249.72	72%

Los caudales proporcionados en el anteproyecto están asociados a diferentes periodos de retorno. Estos datos se han empleado para determinar la distribución de caudal que se utilizará como condición de entrada al modelo hidrológico. La **distribución de caudales** se realiza de la siguiente manera: el 72% del caudal total fluye por el río Guadarrama, mientras que el 28% restante corresponde al arroyo de la Poveda.

Para el diseño de las intervenciones de diversificación y renaturalización de los lechos fluviales, se utilizarán los caudales correspondientes a los **cuantiles del 50% y del 5%** de la curva de caudales clasificados, que se obtienen de la estación de aforos 3100 “Río Guadarrama en Villalba” situada aguas debajo de la confluencia (anexo 2). El uso de los cuantiles Q<sub>50</sub> y Q<sub>5</sub> en el diseño de infraestructuras hidráulicas se justifica por su capacidad para representar tanto condiciones más habituales (como es el 50% del tiempo) como eventos extremos (solo el 5% del tiempo). De esta forma se pueden diseñar infraestructuras **funcionales** para la mayor parte del tiempo y a la vez que sean **resistentes** a los eventos extremos no tan frecuentes.

Además, también se tendrá en cuenta el caudal para el periodo de retorno de 2 años que se obtiene de previas modelizaciones realizadas en HEC-RAS por la Confederación hidrográfica del Tajo (CHT). Este caudal (34.76m<sup>3</sup>/s) es similar al caudal generador de lecho (QGL) obtenido en el P. Caracterización (36.70m<sup>3</sup>/s). Este caudal permite determinar las zonas con mayor afección de erosión sobre el cauce, lo que facilita la

selección de las zonas de actuación. El caudal para el periodo de retorno de 10 años se obtiene de la misma forma que T2. Con el fin de garantizar un margen de seguridad, se propone realizar una modelización que simule una situación desfavorable.

En la siguiente tabla 3 se presentan los caudales de simulación para cada curso fluvial una vez aplicado el porcentaje correspondiente:

*Tabla 3. Definición de los caudales de simulación  $Q_5$ ,  $Q_{50}$ , T2 y T10 ( $m^3/s$ ), aplicando el reparto de 72%/28% para cada uno de los ríos que pertenecen al tramo de estudio Fuente: Elaboración propia basado en la información del Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del Arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.*

CAUDALES DE SIMULACIÓN				
Curso fluvial	$Q_{50}$ ( $m^3/s$ )	$Q_5$ ( $m^3/s$ )	T2( $m^3/s$ )	T10( $m^3/s$ )
Estación de Aforos	0.69	8.19	48.40	119.42
Río Guadarrama	0.50	5.90	34.73	84.92
Arroyo de la Poveda	0.19	2.29	14.07	34.50

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Materiales

Para la mejora de la diversidad funcional se propone el uso de técnicas de diversificación hidrodinámica combinado con el uso del enfoque de las obras de bioingeniería. Aparte, mediante la selección de los tramos fluviales de estudio y el uso de herramientas de simulación hidráulica para el análisis y selección de las técnicas de bioingeniería fluvial se evaluará el funcionamiento y las mejoras conseguidas en los escenarios de estudio.

La puesta en práctica de las propuestas incluidas en este trabajo se realizará en los tramos canalizados del río Guadarrama (dentro del Término Municipal de Collado Villalba).

#### 5.1.1. Técnicas de bioingeniería del paisaje

En la actualidad, las técnicas de bioingeniería están ganando reconocimiento y uso debido a sus beneficios ecológicos y funcionales. En el contexto de la gestión de ríos, estas técnicas se pueden categorizar en varias áreas clave:







- Protección de las orillas.
- Control de la velocidad del agua.
- Redireccionamiento del flujo.
- Diversificación de las formas de lecho.
- Desarrollo de la vegetación de ribera




Cada una de estas técnicas juega un papel crucial en la gestión sostenible de los sistemas

fluviales, contribuyendo tanto a la mitigación de la erosión como a la mejora de los hábitats acuáticos.

Después de revisar exhaustivamente documentación especializada, como, por ejemplo, los Manuales Técnica Supplement 14H - Flow Changing Techniques (2007) o Design Methods for In-Stream Flow Control Structures (2014) se ha elaborado un resumen que compila las técnicas de bioingeniería que resultan más interesantes para el presente estudio. Para cada una de las estructuras se adjunta una descripción corta, su funcionalidad y posibles ventajas o limitaciones que puedan presentar. También se añade una foto ilustrativa de cada técnica.

Tabla 4. Resumen de las técnicas de bioingeniería valoradas como posibles alternativas para el presente proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Estructura	Descripción	Funcionalidad y Ventajas	Limitaciones	Ilustración
<b>Deflector de rocas (Rock vanes)</b>	Estructura triangular inclinada entre 20° y 45° que se extiende desde la orilla hacia el flujo aguas arriba.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protege y estabiliza las orillas.</li> <li>- Redirecciona el flujo</li> <li>- Crea hábitat en menor medida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No estabiliza el lecho.</li> <li>- No usar en pendientes &gt;3%</li> <li>- No usar en lecho de roca</li> </ul>	 <p>Ilustración 7. Ejemplo de deflector de roca (rock vanes). Fuente: Virginia Tech (izq.) y McCullah, J (drcha.).</p>
<b>Deflector con gancho en J (J-hook Vanes)</b>	Similar a la veleta de roca pero termina con una forma de gancho.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protege y estabiliza las orillas.</li> <li>- Redirecciona el flujo.</li> <li>- Forma charcas de socavación que fomenta la formación de nuevos hábitats.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No usar en pendientes &gt;3%</li> <li>- Precaución en lechos de arena ya que son fácilmente erosionables.</li> </ul>	 <p>Ilustración 8. Ejemplo de deflector con gancho en J (J-hook vanes). Fuente: Virginia Tech</p>
<b>Espigón en curva (Bendway Weirs)</b>	Estructura sumergida en forma de espigón, con ángulo entre 45° y 60°, ubicada en curvas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protege y estabiliza las orillas.</li> <li>- Redirecciona el flujo.</li> <li>- Fomenta la sedimentación en las curvas.</li> <li>*Son más efectivos en ríos grandes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poco efectivos en ríos con caudales muy bajos.</li> </ul>	 <p>Ilustración 9. Ejemplo de espigón en curva (Bendway weirs). Fuente: Elaboración propia (izq.) y McCullah, J (drcha.).</p>
<b>Púa de arroyo (Stream barbs)</b>	Similar a los vertederos en curva pero más pequeña, normalmente ubicada hacia aguas abajo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protegen las orillas:</li> <li>- Desvía caudales pequeños (rodean).</li> <li>- Redirige caudales mayores (pasan por encima).</li> <li>*Adecuadas para ríos pequeños.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ineficaces para grandes caudales.</li> <li>- Puede requerir mantenimiento frecuente en ríos con fluctuaciones de caudal.</li> </ul>	 <p>Ilustración 10. Ejemplo de púa de arroyo (stream barbs). Fuente: Elaboración propia (izq.) y Virginia Tech (drcha.).</p>
<b>Rampa centradora o rampa centradora doble - W (Cross vanes) (W-Weirs)</b>	Estructura en forma de V (cauces pequeños) o W (cauces >12m), abarca todo el lecho del río.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controla la pendiente</li> <li>- Centraliza el flujo</li> <li>- Crea charcas de socavación para hábitats</li> <li>- Disipa energía eficientemente.</li> <li>* Recomendadas en pendientes altas a moderadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No usar en canales con lecho rocoso o arroyos con sustratos inestables (arena limo).</li> <li>- No adecuados para flujos lentos o estancados.</li> <li>- Requieren construcción adecuada.</li> </ul>	 <p>Ilustración 11. Ejemplo de rampa centradora (Cross vanes). Fuente: Virginia Tech (izq.) y David L. Rosgen (drcha.).</p>
<b>Diques (Spur dikes)</b>	Estructuras en ángulo perpendicular a la orilla, ubicadas en tramos rectos o curvas, superficiales o sumergidas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protege y estabiliza las orillas</li> <li>- Redirecciona el flujo</li> <li>- Reducen la velocidad cuando el caudal impacta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pueden alterar significativamente el flujo río abajo y causar problemas de sedimentación si no se diseñan correctamente.</li> </ul>	 <p>Ilustración 12. Ejemplo de diques. Fuente: Elaboración propia (izq.) y Deepika Sharma (drcha.).</p>

<p><b>Islas</b></p>	<p>Estructuras generalmente de forma elíptica paralelas al flujo del río. Situadas en el centro del cauce o próximo a él.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Divide el flujo</li> <li>- Aumenta la velocidad del flujo</li> <li>- Base para la colonización de la vegetación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificultad de mantenimiento en ríos con poco sedimento y grandes avenidas.</li> </ul>	 <p><i>Ilustración 13. Ejemplo de islas fluviales en el río Itachi. Fuente: Nakamura (2008)</i></p>
<p><b>Barras laterales</b></p>	<p>Su forma es alargada y paralela al flujo del río. Suele ser una semielipse. Se sitúa en las orillas del río.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redirecciona el flujo y aumenta la sinuosidad</li> <li>- Protege las orillas</li> <li>- Base para la colonización de la vegetación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificultad de mantenimiento en ríos con poco sedimento y grandes avenidas.</li> </ul>	 <p><i>Ilustración 14. Ejemplo de barras laterales. Fuente: Woodland Water &amp; gardens and D. Longley</i></p>
<p><b>Hileras o conjunto de rocas</b></p>	<p>Rocas de gran tamaño dispuestas en líneas o según un determinado patrón sin tener que llegar a ser rectas. La disposición y el número de rocas depende del objetivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diversifica el flujo y la velocidad</li> <li>- Fomenta a aparición de hábitats</li> <li>- Oxigena el agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La anchura del río puede limitar la instalación de configuraciones con varias hileras.</li> </ul>	 <p><i>Ilustración 15. Idea basada en el ejemplo de rampa de flujo ascendente. Fuente: Fernández et al, (2023)</i></p>

### 5.1.2. Modelo hidráulico. Selección del software y tipo de modelo.

Para estimar las variables necesarias, se dispone de diversas opciones en términos de software especializado en modelización hidráulica, entre los cuales destacan HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) y su homólogo de origen español, IBER. Ambas plataformas comparten el propósito de llevar a cabo análisis hidráulicos de sistemas fluviales y de canales, ofreciendo capacidades tanto para flujos unidimensionales como bidimensionales. Cabe señalar que IBER se enfoca exclusivamente en análisis bidimensionales.

En el contexto particular de este estudio, se ha elegido utilizar **HEC-RAS** por diversas razones fundamentales:

- **Familiaridad con la herramienta:**

Se ha optado por HEC-RAS debido a una mayor experiencia y conocimiento previo en su utilización por parte del equipo de trabajo.

- **Funcionalidad de extensión Ras Mapper:**

HEC-RAS cuenta con la extensión Ras Mapper, que facilita la modificación del terreno de manera intuitiva. Esta característica es especialmente relevante para el presente caso de estudio, donde se requiere la inclusión de un canal homogéneo de hormigón. Ras Mapper permite realizar esta tarea de manera sencilla y precisa.

- **Flexibilidad en la modificación del terreno:**

Con la misma extensión Ras Mapper, es posible ajustar el terreno según las necesidades del estudio, incluyendo la incorporación de elementos estructurales como deflectores, rampas o islas, lo que resulta interesante en el presente estudio, donde se va a analizar diversos escenarios, por lo que la rapidez y eficacia resultan imperativos.

- **Malla eficiente y sin limitaciones de resolución:**

La estructura de malla en HEC-RAS se caracteriza por su eficiencia y su capacidad para adaptarse a la complejidad del terreno sin imponer limitaciones de resolución. Este atributo se deriva de la aplicación de la **técnica subgrid**. En la mayoría de los modelos 2D, las celdas se representan con una elevación promedio única o como planos triangulares o rectangulares inclinados, mientras que las caras se tratan como superficies

planas o inclinadas. Este enfoque requiere que las celdas sean notablemente más pequeñas para capturar el mismo nivel de detalle, volumen y velocidad que alcanza HEC-RAS con la técnica del subgrid (Forest, M., 2020).

Para entender esto de forma más sencilla, se va a explicar utilizando como ejemplo la siguiente figura.

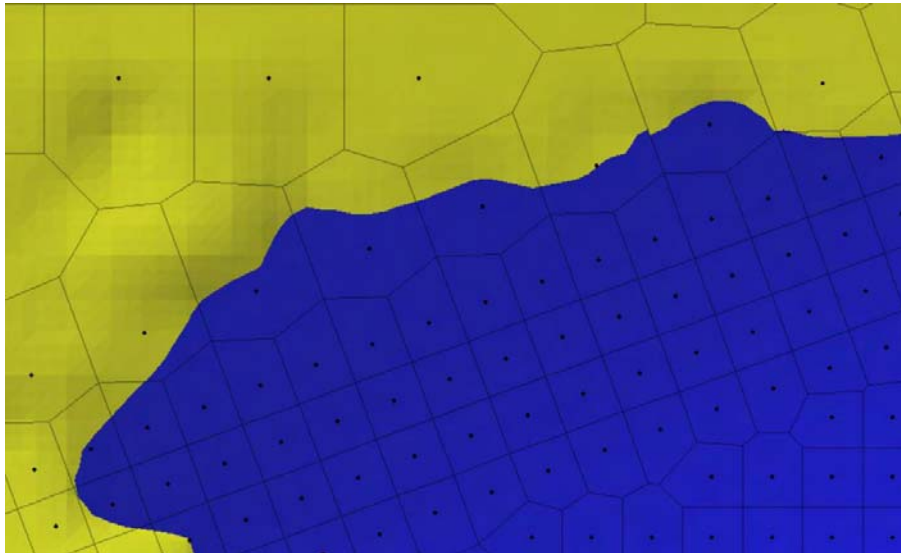


Figura 8. Ejemplo del funcionamiento de la técnica subgrid integrada en el programa HEC-RAS Fuente: Elaboración propia.

En otros modelos 2D que no emplean la técnica subgrid, el cálculo de la celda mojada es determinista, es decir, o la celda se encuentra completamente inundada o permanece completamente seca. En contraste, HEC-RAS genera automáticamente secciones transversales adicionales dentro de cada celda de la malla. Esto le permite ajustar la elevación del terreno en estas áreas y determinar qué partes dentro de una celda se inundan y cuáles no. Por consiguiente, se afirma que es posible utilizar una resolución de malla de 5x5m sobre MDT de 2x2m, lo que permite que el modelo sea más eficiente computacionalmente sin perder los detalles del MDT.

Específicamente, se ha decidido emplear el **modelo bidimensional (2D)**, en gran medida, debido a su versatilidad. No obstante, su uso también se justifica por la presencia de las dos componentes horizontales de la velocidad; “x” e “y”. A pesar de la posibilidad de considerar la inclusión de la tercera componente de la velocidad, representada por el eje “z”, y utilizar un modelo tridimensional, la falta de familiaridad con esta herramienta se convierte en un factor determinante para descartar su aplicación en este contexto. Se considera suficiente el uso del modelo bidimensional para analizar el flujo de agua a

través de las pequeñas barreras transversales que se encuentran distribuidos a lo largo del tramo en estudio.

Se van a realizar modelizaciones hidráulicas para diferentes caudales con el objetivo de obtener las variables de calado, velocidad y tensión tractiva, que a su vez determinarán las áreas de actuación prioritaria y las técnicas a emplear más adecuadas.

## 5.2. Metodología

A continuación se explica de forma esquemática la metodología general seguida en este estudio, la cual se define en 3 fases. El detalle y desarrollo de cada una de las fases se incluye más adelante. Cada una de las fases tiene asignado un color para facilitar el seguimiento de la lectura de la metodología; situación actual (color naranja), situación pre-operacional (color rosa) y situación post-operacional (color verde).

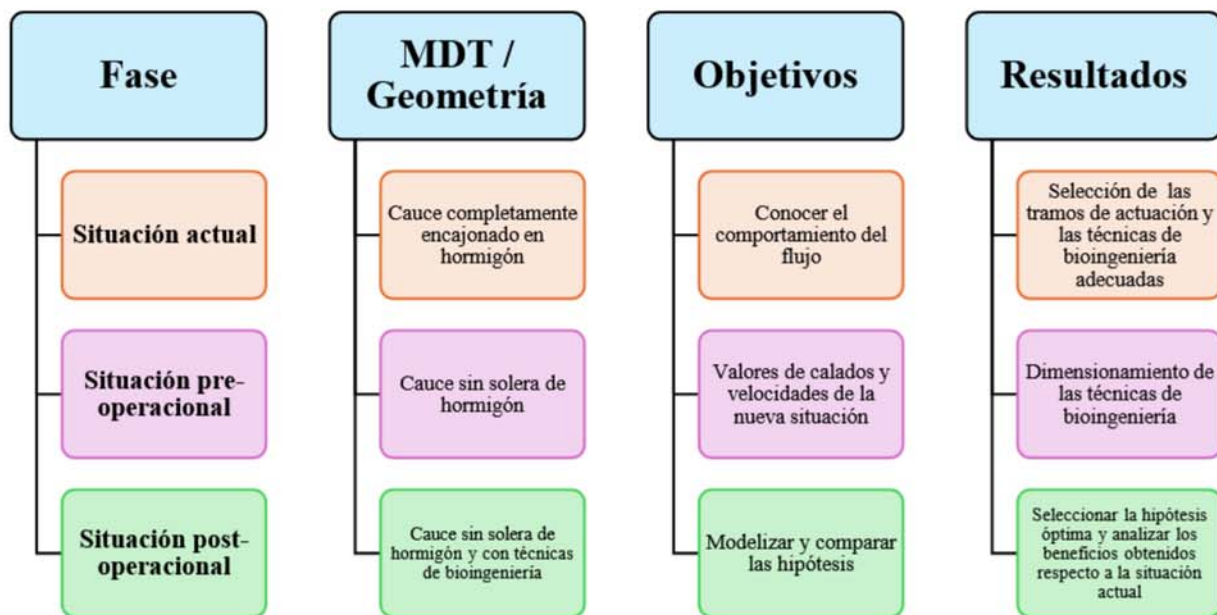


Figura 9. Esquematización de la metodología aplicada. Situación actual (color naranja), situación pre-operacional (color rosa) y situación post-operacional (color verde). Fuente: Elaboración propia.

La estructura en tres fases da respuesta a la complejidad de la metodología de forma que los resultados puedan orientar las decisiones entre las distintas fases. Esta secuencia permite una mejor comprensión de todo el proceso. En el anexo 6 se puede encontrar una tabla resumen de las modelizaciones hidráulicas realizadas en cada una de las fases.

### 5.3. Situación actual

En la actualidad el cauce tiene muros cajeros y solera de hormigón armado. Una vez elaborado el correspondiente MDT se realizan las simulaciones con el objetivo de conocer el comportamiento del flujo. El resultado será determinar las zonas de actuación y los objetivos a cumplir en estas zonas. Por último, se van a seleccionar las técnicas de bioingeniería que ayuden a cumplir los objetivos y que serán objeto del análisis.

#### 5.3.1. Preparación del modelo

Las modelizaciones hidráulicas que se realizarán a continuación parten de un Modelo Digital de Superficies de 2m (MDS02) modificado. Todas las modificaciones del MDS02 para la situación actual, es decir, el canal encauzado en hormigón, se detallan rigurosamente en el anexo 3.

##### 5.3.1.1 Rugosidad

Tras la modificación del terreno, el siguiente paso supone generar una capa de información con los usos del suelo, que condicionarán el **coeficiente de rugosidad de Manning** (figura 10). La fuente de la que se obtienen los siguientes valores de "n" es la que viene en la propia guía de HEC-RAS. Estos valores se introducen en la geometría elaborada en ArcGis que se ha presentado en el punto 4.2.2 de este trabajo.

En el contexto presente, los valores de "n" más significativos corresponden a la arena (0.025), que representan la condición del lecho natural, y al hormigón (0.018), que refleja la condición del lecho canalizado. Más adelante, se tendrá en cuenta otro uso de suelo relevante que hace referencia a una cubierta de vegetación (vegetación hidrófila y de orla arbustiva flexible) con una  $n=0.04$ .

Existen dos tipos de uso de suelo adyacentes al cauce principal; las zonas de bosque con un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.07 y las zonas urbanas, donde se registra un valor de "n" notablemente mayor (0.1), lo que indica una mayor resistencia al flujo debido a la presencia de infraestructuras urbanas. Es preciso recordar que, dado los escenarios de caudal analizados en este trabajo, los valores de "n" ubicados fuera del canal no ejercen influencia directa en los resultados del estudio hidráulico en curso.



Figura 10. Capa de usos de suelo con los valores de "n" de manning definidos. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.3.1.2. Definición de la malla de cálculo

El siguiente paso consiste en generar una **malla de cálculo** que cubra todo el área de interés (dominio de análisis). En este caso, la malla se limita al cauce con un margen de 20m a cada lado aproximadamente.

El tamaño de celda utilizado es de 5m en general y de 1m en aquellas zonas donde se hayan realizado ajustes de refinado de la malla. En el anexo 3 se puede encontrar información más detallada sobre la elaboración de la malla de cálculo.

A continuación se muestra el detalle elaborado para la malla:

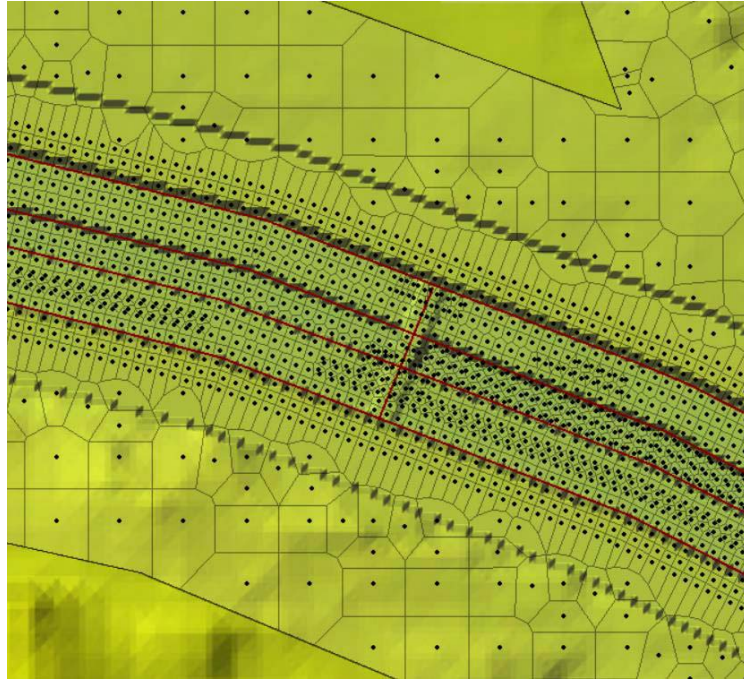


Figura 11. Detalle de la malla tras elaborar las líneas de refinamiento correspondientes. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.1.3. Condiciones de contorno

Las **condiciones de contorno** son las especificaciones aplicadas en los límites del modelo hidráulico para simular adecuadamente el comportamiento del flujo del agua. Para el modelo las condiciones de entrada y salida son las siguientes:

Tabla 5. Condiciones de contorno definidas para las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

CONDICIÓN DE CONTORNO		
Designación	Designación en el modelo	Condición
Entrada Guadarrama	Aguas_arriba_Guada	Flow Hydrograph
Entrada Poveda	Aguas_arriba_Poveda	Flow Hydrograph
Salida	Aguas_abajo	Normal Depth

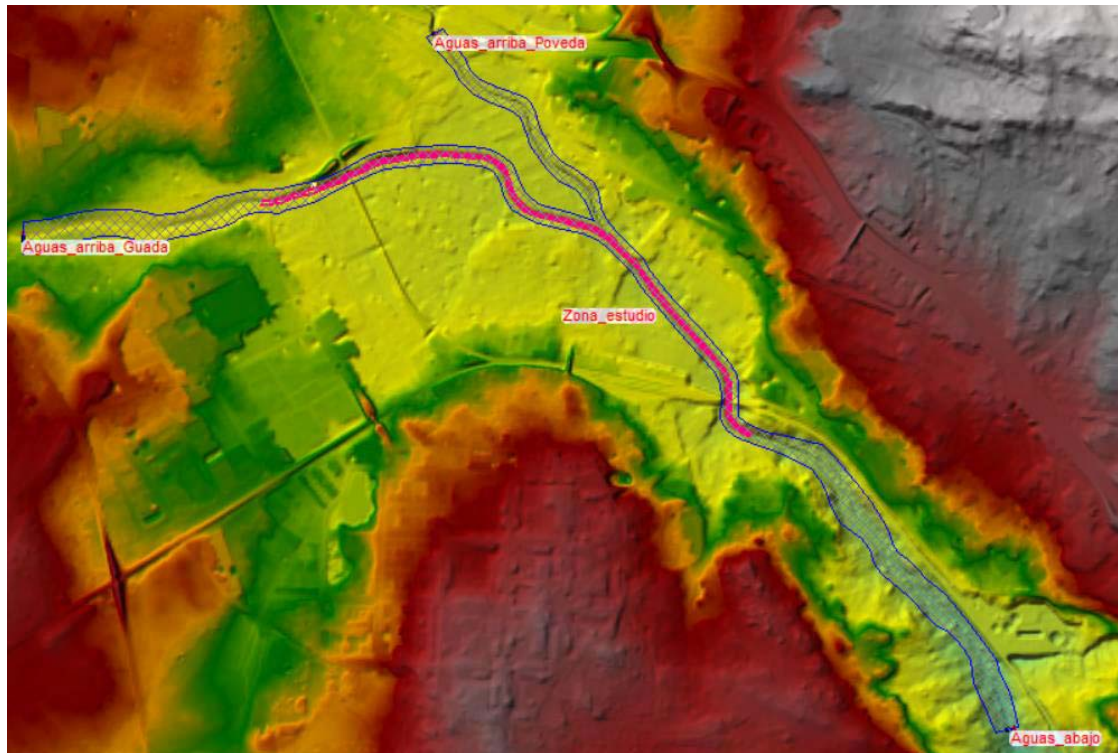


Figura 12. Localización de las condiciones de contorno (entrada/salida) definidas. Fuente: Elaboración propia.

Los caudales destinados a simulación son los especificados en la tabla 3 y se corresponden con el  $Q_{50}$ ,  $Q_5$ , T2 y T10. Para obtener más información de cómo se introducen las condiciones de entrada se debe consultar el anexo 3

Respecto a la condición de salida se selecciona “Normal Depth” que se utiliza cuando se quiere caracterizar el comportamiento del flujo bajo condiciones estables. Se determina como la pendiente localizada entre la sección de salida a una sección anterior. En este caso se establece un Normal Depth = 0.5m

#### 5.3.1.4. Plan de simulación

El último paso es ejecutar el programa y para ello es necesario definir un **plan de simulación**, donde se establecen los parámetros de tiempo, que se definen como:

- **Tiempo de simulación:** El tiempo necesario para que la modelización alcance el régimen permanente. Para T2 y T10 se aplicará un tiempo de simulación de 24h, para  $Q_5$  de 12h y para  $Q_{50}$  de 6h.
- **Intervalo computacional:** Representa el lapso entre cada cálculo interno realizado por el programa. En este estudio se escoge un intervalo computacional de 5 segundos. Esta elección se fundamenta en la capacidad de procesamiento del equipo y en la necesidad de obtener resultados detallados de manera eficiente.
- **Intervalo de mapeado:** Determina la frecuencia con la cual se desea obtener un

resultado visual en forma de mapa. Depende del análisis que se quiera realizar se utilizará un valor de 1 minuto o 10 minutos.

### 5.3.2. Selección de los tramos de estudio y de las técnicas de bioingeniería a utilizar.

Las modelizaciones previas tienen dos objetivos fundamentales. El primero es **identificar las áreas de intervención** (áreas con un comportamiento hidráulico e hidrodinámico diferente). Una vez determinadas estas zonas, se procede a **analizar la problemática** específica del tramo, lo que permite decidir qué técnicas pueden implementarse según las características del mismo. Posteriormente, se realiza una comparación exhaustiva de las técnicas más adecuadas.

#### 5.3.2.1. Selección de los tramos de estudio.

En el ámbito de este proyecto, es necesario **acotar la extensión del tramo** en el que se van a aplicar las técnicas de bioingeniería. Como en la totalidad del tramo de estudio no existe ningún tipo de diversidad hidrodinámica hay que determinar otra forma de seleccionar estas áreas de interés. Para ello, se va a ejecutar una modelización para identificar específicamente aquellas áreas donde la tensión de fondo sea más pronunciada, la velocidad sea mayor o existan cambios abruptos de condiciones hidráulicas, puesto que estas zonas son más propensas a la erosión. Los datos que se utilizarán corresponderán al T2, pero con una variación en el hidrograma de entrada para cada curso fluvial. En esta fase del análisis, se introducirá un caudal constante desde el inicio de la simulación que provocará un efecto “ola” y que permitirá observar los resultados con mayor claridad (se obtienen contrastes mayores dentro del dominio del análisis) (figura 13).

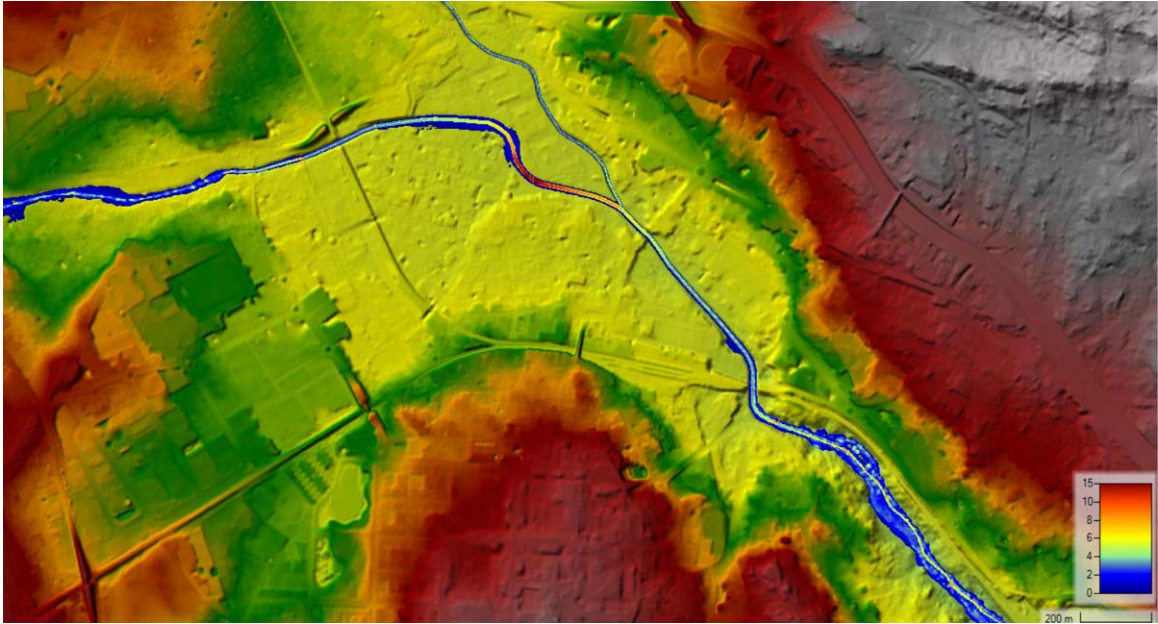


Figura 13. Mapa de valores de velocidad máxima (m/s) para un caudal constante de T2 donde se aprecia el desbordamiento resultante del efecto “ola”. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados se van a proponer **dos zonas** con distintas condiciones; El tramo de curvas (A), y el tramo recto (B). A continuación se va a justificar la selección de ambos.

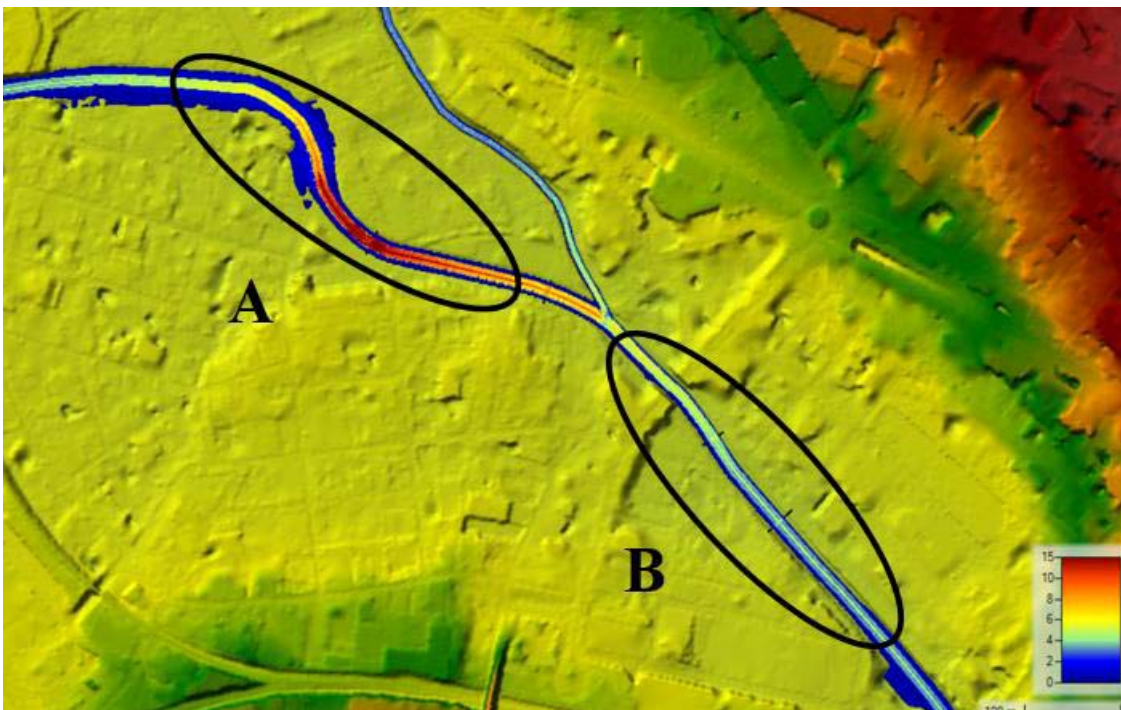


Figura 14. Mapa de valores de velocidad máxima (m/s) para un caudal constante de T2. Zonas A y B propuestas para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

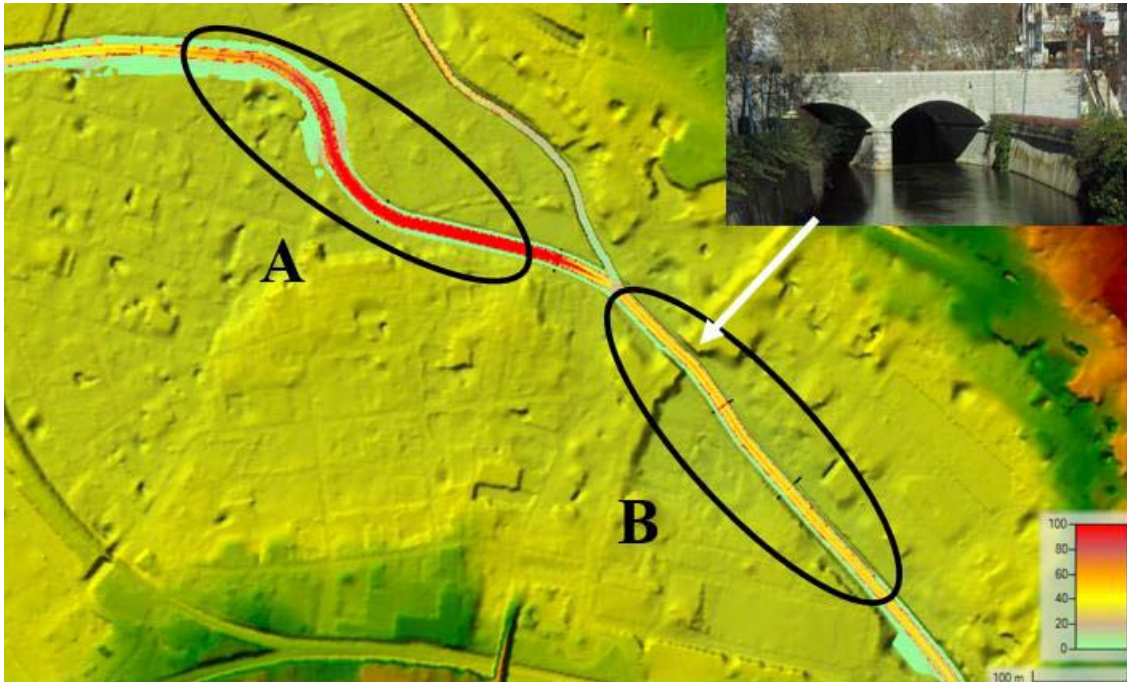


Figura 15. Mapa de valores de tensión de fondo máximos (m/s) para un caudal constante de T2. Zonas A y B propuestas para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

El **tramo de curvas (A)** se compone de dos curvas, justo antes de la confluencia de ambos ríos. Es ampliamente reconocido que en curvas cerradas, donde la velocidad del flujo es notablemente elevada, se produce erosión tanto en la orilla como en el lecho del río. Así mismo, la tensión de fondo es mayor en esta zona. Si bien en la situación presente esta erosión no genera impactos significativos debido a la presencia de estructuras de contención de hormigón, es crucial considerar la futura situación del proyecto, la cual contempla la implementación de obras que incorporarán taludes inclinados revestidos con materiales naturales o mixtos y la demolición de la solera, dejando expuesto tanto el lecho como el frente de la cimentación de los muros laterales. En este último contexto, se prevé que la erosión se vuelva un factor relevante.

Por consiguiente, en este tramo curvilíneo adquiere especial importancia la implementación de **técnicas de bioingeniería fluvial de control de la dirección de la corriente**. El objetivo principal de estas técnicas será proteger las riberas y el lecho del proceso erosivo y como resultado consecuente adicional se producirá una variación en la hidrodinámica fluvial. De manera complementaria, se establecerá como objetivo secundario activar procesos de sedimentación, con la finalidad de propiciar condiciones óptimas para el establecimiento de vegetación en las zonas ribereñas (de acuerdo al enfoque de la bioingeniería fluvial). Esta vegetación no solo contribuirá a la estabilización de las riberas, sino que también servirá como soporte para la consecución del objetivo

principal de protección contra la erosión.

El **tramo recto (B)**, situado inmediatamente después de la confluencia de los dos ríos, presenta un aumento notable en la velocidad del agua, generado por la combinación de los caudales provenientes de ambas fuentes. Esta aceleración se ve acentuada por la ausencia de curvas o la falta de elementos en el lecho que disminuyan la velocidad. El resultado no solo aumenta la velocidad, sino que también la tensión de fondo se ve agravada. Sin embargo, existen otros factores con mayor peso que determinan la selección de este tramo. Por un lado, los tramos rectos suelen caracterizarse por un flujo más uniforme y estable, es decir, más homogéneo, lo cual es relevante para la selección de **estrategias de diversificación fluvial**. Por otro lado, la presencia de un puente vehicular (figura 15) al inicio del tramo B agrega complejidad, ya que la velocidad del agua podría comprometer la integridad de sus pilares. Por lo tanto, las técnicas aplicadas en este tramo tienen un propósito distinto. En lugar de enfocarse principalmente en la protección de las riberas, se buscará controlar y dirigir el flujo de agua. Por otro lado, el objetivo también será centralizar el flujo de agua en la zona previa al puente, y posteriormente al mismo, se buscará distribuir el flujo de forma heterogénea para conseguir la diversidad hidrodinámica objeto de estudio.

Tabla 6. Resumen de los objetivos establecidos para cada tramo. Fuente: Elaboración propia.

RESUMEN DE LOS OBJETIVOS BUSCADOS POR TRAMO		
Tramo	Objetivo principal	Objetivo secundario
Tramo curvilíneo (A)	Proteger la ribera de la erosión desviando el flujo. + Diversificar el flujo de agua	Crear zonas de sedimentación para fomentar el crecimiento de la vegetación
Tramo recto (B)	Diversificar el flujo de agua, promover heterogeneidad	Proteger los pilares de los puentes centralizando el flujo

Tras la anterior selección de los tramos de estudio, en el siguiente epígrafe se van a seleccionar diferentes técnicas de bioingeniería en cada una de las zonas, buscando la mejor configuración de las mismas con la finalidad de cumplir los objetivos mencionados en la tabla anterior. Además se espera que las conclusiones obtenidas en este estudio sean extrapolables a otras encauzadas del río Guadarrama en Collado Villalba, e incluso, replicables en otros proyectos de naturaleza similar.

### 5.3.2.2. Selección de las técnicas de bioingeniería

Para cumplir con estos objetivos propuestos en cada una de las zonas de estudio se van a seleccionar las siguientes técnicas:

#### **Tramo curvo (A):**

- Deflectores con un ángulo de 45° mirando aguas arriba
- Deflectores con un ángulo de 90°

#### **Tramo recto (B)**

- Barras laterales
- Islas
- Hileras de rocas
- Rampas centradoras (rock cross vanes)
- Rampa centradora doble (rock cross vane-W)

#### **Técnicas seleccionadas para el tramo curvo (A):**

La técnica seleccionada es una mezcla entre los **deflectores de roca** (rock vanes) y los **espigones en curva** (bendway weirs). Tal como se expone en el apartado 1.4, ambas estructuras cumplen la función de proteger las orillas y redirigir el flujo hídrico, además de fomentar la sedimentación aguas abajo del deflector, lo que facilita el establecimiento de vegetación.



Figura 16 Ejemplo de deflector en el río Arkansas. Fuente: Richer et al., 2017

Otra alternativa interesante, debido a su mayor capacidad para crear hábitats, son los deflectores en J (J-hook vanes). Sin embargo, su incorporación en el modelo 2D de HEC-RAS puede resultar compleja y es improbable que generen diferencias significativas en comparación con las estructuras previamente mencionadas. En otras palabras, los resultados serán comparables, y la decisión de introducir las veletas en J para mejorar el hábitat puede ser tomada durante la fase práctica del proyecto.

La forma de las estructuras tampoco influye en los resultados modelizados. Por ejemplo, los deflectores de roca (rock vanes) presentan una geometría más triangular en contraste con los espigones en curva (bendway weirs), que son más rectangulares. La principal diferencia entre ambas técnicas reside en la apertura del ángulo: los deflectores de roca suelen tener un ángulo más cerrado (20-45°) en comparación con los vertederos en curva (45-90°). Por esta razón las dos hipótesis que se van a analizar se reflejan en la figura 17 y son:

- **Hipótesis A1:** Deflectores con un ángulo de 45° mirando aguas arriba (figura izquierda)
- **Hipótesis A2:** Deflectores con un ángulo de 90° (figura derecha; equivalente a la técnica de espigones en curva)

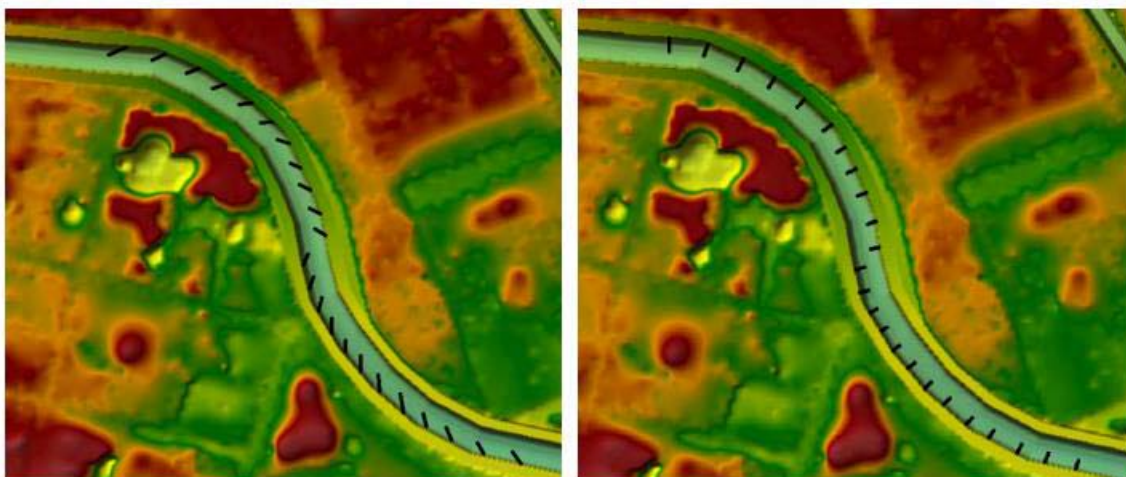


Figura 17. Esquema de las hipótesis propuestas en el tramo curvo (A). A la izquierda se refleja la hipótesis A1 (deflectores de 45°) y a la derecha la hipótesis A2 (deflectores de 90°). Fuente: Elaboración propia.

### Técnicas seleccionadas para el tramo recto (B):

Para abordar los problemas de falta de diversidad hidrodinámica del tramo recto se proponen cuatro técnicas:

- Barras laterales
- Islas
- Hileras de rocas
- Rampas centradoras (rock cross vanes)
- Rampa centradora doble (Rock cross vane-W)

Las **barras laterales** son estructuras de forma semicircular o semielíptica que se distribuyen de forma alterna a lo largo de las márgenes del cauce. Esta configuración está diseñada para mejorar la sinuosidad del flujo hidráulico. Además de su función hidráulica, estas barreras están destinadas a servir como hábitat para especies vegetales hidrófilas. La colonización de estas especies puede ocurrir de manera natural, a través de procesos autónomos de propagación, o bien mediante plantaciones planificadas. La estrategia específica para la construcción de las barreras depende de la disponibilidad de materiales tras las demoliciones asociadas al proyecto:

- a) En el caso de que haya suficiente material sobrante útil después de las demoliciones, las barreras se construirán completamente con roca. Se espera que la vegetación colonice estas estructuras de forma natural.
- b) En ausencia de suficiente material, se utilizará una mezcla de roca y tierra para la construcción de las barreras. En este escenario, se realizarán plantaciones planificadas para facilitar la colonización de vegetación hidrófila y de orla arbustiva flexible (saucedas arbustivas). El material vegetal vivo que se emplearán en las técnicas de bioingeniería procederá de las especies de ribera autóctonas existentes en la zona.

La segunda técnica empleada es la implementación de **islas fluviales**. Estas estructuras, similares a las barras laterales en términos de estructura, se sitúan en el interior del cauce, dividiendo el flujo de agua en dos y aumentando su velocidad. Las islas fluviales pueden presentar una amplia variedad de tamaños y formas, y su presencia está condicionada por factores como la velocidad del flujo, la carga sedimentaria y la topografía del lecho del río. Al igual que las barras laterales, estas islas proporcionan una base estable para el establecimiento de vegetación, contribuyendo a la creación de hábitats diversos y ricos

en biodiversidad.



Figura 18. Ejemplo de barras laterales e islas fluviales en el río Itachi. Fuente: Nakamura (2008)

La tercera técnica implica el uso de **hileras de rocas o rocas sueltas**, dispuestas en patrones específicos como hileras transversales, agrupaciones irregulares o distribuciones aleatorias, según el objetivo y las características del canal. Esta idea se basa en el "Manual de diseño y cálculo de rampas con flujo ascendente" (2023), donde se emplean hileras en zigzag para generar un flujo ascendente que facilita el movimiento de especies piscícolas. En un futuro, se espera que las especies piscícolas vuelvan a transitar por el tramo de estudio, sin embargo, los peces no tendrán problemas de tránsito dado que la pendiente del tramo es baja. Por tanto, el objetivo principal de las hileras no está tan orientado a los peces si no a crear variaciones en la velocidad y dirección del flujo, es decir, mejorar la diversidad hidráulica.



Figura 19. Ejemplo de la disposición de las hileras de rocas. Fuente: Fernández et al., 2023

Para cumplir con el objetivo secundario de proteger los pilares del puente, se va a recurrir a las estructuras centradoras de flujo como las rampas centradoras “cross vane” o las dobles rampas centradoras dobles “W-Weir”. La rampa centradora tiene una configuración en forma de "C" que abarca toda la sección transversal del canal, de una orilla a otra, con el propósito de dirigir y centralizar el flujo de agua. La estructura puede consistir en una única unidad o en dos deflectores paralelos que dejan un espacio central libre para el paso del flujo. Independientemente del diseño escogido, se generarán áreas de acumulación de sedimentos entre la estructura y la orilla, las cuales también pueden servir como hábitats potenciales para la vegetación. En el caso de la doble rampa, el planteamiento es el mismo, pero en este caso la estructura tiene forma de “W” y se crean dos flujos, que evitan la erosión del elemento central. En el presente estudio, debido a que el puente presenta un pilar central, la estructura que se aplica es la doble rampa centradora, mientras que la rampa simple se aplicará al resto del tramo para mejorar la biodiversidad hidrodinámica.



Figura 20. Ejemplo de rampa centradora (izq.) y doble rampa o W-weir (dcha.). Fuente: Soil & Environmental Consultants, Pa. (izq.) / Rich Marovich

Con estas cuatro estructuras se van a proponer dos hipótesis a comparar:

- **Hipótesis B1:** Una doble rampa centradora antes de puente. Barras laterales e hileras de rocas en el resto del tramo.
- **Hipótesis B2:** Una doble rampa centradora antes de puente. Islas alternadas con rampas centradoras simples en el resto del tramo.

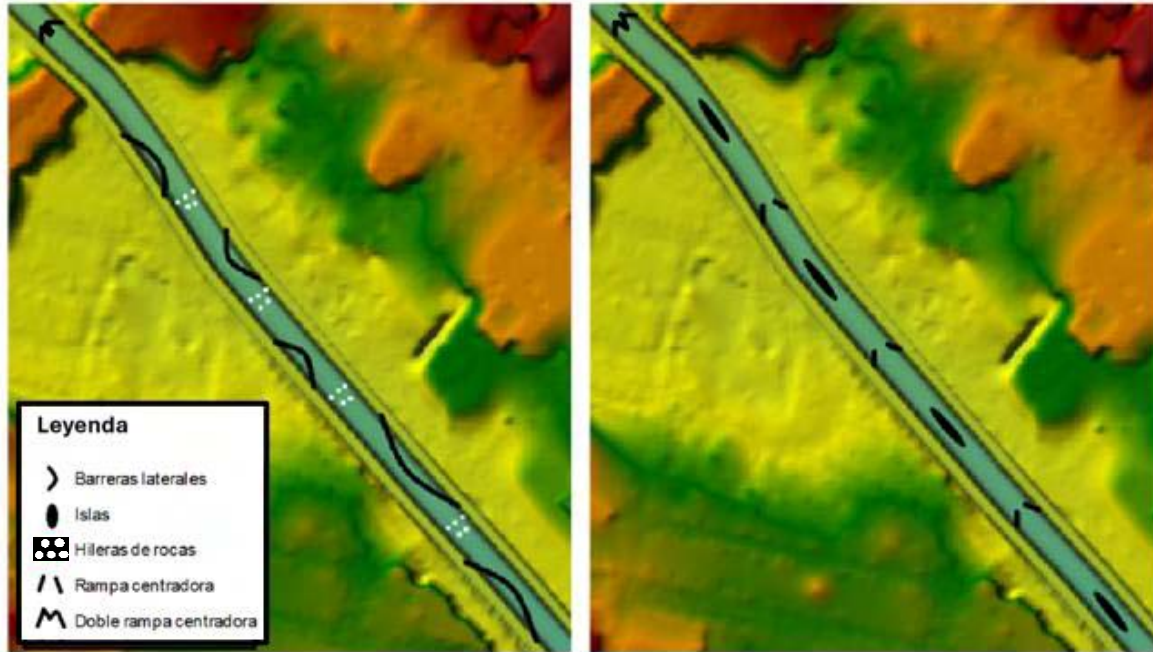
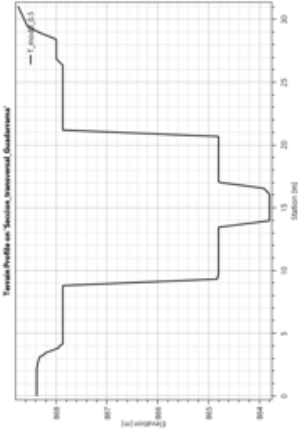
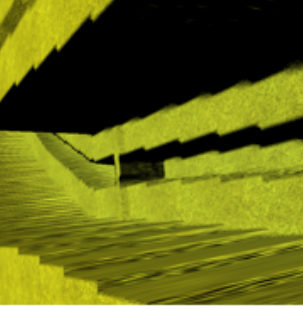




Figura 21. Esquema de las hipótesis propuestas en el tramo recto (B) A la izquierda se refleja la hipótesis B1 y a la derecha la hipótesis B2. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3. Síntesis de la situación actual

SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL		
<p style="text-align: center;"><b><u>OBJETIVOS</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Detectar zonas con problemas específicos y definir las áreas de estudio relevantes.</li> <li>- Seleccionar las técnicas de bioingeniería más adecuadas.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b><u>MODELO DE SIMULACIÓN</u></b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	
<p style="text-align: center;"><b><u>RESULTADOS</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tramo A → Hipótesis A1: Deflectores de 45° Hipótesis A2: Deflectores a 90°</li> <li>• Tramo B → Hipótesis B1: Doble rampa centradora antes del puente. Barras laterales e hileras de rocas. Hipótesis B2: Doble rampa centradora antes del puente. Islas alternadas con rampas centradoras.</li> </ul>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	
<b>RESUMEN DE LOS OBJETIVOS BUSCADOS POR TRAMO</b>		
<b>Tramo</b>	<b>Objetivo principal</b>	<b>Objetivo secundario</b>
Tramo curvilíneo (A)	Proteger la ribera de la erosión desviando el flujo. + Diversificar el flujo de agua	Crear zonas de sedimentación para fomentar el crecimiento de la vegetación
Tramo recto (B)	Diversificar el flujo de agua, promover heterogeneidad	Proteger los pilares de los puentes centralizando el flujo
<b>PARÁMETROS DEL MODELO</b>		
<b>CONDICIONES DE CONTORNO</b>		
Condición de entrada	Hidrograma	Valores Tabla 3
Condición de salida	Normal Depth	0.5
<b>PLAN DE SIMULACIÓN</b>		
Tiempo de simulación	24h(T10)    24h(T2)    12h(Q5)	6h(Q50)
Intervalo computacional	1-5 segundos	
Intervalo de mapeado	1 o 10 minutos	
<b>RUGOSIDAD</b>		
Hormigón	0.018	
<b>Nº total de modelizaciones (en detalle Anexo 6)</b>		<b>4</b>

## 5.4. Situación pre-operacional

La situación pre-operacional simula un cauce sin lecho de hormigón, con forma cóncava, de aspecto más natural. La nueva geometría implica un nuevo MDT sobre los que realizar las modelizaciones. Los parámetros de calado y velocidad obtenidos van a servir para definir las variables de dimensionamiento de las estructuras y técnicas seleccionadas.

### 5.4.1. Preparación del modelo

Actualmente (2024) se está llevando a cabo un proyecto de renaturalización del río Guadarrama (Proyecto next generation - NatGuadaVillalba) en el cual, una de las propuestas es remover la solera de hormigón existente, para obtener un lecho cóncavo, en este caso de arenas (sustrato natural del río Guadarrama), que se asemeje más a la forma natural del lecho que tienen los ríos. Este paso previo a la incorporación de las estructuras permite recuperar la dimensión vertical del sistema fluvial, que servirá como base para el resto de las actuaciones previstas.

A su vez, también se pretende eliminar todas las barreras transversales presentes en el tramo de estudio, dando lugar a la mejora de la continuidad longitudinal del sistema.

La modificación en HEC-RAS se realiza mediante secciones transversales modificadas manualmente mediante el modelado en 1D. El resultado final se presenta a continuación:

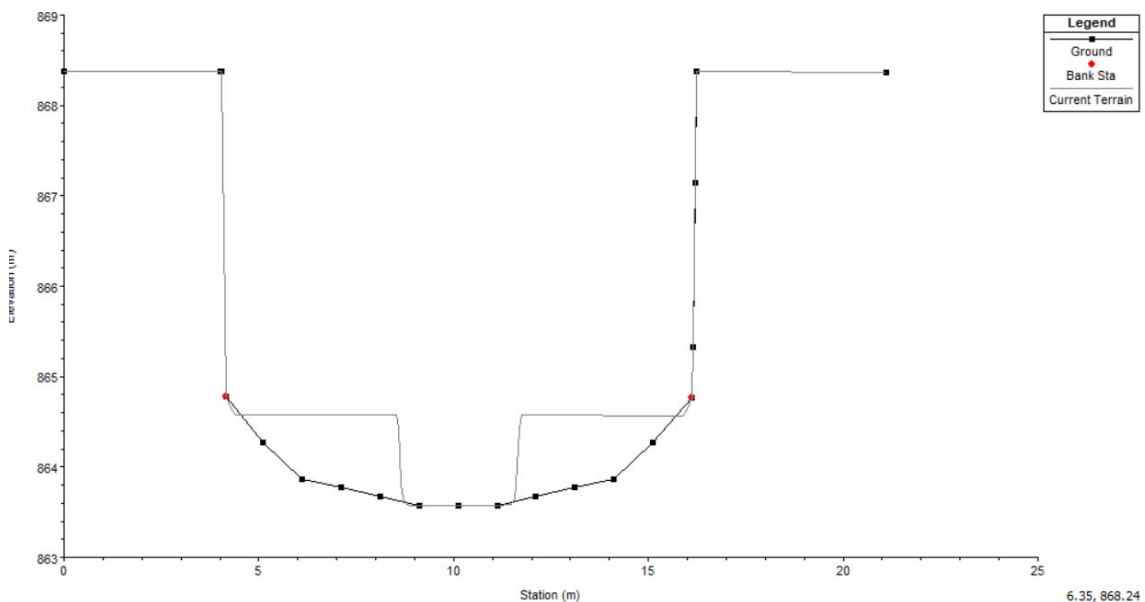


Figura 22. Sección transversal modificada para obtener un cauce que represente la realidad. La línea gris clara representa el cauce de hormigón, mientras que la línea con puntos negros representa el cauce natural. Fuente: Elaboración propia.

Es necesario considerar que en la nueva configuración, la rugosidad del lecho también cambiará. Se contemplan dos escenarios; El primer escenario ocurre inmediatamente

después de la demolición de la solera y la incorporación de las estructuras, resultando en un lecho arenoso con una rugosidad de  $n = 0.025$ . Sin embargo, con el tiempo, se prevé que la vegetación crezca sobre la arena, lo que dará lugar al segundo escenario, con una mayor rugosidad del lecho ( $n = 0.04$ ). Es fundamental realizar modelaciones para ambos escenarios ya que de esta forma, se obtendrán los valores limitantes para el dimensionamiento de las estructuras (velocidades máximas en el escenario a corto plazo y calados máximos en el escenario a largo plazo). Es decir, se tienen en cuenta estos valores limitantes para estar siempre del lado de la seguridad a la hora de dimensionar las técnicas de bioingeniería.

En el **escenario inicial (a corto plazo)**, que representa un lecho de arena con menor rugosidad, se obtendrán velocidades de flujo más altas. Esta velocidad es crucial para determinar el tamaño mínimo de las piedras que se utilizarán en las técnicas de bioingeniería. Si se emplean piedras demasiado pequeñas, el caudal podría arrastrarlas, y el trabajo realizado sería en vano. Por otro lado, si se utilizan piedras demasiado grandes, no existiría riesgo de arrastre, pero no sería la solución más eficiente.

El **segundo escenario (a largo plazo)** representa la evolución futura del cauce, con un lecho de arena y vegetación ya desarrollada. En esta situación, la mayor rugosidad resultará en velocidades de flujo más bajas, aunque con mayores calados de agua. Conocer el calado es importante para decidir a qué altura deben situarse las estructuras incorporadas. Si las estructuras quedan completamente sumergidas, se generarán corrientes turbulentas a lo largo de toda la estructura en los escenarios de caudal de diseño, en lugar de únicamente en la punta (zona distal de la técnica), que es el efecto que se busca para centralizar el flujo de corriente y generar formas de lecho más diversas (figura 23).

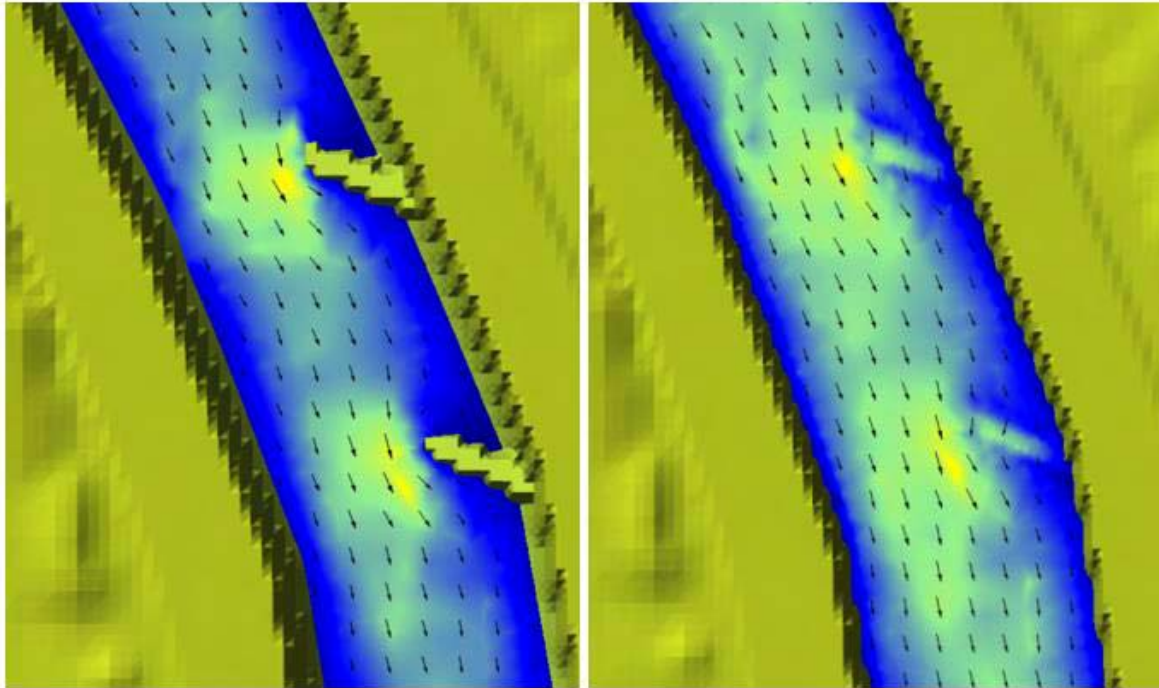


Figura 23. Ejemplo ilustrativo del efecto de la corriente en deflectores sumergidos (derecha) y no sumergidos (izquierda). Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2. Análisis del resultado del modelo. Situación pre-operacional.

Una vez realizada la modificación del terreno, el siguiente paso es realizar las modelizaciones para los dos escenarios propuestos. El objetivo es obtener los valores de calado, velocidad y tensión de fondo para los caudales mencionados en la tabla 3, con el fin de poder determinar el dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería fluvial a incorporar.

Es importante mencionar que, de acuerdo al anexo hidrológico del Plan General del TM Guadarrama, la MCO se corresponde con T3,7 años. Si el tramo fuera un cauce natural sería importante tener este dato en cuenta. Sin embargo, debido a que el tramo está sobre una base de hormigón, no es necesario. La explicación es sencilla: Al tratarse de muros de hormigón, el riesgo de erosión del deflector y su desestabilización en la zona de anclaje es inexistente, ya que el hormigón es un material altamente resistente a la erosión hidráulica. Por esta razón, se utiliza un caudal inferior (T2) para evitar sobredimensionar innecesariamente el cuerpo del deflector.

Tabla 7. Valores máximos de calado, velocidad y tensión de fondo obtenidos para los caudales seleccionados y en función del sustrato definido. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETROS SELECCIONADOS					
	Valores máximos	Q <sub>50</sub>	Q <sub>5</sub>	T2	T10
Sustrato de arena (a corto plazo)	Calado (m)	0.19	0.59	1.40	2.18
	Velocidad (m/s)	0.85	1.84	3.25	4.92
	Tensión de fondo (N/m <sup>2</sup> )	6.4	27.39	74.59	126.37
Sustrato con vegetación (a largo plazo)	Calado (m)	0.24	0.73	1.76	2.8
	Velocidad (m/s)	0.56	1.26	2.4	4
	Tensión de fondo (N/m <sup>2</sup> )	8.3	33.5	96.36	173.61

Como apunte, cabe destacar que los valores máximos obtenidos del modelo resultan de una observación manual a lo largo del recorrido del tramo, por lo que no se consideran como valores puntuales. En su lugar, representan más adecuadamente la media de los valores máximos, proporcionando una representación fiel de la realidad. Utilizar los valores máximos absolutos que presenta el modelo conduciría a un error significativo. Por ejemplo, el valor medio máximo del cuantil Q<sub>50</sub> es 0.23m, mientras que el valor máximo del modelo es 4.33m (figura 24). Para el dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería es importante utilizar los valores máximos para asegurar estar al lado de la seguridad.

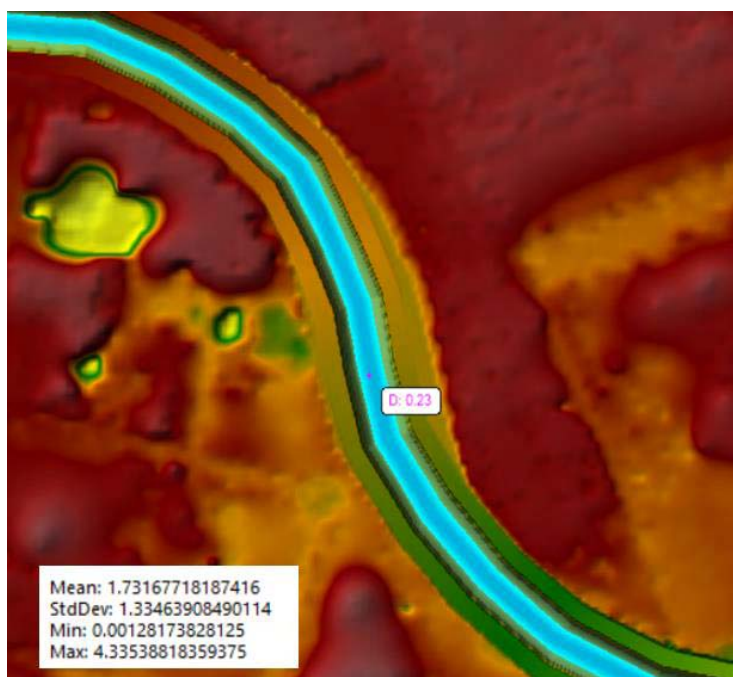


Figura 24. Ejemplo de cómo se han obtenido los valores máximos de cada parámetro. El recuadro inferior izquierdo representa los valores medios, desviación estándar, mínimos y máximos del modelo completo que pueden llevar a error. Fuente: Elaboración propia.

Los valores presentados en la tabla 7 son coherentes, ya que, en la situación inicial donde el sustrato está compuesto únicamente por arena, se observan valores de calado y tensión de fondo menores, y una velocidad de flujo mayor en comparación con los valores correspondientes al sustrato en la situación proyectada futura (con presencia de vegetación).

Los datos resaltados en rojo son esenciales para el dimensionamiento de las estructuras. El calado en el escenario futuro es un parámetro determinante para establecer la altura del deflector, tanto en la zona más distal como en la zona adyacente al muro. Asimismo, la velocidad registrada en la situación más desfavorable (PR10) es esencial para definir el tamaño del material a emplear. En este caso específico, se optará por el uso de rocas debido a su capacidad para resistir las velocidades obtenidas.

### 5.4.3. Dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería seleccionadas

El éxito de los proyectos de bioingeniería depende del correcto dimensionamiento de las técnicas empleadas. Un dimensionamiento adecuado es esencial para garantizar la funcionalidad y la durabilidad a largo plazo de estas intervenciones. La erosión de las estructuras debido a avenidas puede desembocar en desastres significativos. Por ello, los valores de calado y velocidad calculados en el epígrafe anterior son claves para lograr este objetivo.

#### 5.4.3.1. Dimensionamiento de los deflectores para el tramo A

El dimensionamiento de los deflectores se basa en determinar los siguientes parámetros (figura 25 y 26):

- Altura del deflector en la parte más distal (H1)
- Altura del deflector en la parte pegada al muro (H2)
- Angulo del deflector en relación a la orilla ( $\theta$ )
- Longitud real del deflector (L)
- Longitud efectiva del deflector ( $L_e$ )
- Ancho del deflector (a)
- Separación entre deflectores (D)
- Tamaño del material (T)

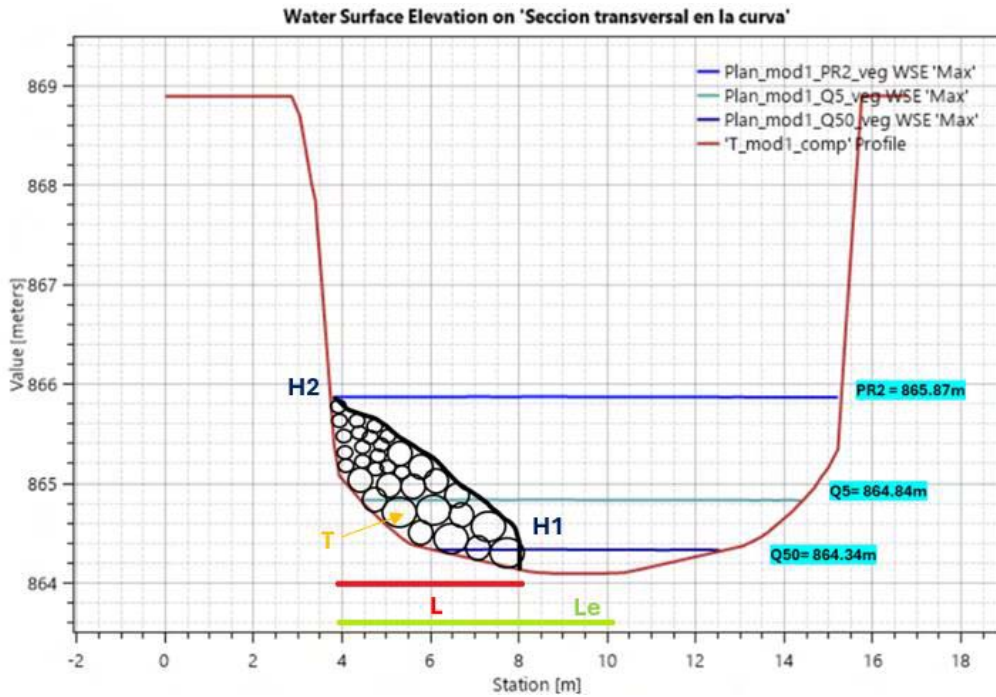


Figura 25. Parámetros por dimensionar de un deflector visto en una sección transversal. Fuente: Elaboración propia

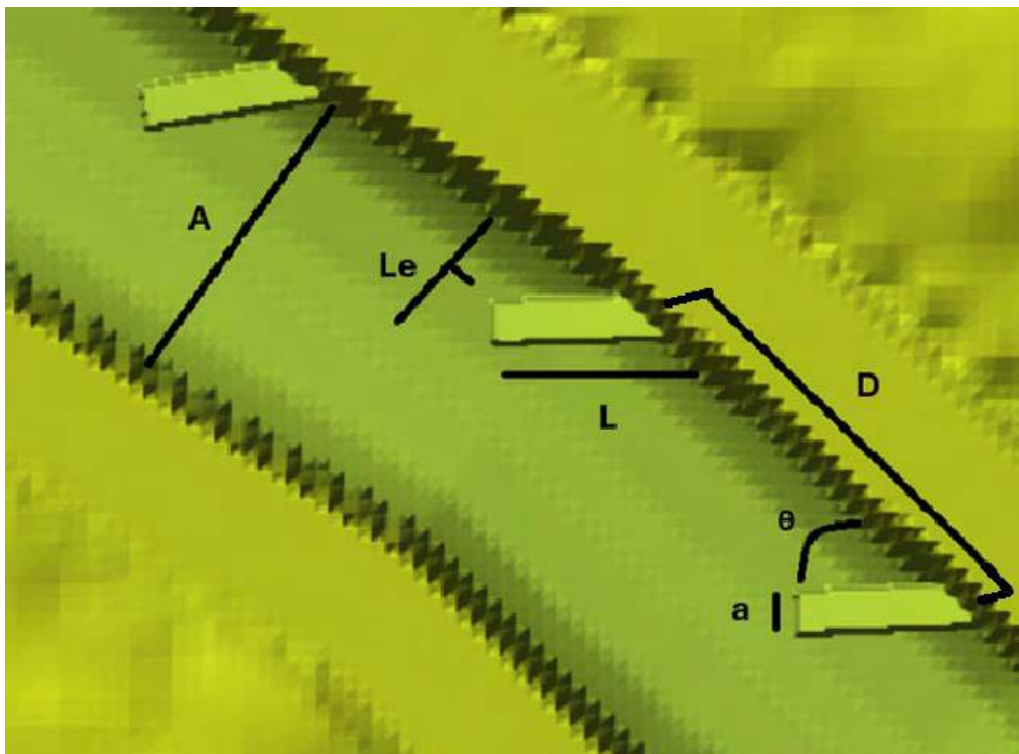


Figura 26. Parámetros que definen el diseño de una serie de deflectores visto en planta. Fuente: Elaboración propia

A continuación se justifican los valores de los parámetros anteriores:

- **Altura del deflector (H1 y H2):**

Según el esquema de diseño de deflectores establecido por Natural Resources

Conservation Service (NRSC), la punta del deflector siempre debe quedar sumergido en el agua, es decir, hay que tener en cuenta el cuantil  $Q_{50}$ , ya que es un caudal habitual, y en su defecto, si este caudal fuera muy pequeño, se pasaría al caudal del cuantil  $Q_5$ . Por otro lado, la parte del deflector cercano al muro debe estar a la cota del caudal de la máxima crecida ordinaria o en este caso su equivalente T2.

Si se observan los calados resultantes (tabla 7), el  $Q_{50}$  (0.24m) puede resultar una profundidad insuficiente para establecer la punta del deflector. Además hay que tener en cuenta que las rocas de mayor tamaño se localizan en esta zona, ya que son las piedras que están más expuestas al paso de la corriente y por tanto soportan una mayor tensión de fondo. Por ello se establecerá que la altura (H1) de la zona distal del deflector estará localizada en un valor intermedio entre  $Q_{50}$  y  $Q_5$  que equivale a una altura de 0.5m. Por otro lado, la zona del deflector cercana al muro equivale a la cota del T2 y por tanto, se establece una altura (H2) de 1.26m por encima de la punta, o 1.76m desde la cota del lecho.

– **Ángulo del deflector ( $\theta$ ):**

La selección del ángulo ( $\theta$ ) se basa en la curvatura del río y el ancho de influencia deseado para los deflectores. En el presente estudio, el objetivo es proteger las orillas desnudas resultantes de la remoción de la solera, buscando centralizar el cauce, es decir, desplazar el thalweg hacia el lado interno de la curva. Se realizarán dos simulaciones, una con un ángulo de  $45^\circ$  y otra con un ángulo de  $90^\circ$ , con el propósito de determinar qué opción ofrece mejor rendimiento.

La disposición del ángulo depende de la magnitud de los caudales. Los deflectores orientados hacia aguas arriba se diseñan para manejar caudales frecuentes, como aquellos del 50% de probabilidad ( $Q_{50}$ ). Estos deflectores protegen la base de las laderas fluviales o estructuras de contención, y suelen quedar sumergidos en caudales mayores, como aquellos superiores al T2 ( $\approx$  MCO). En cambio, los deflectores orientados aguas abajo se diseñan para caudales mayores y no deben quedar sumergidos en caudales ordinarios. En las dos simulaciones del presente estudio la disposición del ángulo estará orientado hacia aguas arriba.

– **Longitud real (L) y longitud efectiva (Le):**

La longitud real (L) es un parámetro que depende de la longitud efectiva (Le) que se desea obtener. Basado en la experiencia, el criterio recomendado en los manuales del NRCS

(Natural Resources Conservation Service: Technical Supplement 14H) se establece que la longitud efectiva debe situarse dentro del siguiente rango de valores:

$$\frac{A}{10} < Le < \frac{A}{4}$$

donde "A" representa la anchura del cauce. Para una anchura del cauce (A) de 11 metros, se obtiene el siguiente rango para la longitud efectiva:

$$1.1 < Le < 2.75$$

El objetivo principal de este diseño es la protección de las orillas y la centralización del flujo de agua, lo cual implica que la longitud efectiva debería aproximarse más al límite superior del rango ( $\frac{A}{4}$ ). Para fines de cálculo, se ha supuesto una longitud efectiva de 2.5m.

Conforme al mismo criterio recomendado, la longitud real (L) se determina de la siguiente manera en función del ángulo considerado:

Para ángulos  $\leq 45^\circ$  □  $L = Le/\text{seno}(\text{ángulo}) = Le/\text{seno}(45^\circ)$ , por lo tanto  $L=3.5$  m

Para ángulos =  $90^\circ$  □  $L = Le$ , por lo tanto  $L = 2.5$ m

En ríos naturales, es común anclar lateralmente una parte del deflector para garantizar su estabilidad. Sin embargo, en este caso particular, dado que el cauce posee paredes de hormigón, esta práctica resulta innecesaria. Por lo tanto, no se han calculado las longitudes correspondientes al enterramiento del deflector.

– **Ancho del deflector (a):**

La anchura del deflector se establece de forma generalizada en 1.5m de ancho. Se basa en el tamaño mínimo de roca a utilizar que se especifica más adelante. Esta anchura es suficiente para influir significativamente en el flujo de agua y dirigirlo hacia áreas deseadas, sin obstruir de manera excesiva el canal del río.

– **Separación de los deflectores (D):**

La separación de los deflectores depende tanto de la curvatura como de la potencia del río. Cuanto más cerrado sea el ángulo y cuanto mayor sea el nivel de energía alcanzado en el tramo más juntos deberán colocarse los deflectores (Jamieson et al., 2009). En el caso de estudio, las curvas son suaves, y la recomendación a seguir para definir la separación es usar entre 4-10 veces la longitud efectiva (Design Methods for In-Stream Flow Control Structures. Washington, DC, 2014). Por otro lado, la configuración hidromorfológica del río Guadarrama en los tramos previos al núcleo urbano de Collado-Villalba es la de un río lleno, todavía con bastante energía ( $n^{\circ}$  Froude=0.8 para T2), sin meandros, y con presencia de algunas rocas y rápidos en el cauce. Debido a lo anterior puede ser necesario disminuir la separación calculada anteriormente. Por tanto, se establece una primera modelización con una separación de deflectores de 20m. En función de los resultados se puede optar por realizar una nueva modelización con una separación de 15m.

– **Tamaño del material (T):**

Para definir el tamaño medio de roca se va a seguir la misma metodología que se propone en el informe “Anexo 6 - soluciones de bioingeniería” por SCIA S.L. (2020) en el cual se utiliza el método del U.S. Bureau of Reclamation (USBR EM-25) que propone la siguiente fórmula:

$$D_{50} = 0.0122 \times Va^{2.06}$$

Donde:

$D_{50}$  = Tamaño de la roca en pies (1 metro = 3,2808 pies)

$Va$  = Velocidad media en pies/s

Esta ecuación determina el tamaño de roca que puede ser transportado por un por un flujo de agua a una velocidad de arrastre determinada.

Como se ha comentado anteriormente, para estar al lado de la seguridad, se opta por escoger la velocidad más desfavorable que es la velocidad obtenida en la simulación de T10 sobre el lecho de arena, donde la velocidad es mayor ( $4.92\text{m/s} = 16,14\text{ft/s}$ ). Por tanto, el tamaño mínimo de roca es  $3.75\text{ft} = 1.14\text{m}$ . Este es el tamaño mínimo de roca que se utilizará en la zona más expuesta del deflector ya que debe soportar mayores tensiones. Se utilizará material de menor calibre cuanto más cerca del anclaje lateral, es decir, de la

orilla. Para la gradación del material a utilizar se podrán seguir los métodos incluidos en los manuales técnicos NEH654 TS14C y NEH654 TS14G.

En la siguiente tabla se recogen todos los datos calculados del dimensionamiento de los deflectores:

Tabla 8. Resumen de los valores calculados del dimensionamiento de los deflectores seleccionados para el tramo A. Fuente: Elaboración propia.

DIMENSIONAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DEL TRAMO A		
Parámetro	Valor	
Altura del deflector en la parte más distal (H1)	0.5m	
Altura del deflector cercana al muro (H2)	1.76m	
Ángulo del deflector con relación a la orilla ( $\theta$ )	45°	90°
Longitud real del deflector (L)	3.5m	2.5m
Longitud efectiva del deflector (Le)	2.5m	
Ancho del deflector (a)	1.5m	
Separación entre deflectores (D)	15-20m*	
Tamaño del material (T)	1.14m	

\*Al comienzo se utilizó una separación entre deflectores de 20m, con un resultado inefectivo, ya que el flujo seguía erosionando la orilla (las velocidades entre deflectores siguen siendo altas). Se probó con 10m y se obtuvieron resultados positivos pero se estima que habría un sobre coste estructural. Después de realizar varios intentos, se establece que la separación entre deflectores más efectiva es de 15m. (figura 30, anexo 4). El resto de los parámetros están correctamente dimensionados como se podrá comprobar en el análisis de la situación post-operacional.

#### 5.4.3.2. Dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería para el tramo B

##### 1. Dimensionamiento de las barras laterales y las islas.

Los parámetros que definen el dimensionamiento de las barras laterales son los que se presentan a continuación y su aplicación es la misma para las islas:

- **Longitud:** Se establecerán tres barras laterales con una longitud de 30m y dos barras laterales con una longitud de 60m, manteniendo una separación de 30m entre ellas.
- **Anchura:** La anchura de las barreras se ha determinado siguiendo el mismo

criterio que la longitud efectiva de los deflectores, situándose entre  $W/10$  y  $W/4$ , resultando en una anchura específica de 2.5m.

- **Altura:** Las barras laterales tendrán una altura equivalente a la parte más distal de los deflectores, es decir, 0.5m metros
- **Tamaño del material:** En ambos casos el perímetro de las estructuras se compondrá de rocas con tamaño de 1.2m. Para que la estructura tenga una altura de 0.5m se deberá enterrar el 0.7m restantes. El interior de ambas estructuras se rellenará con rocas de menor tamaño equivalente a 0.3-0.5m

## 2. Dimensionamiento rampa centradora

Siguiendo el mismo criterio establecido en la guía “Design Methods for In-Stream Flow Control Structures”, (2014) y tal como se muestra en la figura 27 la rampa centradora se construye de la siguiente forma:

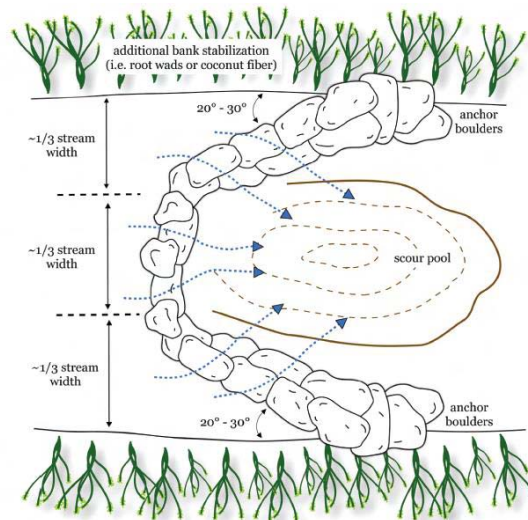


Figura 27. Diseño de una rampa centradora constituida por una única estructura. Fuente: Design Methods for In-Stream Flow Control Structures (2014)

- **Disposición:** Dos deflectores dispuestos hacia aguas arriba que ocupan 1/3 del ancho del canal.
- **Ángulo:** El ángulo formado entre la orilla y el deflector es de 30°
- **Ancho:** Se establece el mismo ancho que los deflectores, es decir, 1.5m
- **Altura:** La altura de las rampas es descendente hacia la parte central de la estructura. Es decir, la parte cercana al muro tendría una altura de 0.5m mientras que la parte central estaría a la cota del lecho. Sin embargo, para la modelización se establecerá una altura constante de 0.5m. Se tiene constancia de que esta

modificación no supondrá cambios significativos en los resultados.

- **Longitud real:** Al realizar el esquema de la rampa centradora con los criterios principales se obtiene una longitud real de 7.2m

Para la doble rampa centradora ubicada antes del puente, es fundamental considerar la distancia de colocación para proteger los pilares del puente. Según Johnson et al. (2002), se recomienda que esta distancia sea de 1.5 a 2 veces la anchura del cauce. Por lo tanto, si la anchura del cauce es de 11m, la distancia de la doble rampa centradora respecto al puente debe ser de 20m.

### 3. Dimensionamiento hileras de rocas.

El factor más decisivo para esta estructura es el tamaño de roca. El tamaño mínimo estimado para los deflectores es de 1.14m. En consecuencia, se ha fijado un tamaño de roca de 1.2 metros, separadas por una distancia de 1 metro y manteniendo un margen de seguridad de 1.5 metros con las orillas. Se dispondrán 3 hileras de rocas con 4, 3 y 2 rocas respectivamente, y la distancia entre hileras será de 1 metro. La posición de las rocas en cada hilera estará intercalada con respecto a las posiciones de la hilera anterior, lo que favorecerá la división del flujo.

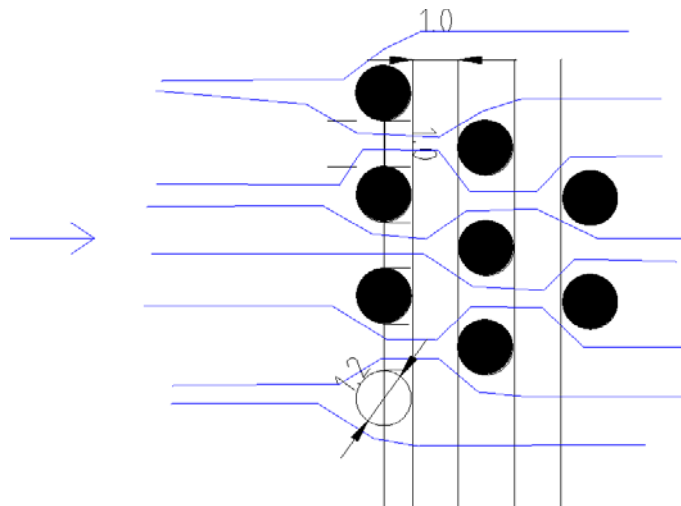


Figura 28. Esquema de la disposición de las hileras de roca. Fuente: Guillermo Tardío.

En la siguiente tabla se recogen todos los datos calculados del dimensionamiento de las cuatro técnicas seleccionadas:

Tabla 9. Resumen de los valores calculados del dimensionamiento de las cuatro técnicas seleccionadas del para el tramo B.. Fuente: Elaboración propia.

<b>DIMENSIONAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DEL TRAMO B</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Barras laterales</b>	<b>Islas</b>	<b>Hilera de rocas</b>	<b>Rampa centradora</b>
Altura (H)	0.5m	0.5m	1.2m	0.5m
Ángulo de la técnica con relación a la orilla ( $\theta$ )	-	-	-	30°
Longitud real (L)	30m 60m	15m 30m	5.6m (conjunto)	7.2m
Ancho (a)	2.5m	2.5m	3.4 -7.8m	1.5m
Separación entre la misma técnica (m)	30m	30m	55-85m	30m
Tamaño del material (T)	0.3-1.2m	0.3-1.2m	1.2m	1.14m

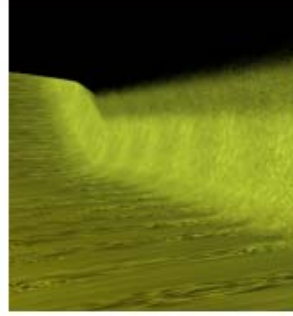
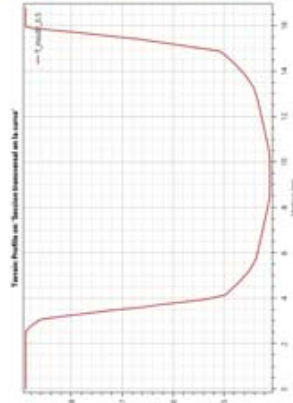
#### 5.4.4. Síntesis de la situación pre-operacional

### SÍNTESIS DE LA FASE PRE-OPERACIONAL

#### OBJETIVOS

- Obtener valores de calados y velocidades.
- Dimensionamiento de las técnicas de bioingeniería.

#### MODELO DE SIMULACIÓN



#### RESULTADOS

PARÁMETROS SELECCIONADOS					
Valores máximos					
	Q <sub>10</sub>	Q <sub>5</sub>	T2	T10	
Sustrato de arena (a corto plazo)	Calado (m)	0.19	0.59	1.40	2.18
	Velocidad (m/s)	0.85	1.84	3.25	4.92
	Tensión de fondo (N/m <sup>2</sup> )	6.4	27.39	74.59	126.37
Sustrato con vegetación (a largo plazo)	Calado (m)	0.24	0.73	1.76	2.8
	Velocidad (m/s)	0.56	1.26	2.4	4
	Tensión de fondo (N/m <sup>2</sup> )	8.3	33.5	96.36	173.61

#### DIMENSIONAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DEL TRAMO A

Parámetro	Valor
Altura del deflector en la parte más distal (H1)	0.5m
Altura del deflector cercano al muro (H2)	1.76m
Ángulo del deflector con relación a la orilla (θ)	45°
Longitud real del deflector (L)	3.5m
Longitud efectiva del deflector (L <sub>e</sub> )	2.5m
Ancho del deflector (a)	1.5m
Separación entre deflectores (D)	15-20m*
Tamaño del material (T)	1.14m

#### DIMENSIONAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DEL TRAMO B

Parámetro	Barras laterales	Islas	Hileras de rocas	Rampa centradora
Altura (H)	0.5m	0.5m	1.2m	0.5m
Ángulo de la técnica con relación a la orilla (θ)	-	-	-	30°
Longitud real (L)	30m	15m	5.6m (conjunto)	7.2m
	60m	30m	3.4-7.8m	1.5m
Ancho (a)	2.5m	30m	55-85m	30m
Separación entre la misma técnica (m)	30m	0.3-1.2m	1.2m	1.14m
Tamaño del material (T)	0.3-1.2m	0.3-1.2m	1.2m	1.14m

#### PARÁMETROS DEL MODELO

CONDICIONES DE CONITORNO			Valores Tabla 3
Condición de entrada	Hidrograma		0.5
Condición de salida	Normal Depth		
PLAN DE SIMULACIÓN			
Tiempo de simulación	24h(T10)	12h(Q5)	6h(Q50)
Intervalo computacional	1-5 segundos		
Intervalo de mapeado	1 o 10 minutos		
RUGOSIDAD			
A corto plazo - Arena	0.025		
A largo plazo - Vegetación	0.04		
Nº total de modelizaciones (en detalle Anexo 8)			8

## 5.5. Situación post-operacional

A continuación, se van a realizar las simulaciones de las cuatro hipótesis propuestas; dos en el tramo curvo (A) y las otras dos en el tramo recto (B):

- Hipótesis A1 → Deflectores en la curva con ángulo 45°.
- Hipótesis A2 → Deflectores en la curva con ángulo 90°.
- Hipótesis B1 → Doble rampa centradora antes del puente. Barras laterales e hileras de rocas en el resto del tramo.
- Hipótesis B2 → Doble rampa centradora antes del puente. Islas alternadas con rampas centradoras simples en el resto del tramo.

El propósito es analizar los resultados y comparar entre ambas hipótesis de cada tramo para determinar cuáles son las mejores opciones y más beneficiosas para el río Guadarrama a su paso por Collado Villalba.

### 5.5.1. Preparación del modelo

Para la situación post-operacional la preparación del modelo consiste en introducir las técnicas seleccionadas mediante la extensión de RAS-Mapper. El procedimiento completo se explica en el anexo 5. Las siguientes figuras 29 y 30 muestran el resultado final de la incorporación en el modelo de las técnicas de bioingeniería correspondientes a cada hipótesis:

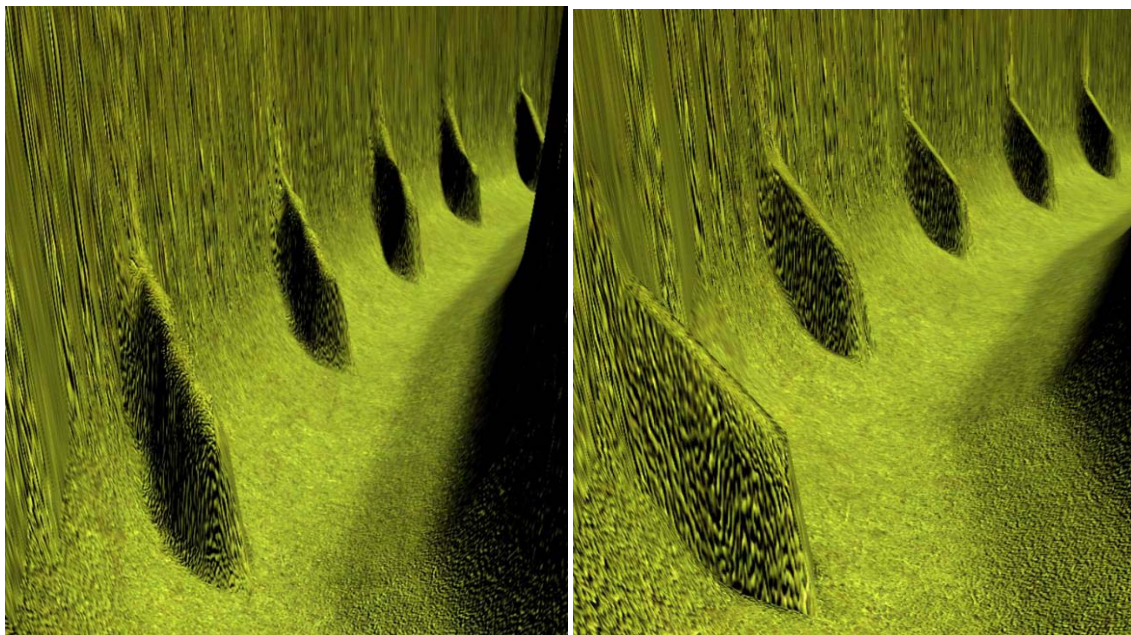


Figura 29. Resultados en 3D de la incorporación de los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

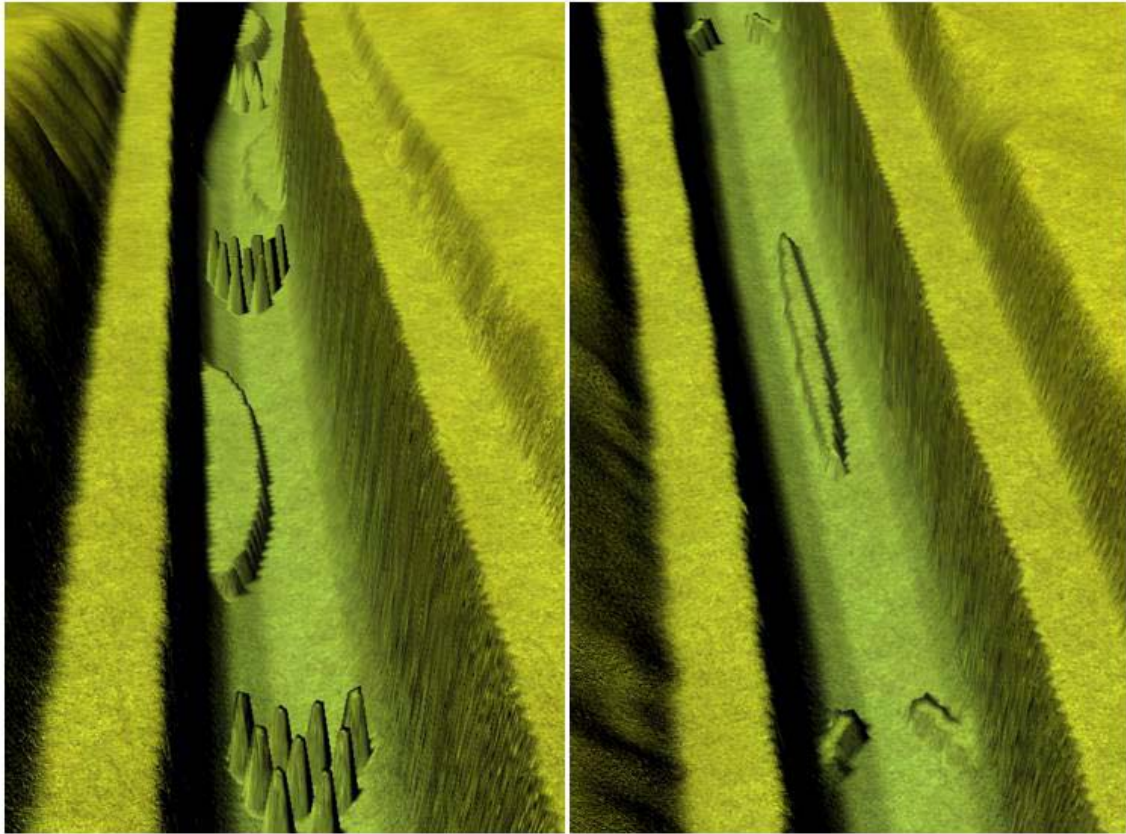


Figura 30. Resultados en 3D de la incorporación de las técnicas de bioingeniería correspondientes a la hipótesis B1 (izquierda) y B2 (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia

### 5.5.2. Análisis del resultado del modelo

A continuación, se presentan los resultados correspondientes sobre zonas detalladas de las modelizaciones, con el propósito de facilitar la comprensión de lo expuesto. Para revisar las modelizaciones completas se debe consultar el anexo 7.

#### 5.5.2.1. Resultados de las hipótesis propuestas para la zona A

##### 1. Comparativa de los efectos de las técnicas aplicadas.

Se presenta la figura 31 para explicar los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas propuestas. Esta figura ofrece una escala más detallada al mostrar exclusivamente la primera curva de la zona de estudio. Además, el rango de valores de velocidad mostrada en la leyenda se amplía para facilitar la visualización de los efectos deseados. Este detalle se presenta para las tres hipótesis bajo el caudal  $Q_5$  dado que los efectos resultantes se visualizan de una forma más clara. Posteriormente, se analizarán los mismos resultados pero para el caudal temporal T2, ya que este último representa una posible avenida capaz de sumergir los deflectores. Por último se analizará lo que sucede para caudales ordinarios ( $Q_{50}$ ).

**Resultados detallados de velocidad (m/s) para  $Q_5$  (sobre arena)**

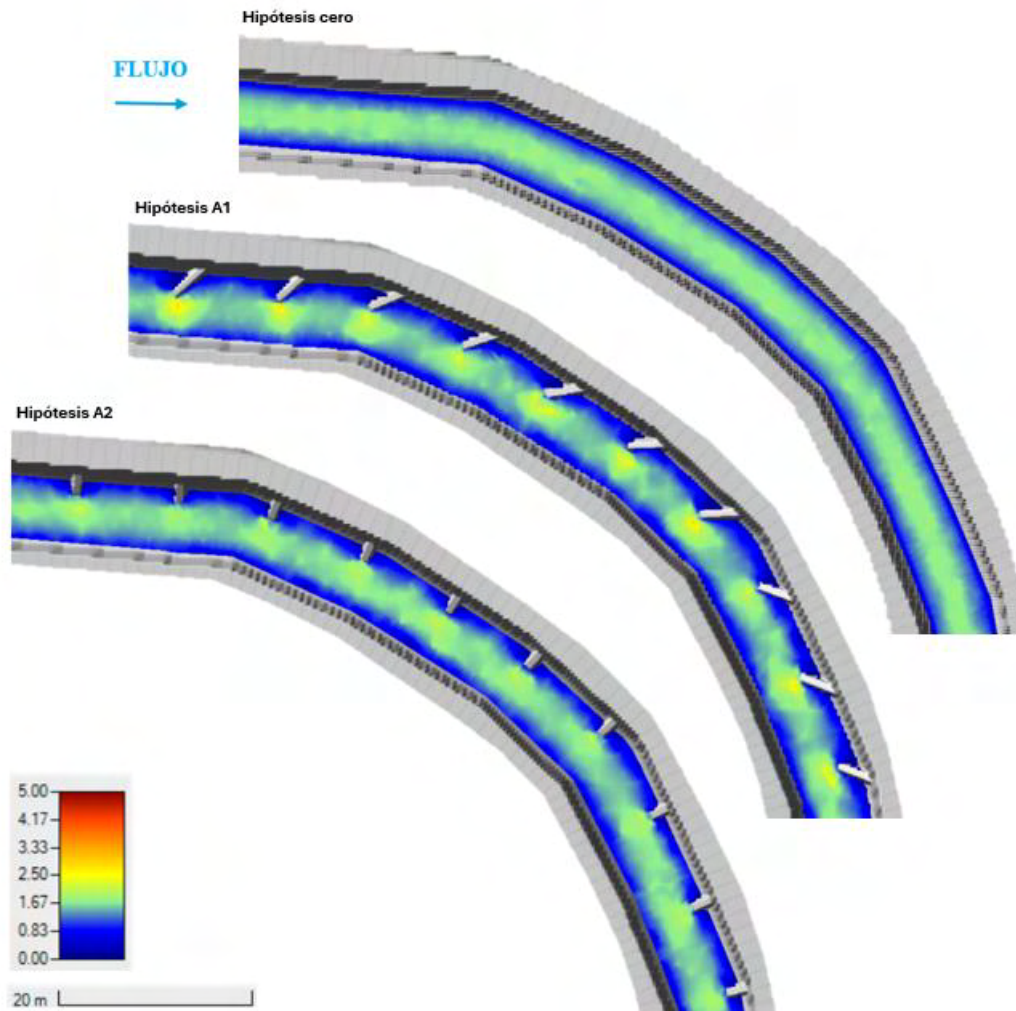


Figura 31. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de la **hipótesis cero** el río Guadarrama presenta un flujo uniforme a lo largo del canal hormigonado. La velocidad en la parte central del canal es de 1.7m/s y se reduce de forma lineal según se aproxima al borde. Los últimos 0.9m más cercanos a la orilla la velocidad es menor a un 1m/s (franja azul). La diversidad hidrodinámica es prácticamente inexistente.

En la **hipótesis A1**, se aprecia que los deflectores de 45° producen un cambio significativo en el comportamiento del flujo que se detallará a continuación. Lo primero que se distingue es que el flujo se centraliza. Cuando el flujo se encuentra con un deflector en un ángulo de 45°, se ve forzado a cambiar de dirección hacia el centro del canal. Coincide

que esta zona de convergencia que se da en la punta del deflector, el cauce tiene una sección transversal más reducida. Según el principio de continuidad, para que el caudal se mantenga constante, la velocidad del flujo debe aumentar en estas áreas. Por ello, las velocidades máximas se encuentran en la punta de cada deflector. Aparte, la presencia del deflector da lugar a aceleraciones de tipo local y convectivo. El aumento de la velocidad en estas zonas puede provocar turbulencias que dan lugar a dos hechos. El primero es la socavación del lecho, lo que puede dar lugar a la formación de pozas y, consecuentemente, a la formación de nuevos hábitats. Por otro lado, las turbulencias oxigenan el agua mejorando la calidad de la misma. Además, se detecta un aumento de la diversidad hidrodinámica ya que en este flujo central se observa una alternancia de velocidades rápidas en las puntas de los deflectores y velocidades lentas en el espacio central entre ellos.

Otro efecto visible es la franja azul que representa las velocidades bajas. Esta franja tiene un ancho de entre 2m entre los deflectores y 3m alrededor de ellos, lo cual es considerablemente mayor en comparación con la hipótesis cero. Las áreas de velocidades más bajas permiten la activación de procesos de sedimentación. De esta forma se potencia la protección de las orillas y contribuye a la formación de hábitats futuros.

Otro aspecto relevante es que el dimensionamiento de los deflectores está adecuadamente calculado, ya que logra el efecto deseado sin inducir efectos secundarios no deseados, como la erosión de la orilla opuesta debido a una longitud efectiva excesiva. Otra forma de evaluar si el dimensionamiento es correcto es a través de los calados (figura 32). El calado para el cuantil  $Q_{50}$  debe al menos tocar la parte más distal del deflector. En el caso del cuantil  $Q_5$  el calado debe llegar a la punta del deflector e incluso puede llegar a cubrirla. Finalmente, el calado para el T2 debe cubrir el deflector al completo.

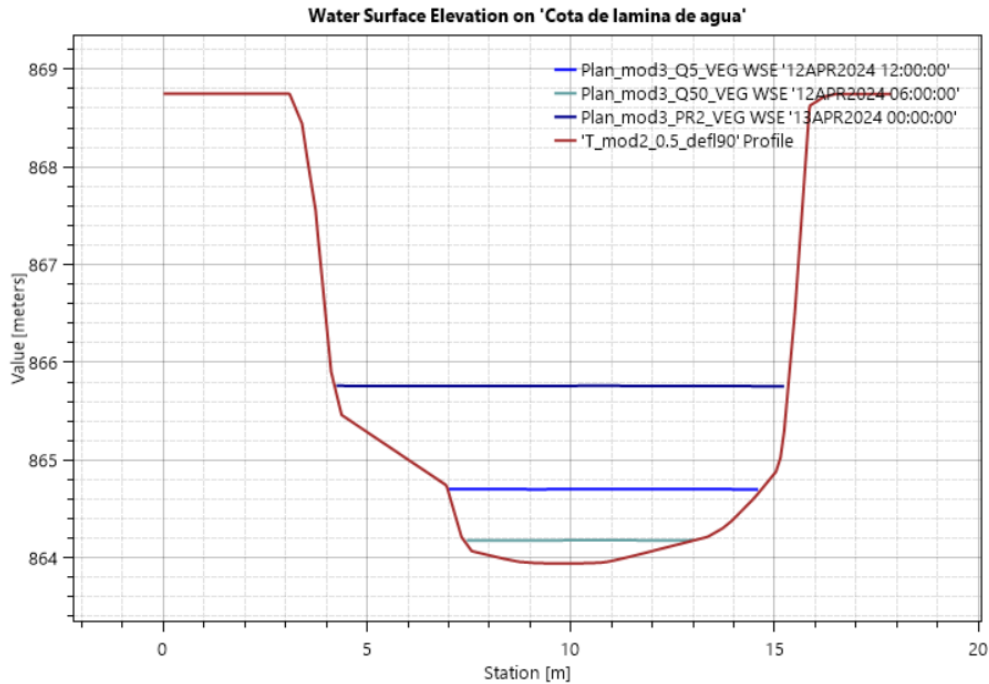


Figura 32. Cota de la lámina de agua alcanzada sobre el deflector para los distintos caudales. Justificación de un correcto dimensionamiento de los deflectores. Fuente: Elaboración propia.

En conclusión la hipótesis A1 cumple con los objetivos principales y secundarios propuestos en la tabla 6.

En referencia a los deflectores de 90° de la **hipótesis A2**, se observa que su efecto es más limitado en comparación con la hipótesis A1. Al igual que en esta última, se logra centralizar el flujo y cumple con el objetivo principal de proteger las orillas. Sin embargo, la variación del flujo es menos pronunciada que con los deflectores de 45°, lo que reduce la diversidad hidrodinámica sobre este aspecto. Además, el área potencial de sedimentación es menor en un 50% en comparación con el escenario anterior, con un ancho variable entre 1.2m entre los deflectores y 2m alrededor del deflector. En este caso, el contraste de velocidades en las zonas entre deflectores es menor que en el caso de los deflectores a 45 ° por lo que diversidad morfofuncional conseguida es menor. Por otro lado, también es reseñable que el diseño y cálculo de los deflectores se considera apropiado.

Finalmente, se concluye que aunque la hipótesis A2 cumple con los objetivos primarios y secundarios, lo hace de manera menos efectiva que la hipótesis A1.

A continuación se va a analizar los resultados obtenidos para el periodo de retorno de 2

años (próximo al caudal generador):

**Resultados detallados de velocidad (m/s) para T2 (sobre arena)**

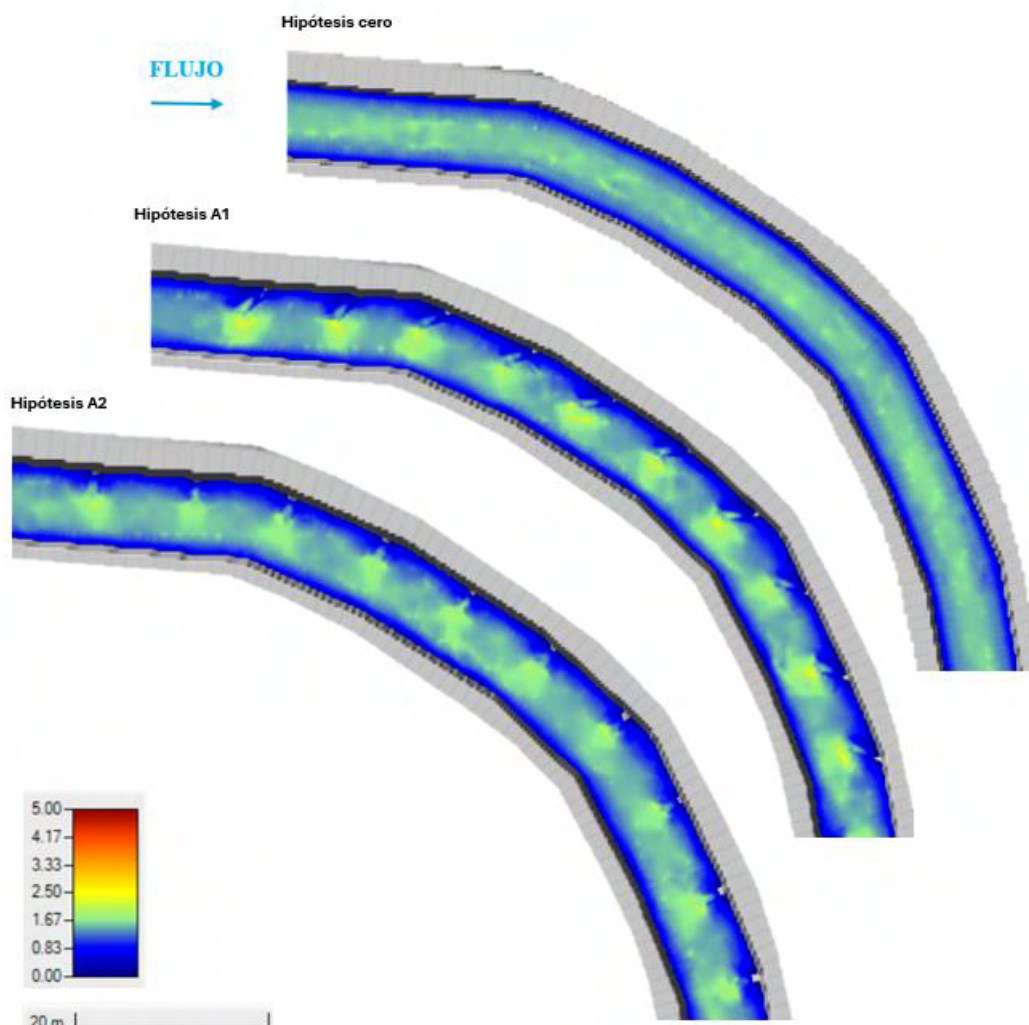


Figura 33. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver los efectos son idénticos a la situación anterior para caudales  $Q_5$  lo que indica que las estructuras funcionan de manera eficaz incluso en condiciones de inundación completa (totalmente sumergidas). Se observa una variabilidad menor para caudales superiores, como el periodo de retorno de 10 años (figura 42, anexo 7).

Por último, para una situación con un caudal más habitual ( $Q_{50}$ ) los deflectores siguen cumpliendo su función con los mismos efectos que para  $Q_5$  pero a menor escala. Es decir, la variabilidad en los patrones de velocidad es idéntica pero los valores respectivos a la magnitud se ven atenuados, mientras que los patrones de flujo son similares con la excepción de que los deflectores no quedan sumergidos (figura 39, anexo 7)

## 2. Comparativa de zonas de sedimentación

Para obtener los resultados presentados a continuación, se ha empleado un enfoque de modelización alternativo. El programa se ejecuta utilizando un conjunto de ecuaciones de cálculo distintas (SWE-ELM), que consideran las ecuaciones de ondas de difusión o de aguas poco profundas. Este método permite que la representación del trazado de partículas de velocidad sea más realista, porque tiene en cuenta la componente de la aceleración. Para comprender mejor el SWE-ELM se puede consultar el anexo 6.

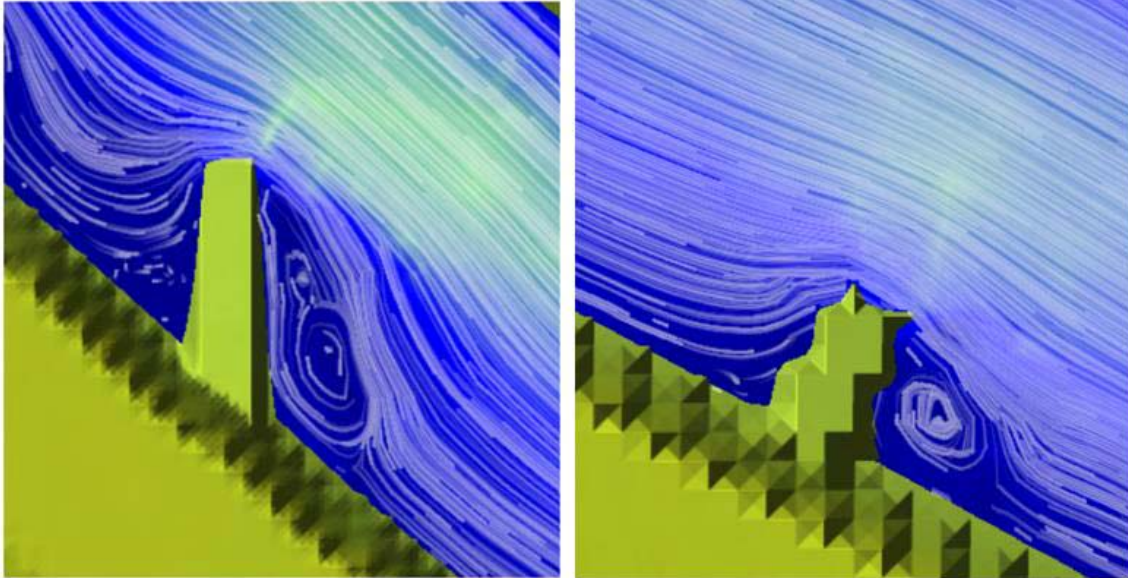


Figura 34. Detalle de la convergencia de la velocidad resultado de la acción de los deflectores y sus respectivas zonas de sedimentación. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados presentados en las figuras anteriores, se puede hacer un análisis detallado de la influencia de los deflectores de 45° y 90° en los procesos de sedimentación y las características de flujo resultantes.

En el caso de los deflectores de 45° (figura izquierda), se identifican dos zonas principales de sedimentación. La primera zona se encuentra en la parte delantera del deflector (aguas arriba), mientras que la segunda se localiza en la parte posterior (aguas abajo). En esta última, se genera una zona de turbulencias con baja velocidad detrás del deflector (aguas abajo). Estas turbulencias no solo oxigenan el agua, sino que también crean un hábitat favorable para las especies acuáticas debido a que la velocidad del flujo en esa área es menor.

Por otro lado, los deflectores de 90° (figura derecha) presentan una única zona predominante de sedimentación, localizada en la parte posterior del deflector (aguas abajo). Aunque es posible que se produzcan procesos de sedimentación en la parte frontal, estos son menos significativos. Al igual que con los deflectores de 45°, se observa la

formación de una zona de turbulencias de baja velocidad detrás del deflector, lo cual es beneficioso tanto para las especies acuáticas como para la mejora de la hidrodinámica del cauce. Sin embargo, la extensión de esta zona de turbulencias es menor en comparación con la generada por los deflectores de 45°.

Por último, al observar de forma más general lo que sucede en las zonas entre dos deflectores (figura 35) se aprecia un mayor grado de turbulencias en los deflectores con ángulo de 45° lo cual explica el que se consiga una mayor variabilidad hidrodinámica con esta configuración. Esto se debe al diferente ángulo de inclinación de las líneas de corriente en las zonas entre deflectores. En el caso de la configuración de 90° las líneas de corriente permanecen paralelas al margen, lo cual no favorece la generación de corrientes secundarias y por ende, no se fomenta la aparición de estas zonas turbulentas que resultan interesantes.

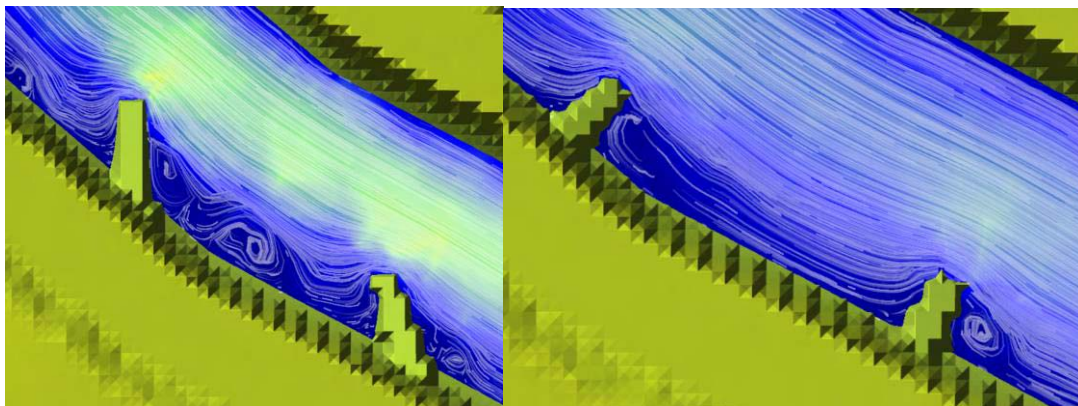


Figura 35. Detalle del efecto que se produce en la zona entre los deflectores. Fuente: Elaboración propia.

### 3. Comparativa entre el escenario a corto plazo (con arena) y a largo plazo (con vegetación)

Para enfatizar la importancia de este apartado, es fundamental recordar su propósito: asegurar la seguridad en todas las situaciones (a corto y largo plazo) al momento de dimensionar los deflectores. Actualmente, el escenario con lecho de arena implica velocidades más altas, lo cual influye en la elección del tamaño mínimo de las rocas para garantizar su resistencia a lo largo del tiempo. Por otro lado, en un escenario futuro donde se establece la vegetación, los calados determinan las cotas donde deben implementarse las técnicas para asegurar su funcionalidad.

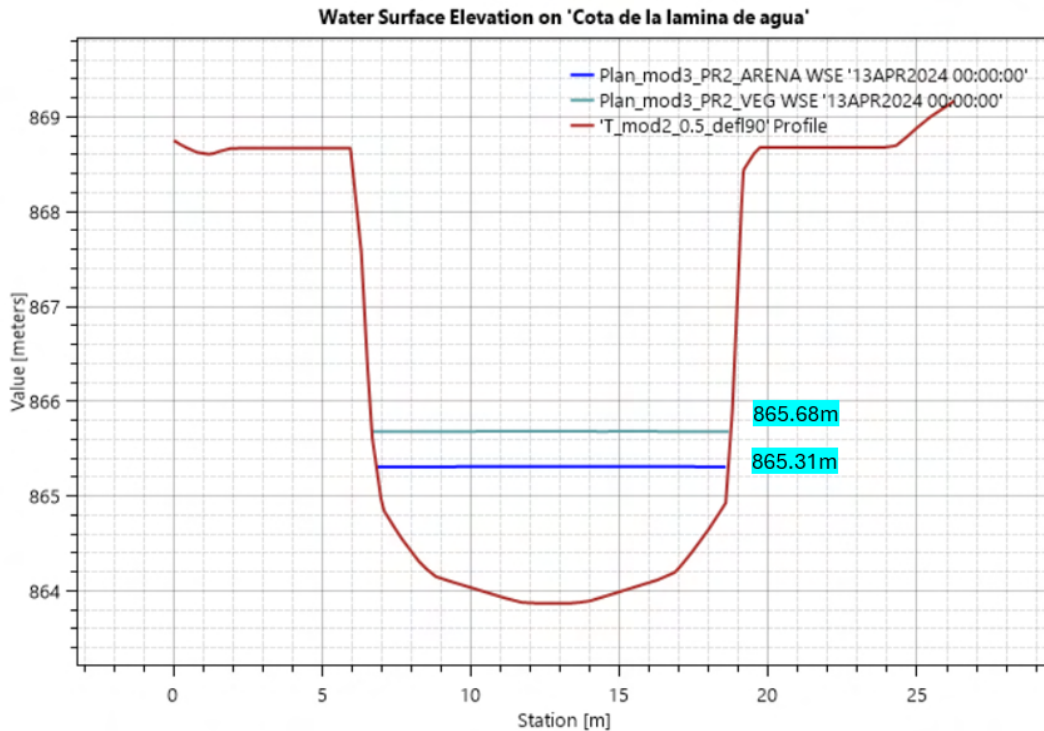


Figura 36. Sección transversal donde se representa la cota de lámina de agua obtenida en las simulaciones (T2) en el corto plazo (con arena) y la situación futura (con vegetación). Fuente: Elaboración propia.

En la sección transversal se representa la cota de lámina de agua para ambos casos de estudio. En la situación a corto plazo se obtiene 1.46m de calado sobre el thalweg mientras que en la situación futura donde se establece la vegetación el resultado se incrementa en 0.37m respecto a la situación anterior. Estos resultados son coherentes con los cálculos previos del dimensionamiento de los deflectores en ambas hipótesis.

### 5.5.2.2. Resultados de las hipótesis propuestas para la zona B

A continuación, se presentan los resultados correspondientes sobre zonas detalladas de las modelizaciones, con el propósito de facilitar la comprensión de lo expuesto. Para revisar las modelizaciones completas se debe consultar el anexo 8. El detalle que se presenta de forma individual de cada una de las técnicas es resultado de una modelización (SWE-ELM).

## 1. Comparativa de los efectos de las técnicas aplicadas.

**Resultados de velocidad (m/s) para  $Q_5$  (sobre arena)**

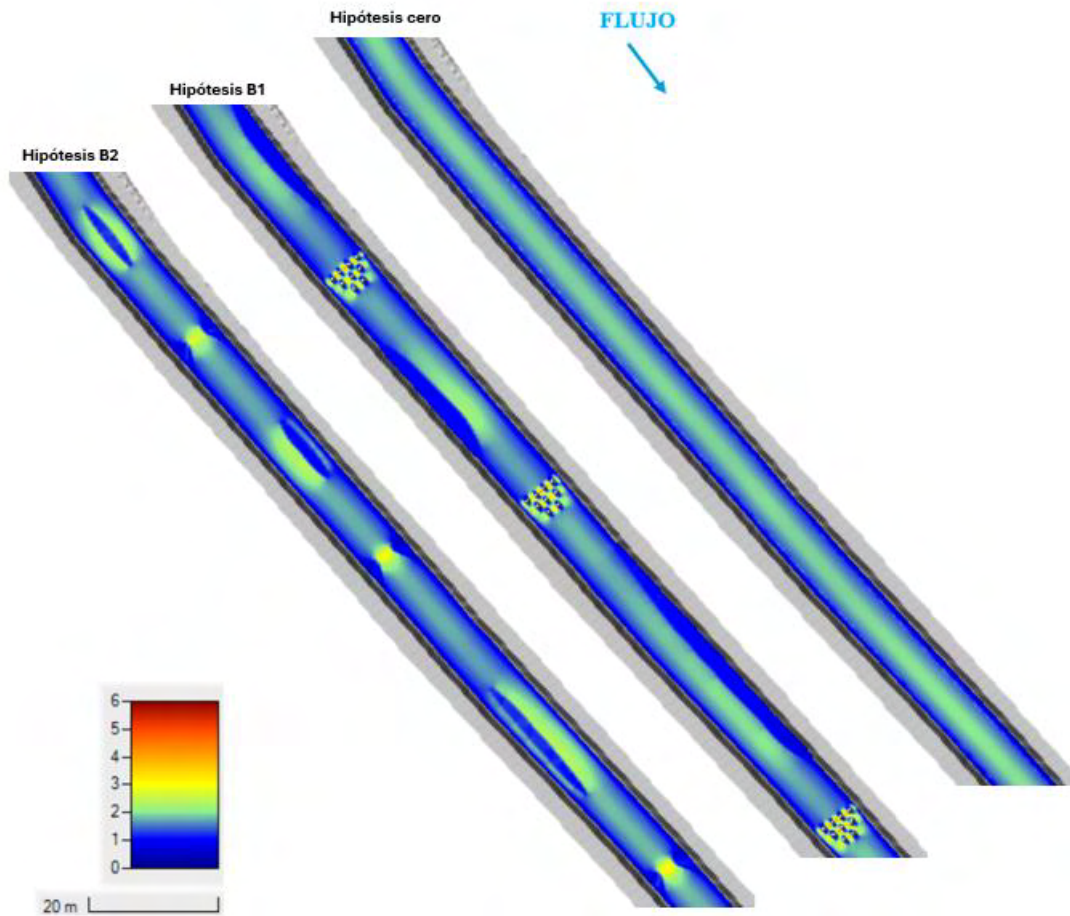


Figura 37. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

La **hipótesis cero** del tramo recto es un canal con una velocidad uniforme de 1.88m/s en el centro del canal. Esta velocidad se reduce al aproximarse a las orillas. No se presenta ningún tipo de diversidad morfofuncional.

La **hipótesis B1**, que incluye barras laterales e hileras de rocas, evidencia una mejora en la diversidad morfofuncional del sistema fluvial, respecto a la hipótesis cero. Las barras laterales inducen variaciones en la dirección del flujo, que aportan una sinuosidad leve en el cauce y le otorgan un carácter más natural. Asimismo, la configuración escalonada de las hileras de rocas centraliza el flujo y reduce la velocidad del flujo después de atravesar la estructura. (figura 38)

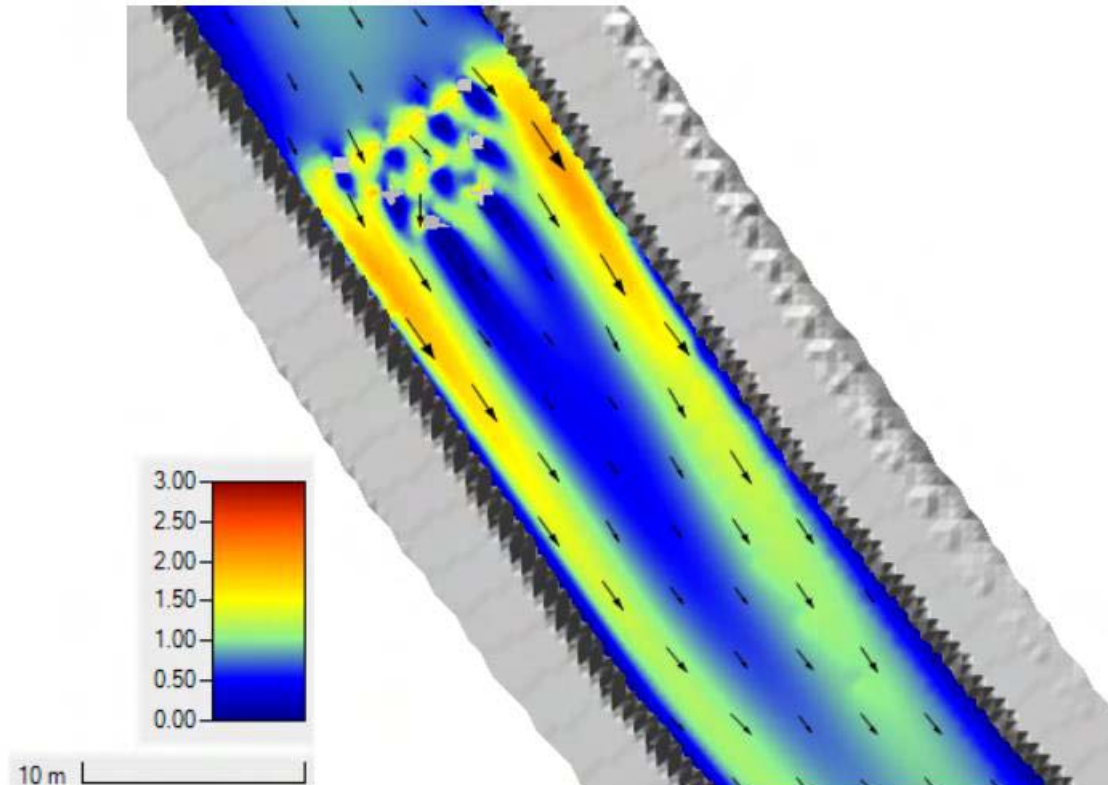


Figura 38. Detalle del efecto que se produce sobre las hileras de piedra para un cuantil de  $Q_5$ . Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en las proximidades de las rocas, se observan distintos patrones en la distribución de la velocidad, con la formación de áreas de baja velocidad (estancamiento) aguas abajo de las rocas y de alta velocidad (aceleración) entremedias de las rocas. Estos patrones crean turbulencias y remolinos, que no solo disipan la energía del flujo, sino que también mejoran la aireación del agua. Estas características pueden proporcionar refugios adecuados para diversas especies acuáticas además de mejorar la calidad del agua. El análisis de la velocidad del flujo revela variaciones considerables. Estos efectos se consiguen de forma puntual en las zonas donde se ubican las hileras de roca. Respecto a las velocidades alcanzadas en las barras laterales son levemente superiores a la hipótesis cero (2m/s) mientras que en las hileras de rocas se duplica su valor (4m/s). En las zonas localizadas entre las técnicas de bioingeniería la velocidad se reduce a 1.6 m/s.

En resumen, la hipótesis B1 proporciona diversidad en los patrones de velocidades y en los patrones de flujo (sinuosidad y centralización del flujo). Como resultado esta hipótesis aporta una **mayor naturalidad** al tramo.

La **hipótesis B2** está compuesta por rampas centradoras e islas fluviales posicionadas en

diferentes ubicaciones respecto al eje del cauce. Inicialmente, se propusieron islas centrales; sin embargo, se observó que esta disposición, combinada con las rampas centradoras, resultaba en un flujo con un aspecto simétrico y poco natural. El flujo se centralizaba y se dividía en dos corrientes de manera constante y monótona (figura 43, anexo 8). Por ello, se modificó la disposición a la configuración actual, donde algunas islas están centradas y otras se encuentran más cerca de una orilla. Esta disposición genera dos corrientes distintas: una principal, con mayor velocidad (2.3m/s), y otra, más estrecha y con menor velocidad (1.67m/s), próxima a la orilla. De esta forma, se obtiene una ligera sinuosidad, aunque es menor en comparación con la hipótesis B1.

Las rampas centradoras desempeñan eficazmente su función de centralizar el flujo (figura 39), lo que reduce significativamente la posibilidad de erosión de las orillas. El flujo centralizado alcanza velocidades de aproximadamente 2.8 m/s. En contraste, en las orillas, tanto aguas arriba (10m) como aguas abajo de la rampa (30m), se observan zonas de sedimentación (indicadas en azul oscuro) que facilitan el establecimiento de la vegetación. El efecto de la rampa centradora se extiende hasta 50m aguas abajo, lo que asegura una buena efectividad funcional. Posteriormente, se dispone de un margen de 30m antes de alcanzar la siguiente estructura (ya sea una isla o una barrera lateral, según la hipótesis considerada). Este margen permite que el flujo desacelere adecuadamente, promoviendo la variabilidad hidrodinámica, y que cambie de dirección, favoreciendo la variabilidad morfofuncional.

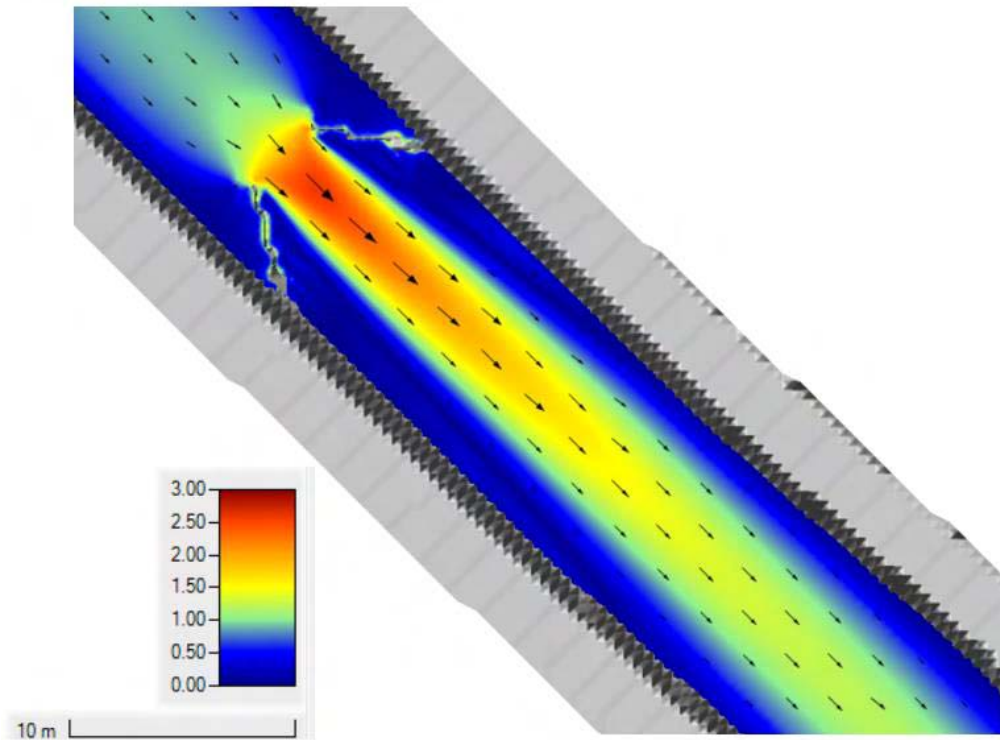


Figura 39. Detalle del efecto que se produce sobre la rampa centradora para un cuantil de  $Q_5$ . Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la variación de velocidad, se observa un fenómeno similar al de la hipótesis B1, con velocidades mayores alrededor de las estructuras y menores velocidades en las zonas intermedias entre ellas. Mientras que en la hipótesis B1 se consigue un mayor contraste entre las mayores y menores velocidades, en el caso de la hipótesis B2 se presenta una alternancia de velocidades mejor distribuida a lo largo del tramo. Esta alternancia de velocidades permite una mejor oxigenación del agua y por tanto, se considera que la hipótesis B2 fomenta **una mayor capacidad de autodepuración** del tramo.

En ambas hipótesis del tramo B, se implementa una doble rampa centradora en la zona previa al puente con el propósito de proteger los pilares del mismo. La figura 40 (izquierda) muestra claramente cómo el flujo se divide en dos y la velocidad del flujo en la zona central es menor. De esta forma, el pilar central del puente y los pilares de las orillas quedan protegidos o, con una menor probabilidad de erosión. No obstante, se ha comprobado que para velocidades superiores a 4.2 m/s, esta estructura pierde su eficacia (figura 40, derecha), centralizando el flujo como si se tratase de una única rampa centradora. Sin embargo, hay que recordar que el caudal que fluye tras la confluencia del río Guadarrama y el arroyo de la Poveda el 50% del tiempo ( $Q_{50}$ ) es equivalente a

0.69m<sup>3</sup>/s. Por tanto, la doble rampa centradora funcionará de forma efectiva con un margen de seguridad. Aun así, resulta necesario optimizar la geometría para que la rampa sea efectiva en caudales mayores. Se propone modificar el ángulo de los deflectores o aumentar su altura, aunque esta cuestión deberá abordarse en estudios futuros.

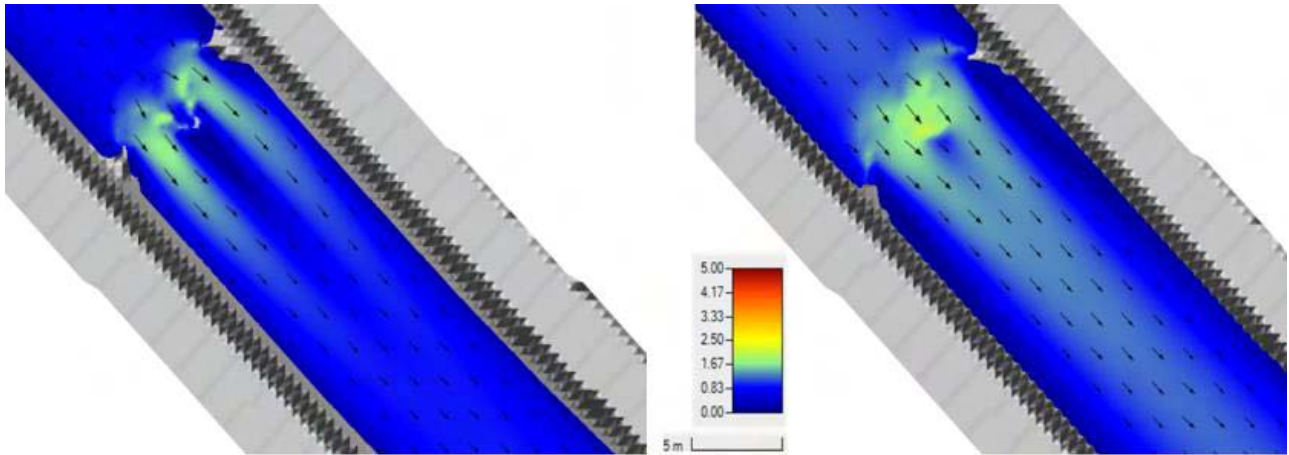


Figura 40. Detalle del efecto que se produce sobre la doble rampa centradora (W). A la izquierda se muestra la eficacia de la estructura mientras que a la derecha pierde eficacia con velocidades superiores a 4.2m/s. Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad. Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados de velocidad (m/s) para T2 (sobre arena)

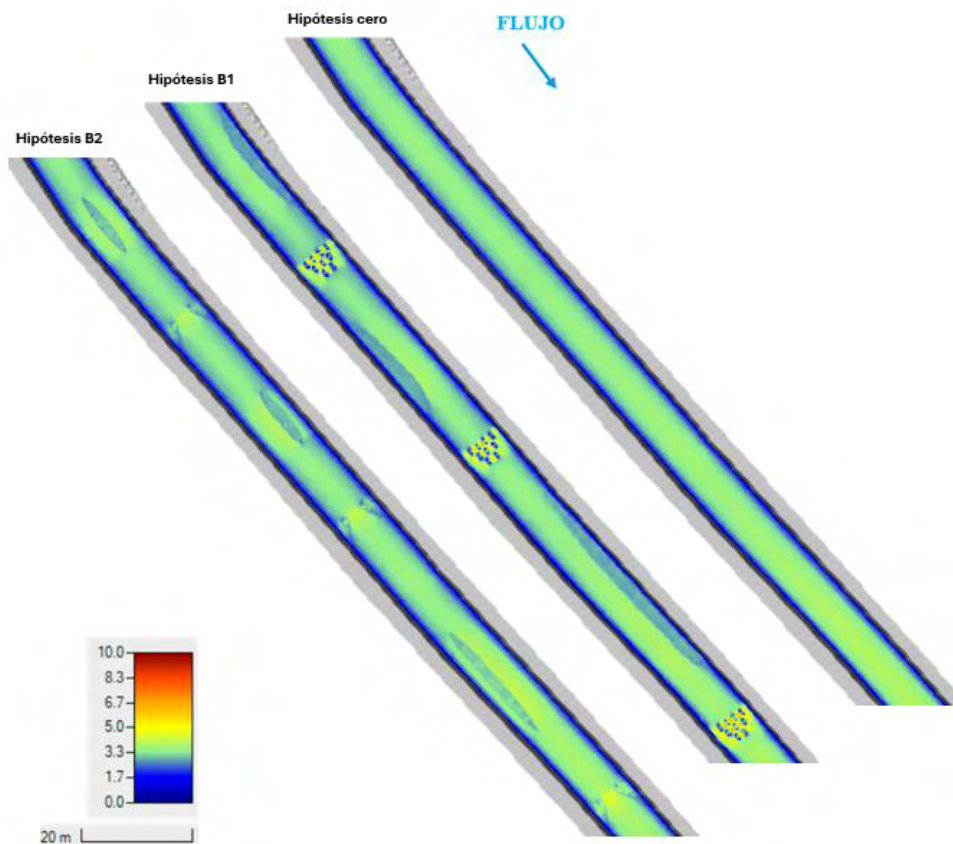


Figura 41. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del tramo curvo (Zona A), los resultados obtenidos para el periodo de retorno de 2 años en el tramo recto (zona B) muestran diferencias notables en comparación con el cuantil  $Q_5$ . Tanto la sinuosidad como la variabilidad en las velocidades se reducen en ambas hipótesis, aunque muestran diferencias en comparación con la hipótesis cero. Por lo tanto, aunque en menor medida, se mantiene una diversidad hidrodinámica y morfofuncional.

## **2. Comparativa de zonas de sedimentación**

Un aspecto común entre ambas hipótesis es que tanto las barras laterales (hipótesis B1) como las islas fluviales (hipótesis B2) son estructuras con un funcionamiento similar a la hora de retener y liberar sedimentos. En función de los diferentes aportes de sedimentos o eventos de avenidas estas estructuras podrán cambiar su morfología. Por ejemplo las islas más cercanas a la orilla podrían transformarse en barras laterales si el aporte de sedimentos o la colonización de la vegetación aumentan.

Por otro lado, la hipótesis B2 presenta una ventaja al incorporar rampas centradoras, ya que estas estructuras presentan unas amplias zonas potenciales de sedimentación (figura 42). En contraste, las hileras de rocas generan zonas de baja velocidad en las áreas inmediatamente posteriores a cada roca, aunque se prevé que la acumulación de sedimentos sea limitada debido a la formación de turbulencias en estas zonas. (figura 43).

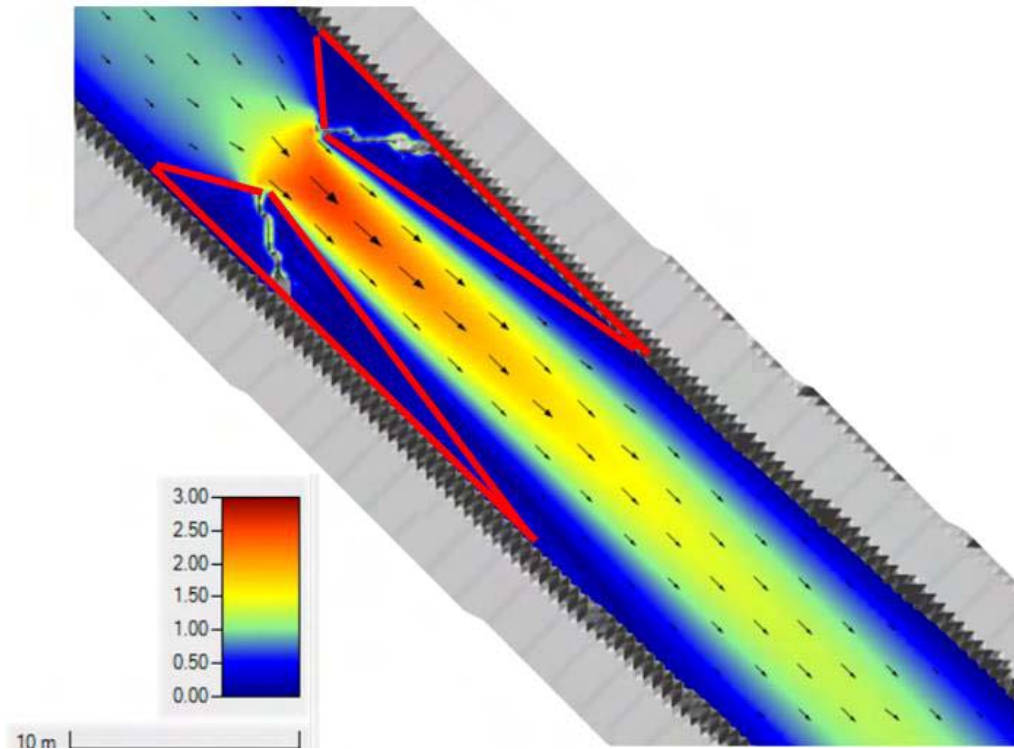


Figura 42. Zonas potenciales de sedimentación en las rampas centradoras simples (Remarcado en rojo). Mapa de velocidad (m/s) para  $Q_5$ . Fuente: Elaboración propia.

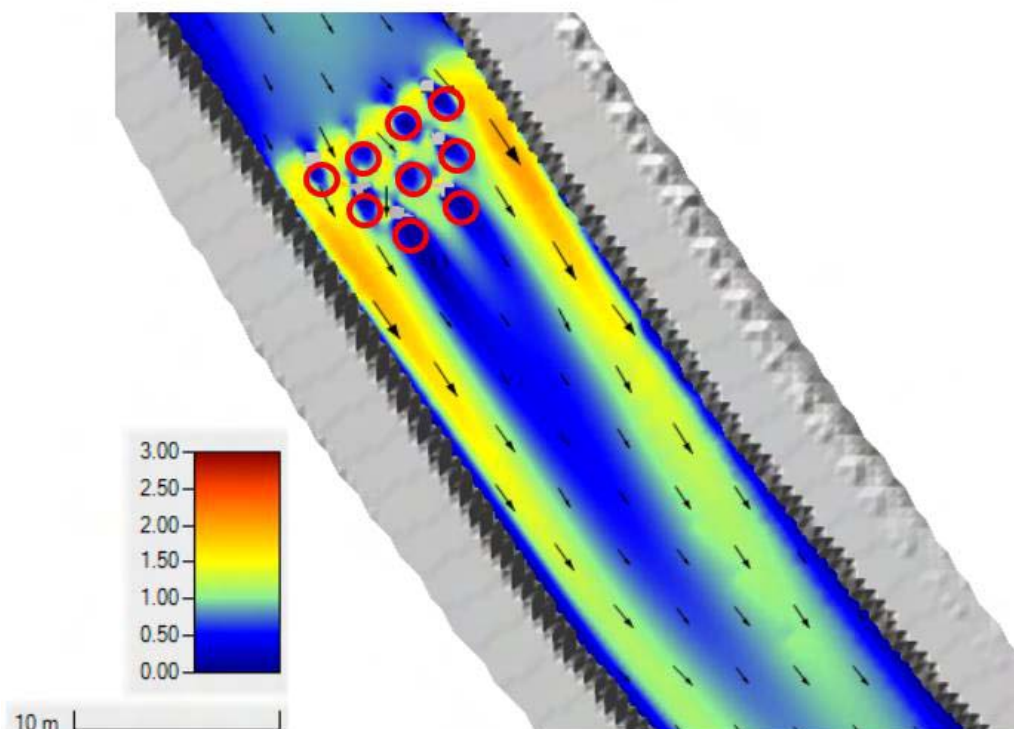


Figura 43. Zonas potenciales de sedimentación en las hileras de rocas (Remarcado en rojo). Mapa de velocidad (m/s) para  $Q_5$ . Fuente: Elaboración propia.

### 5.5.3. Síntesis de la situación post-operacional.

## SÍNTESIS DE LA FASE POST-OPERACIONAL - TRAMO CURVO

### OBJETIVOS

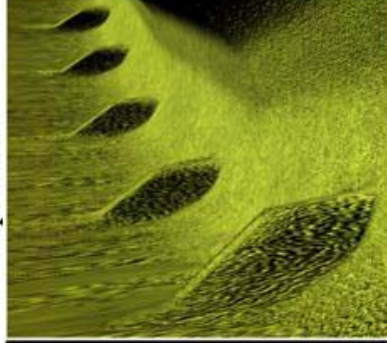
- Comparar las dos hipótesis propuestas para cada tramo y estudiar que opción es más beneficiosa.

### MODELO DE SIMULACIÓN

Hipótesis A1



Hipótesis A2



#### PARÁMETROS DEL MODELO

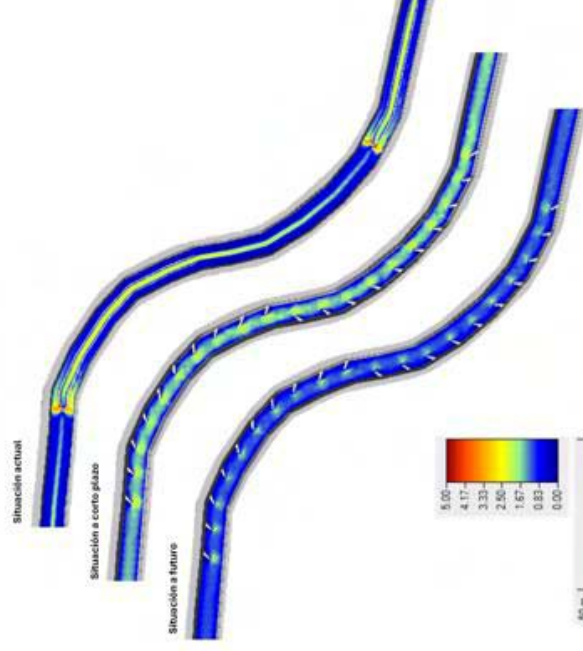
CONDICIONES DE CONTORNO		Valores Tabla 3
Condición de entrada	Hidrograma	
Condición de salida	Normal Depth	0.5
PLAN DE SIMULACIÓN		
Tiempo de simulación	24h(T10) 24h(T2) 12h(Q5) 6h(Q50)	
Intervalo computacional	1-5 segundos	
Intervalo de mapeado	1 o 10 minutos	
RUGOSIDAD		
A corto plazo - Arena	0.025	
A largo plazo - Vegetación	0.04	
<b>Nº total de modelizaciones (en detalle Anexo 6)</b>		<b>16</b>

### RESULTADOS

Desde el punto de vista de la diversificación morfofuncional, la **hipótesis A1** (deflectores a 45º) resulta más interesante. Cumple con los objetivos principales y secundarios:

- Proteger la base de los muros laterales de la canalización desviando el flujo.
- Mejorar la diversidad hidrodinámica del flujo.
- Crear una serie de habitats y formas de lecho (zonas de sedimentos, zonas de pozas, etc.)
- Generar cuñas de sedimentos de mayor potencia (las cuales irán paulatinamente siendo colonizadas por la vegetación de ribera)

Resultados de velocidad (m/s) para Q<sub>5</sub>



## SÍNTESIS DE LA FASE POST-OPERACIONAL - TRAMO RECTO

### OBJETIVOS

- Comparar las dos hipótesis propuestas para cada tramo y estudiar que opción es más beneficiosa.

### MODELO DE SIMULACIÓN

Hipótesis B1



Hipótesis B2



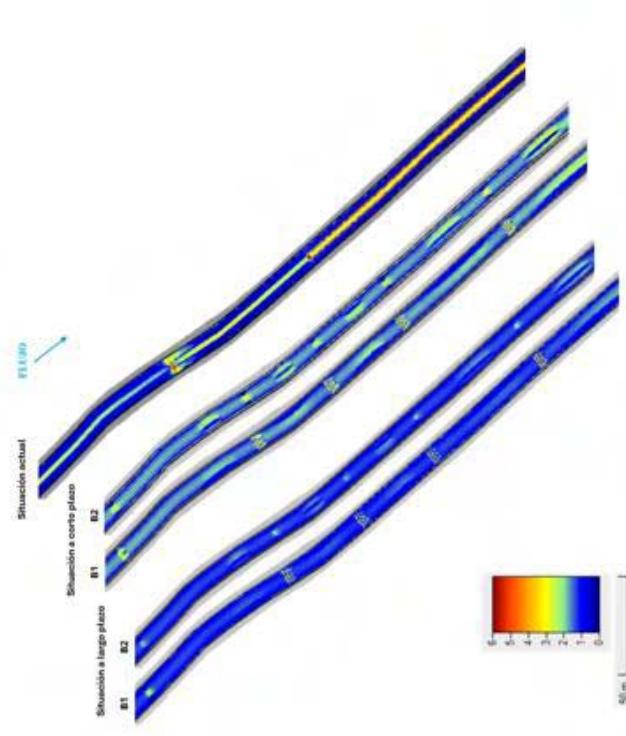
#### PARÁMETROS DEL MODELO

CONDICIONES DE CONITORNO		Valores Tabla 3	
Condición de entrada	Hydrograma	0.5	
Condición de salida	Normal Depth	0.5	
PLAN DE SIMULACIÓN			
Tiempo de simulación	24h(T10)	24h(T2)	12h(Q5)
Intervalo computacional	1-5 segundos		
Intervalo de mapeado	1 o 10 minutos		
RUGOSIDAD			
A corto plazo - Arena	0.025		
A largo plazo - Vegetación	0.04		
Nº total de modelizaciones (en detalle Anexo 6)			16

### RESULTADOS

Las dos hipótesis propuestas para el tramo recto presentan resultados interesantes. La hipótesis B1 aporta mayor naturalidad al fomentar la sinuosidad del tramo. Por el contrario, la hipótesis B2 aporta una mayor intensidad en los contrastes de la variable velocidad y una mayor autodepuración. Por consiguiente, se escogen **ambas propuestas** ya que consiguen romper la uniformidad de la situación actual del tramo encauzado. Cada hipótesis será aplicada en un tramo recto diferente dentro del tramo de estudio.

Resultados de velocidad (m/s) para Q<sub>2</sub>



## 6. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En este apartado se van a comparar las hipótesis escogidas en cada tramo con la situación actual (canal hormigonado) para analizar las mejoras y beneficios obtenidos.

### 6.1. Resultado y discusión en el tramo A (curvo)

A continuación se va a realizar una comparación entra la situación actual y lo que se espera obtener al aplicar la hipótesis A1 (figura 44). Los resultados presentados son para un caudal de  $Q_5$  debido a que se observan diferencias de forma más clara.

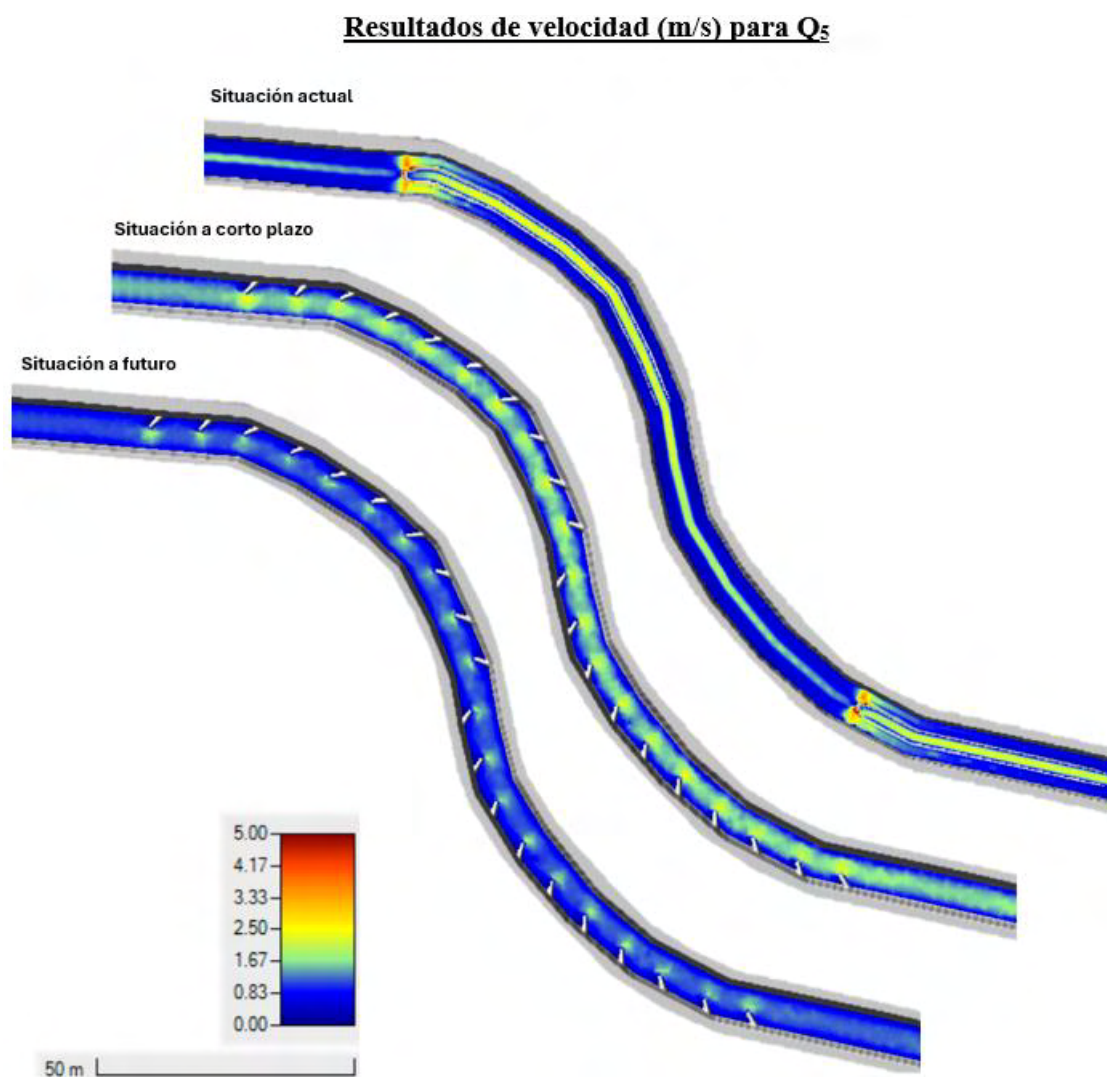


Figura 44. Representación de la velocidad (m/s) de la hipótesis A1 para un caudal  $Q_5$  en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia

El canal hormigonado presente en la **situación actual** consta de un cauce de aguas bajas interrumpido por barreras transversales continuas. En esta configuración, se observa un

flujo con velocidades máximas de 2.6m/s en el cauce de aguas bajas, las cuales disminuyen progresivamente hasta llegar a la siguiente barrera. Al alcanzar esta barrera, el flujo impacta y las velocidades aumentan de nuevo, repitiendo este patrón a lo largo del canal. Los sedimentos se acumulan exclusivamente en la parte aguas arriba de las barreras.

Tras la modificación del canal, que incluye la remoción de la solera para obtener un lecho con una funcionalidad y aspecto más natural (cóncavo), se implementan las técnicas de bioingeniería seleccionadas, específicamente deflectores con ángulo de 45°, los cuales han demostrado ser los más efectivos.

En la **situación a corto plazo** (lecho de arena), presenta un flujo centralizado con una diversidad de velocidades. Se registran valores de velocidad más elevados en las puntas de los deflectores (2.09m/s) y valores reducidos en las áreas intermedias entre los deflectores. Esta alternancia constante de velocidades mayores y menores a lo largo de toda la curva del río promueve la diversidad morfofuncional del flujo. Por otro lado, como se ha mencionado previamente, las puntas de los deflectores generan turbulencias que promueven la formación de pozas y la oxigenación del agua, mientras que en las zonas adyacentes a la orilla se originan áreas de sedimentación tanto aguas arriba como aguas abajo de los deflectores. Ambos fenómenos dan lugar a la formación de nuevos hábitats para la flora y fauna fluvial, por lo que se mejora la biodiversidad y la conectividad ecológica al integrar el ecosistema fluvial con el ecosistema de ribera.

A largo plazo, en la **situación futura** con la vegetación establecida, el patrón de flujo no varía significativamente, pero las velocidades del agua se reducen, con una velocidad máxima registrada de 1.54 m/s (25% menos respecto a la situación actual). Esta reducción en la velocidad favorece los fenómenos de sedimentación entre los deflectores, en lugar de su arrastre, lo que contribuye a la formación de nuevos hábitats y la mejora de la calidad del sustrato. El desarrollo de la vegetación no solo incrementa la biodiversidad y mejora la conectividad ecológica, sino que también cumple funciones adicionales. La vegetación establecida refuerza estructuralmente los deflectores, lo que resulta en el aumento de su durabilidad y eficacia a largo plazo. Además, la vegetación mejora de la calidad del agua a través de procesos de filtración, reduce la erosión del suelo, o en este

caso, protege la base del hormigón, proporciona sombra al cauce, etc. En conjunto, estas mejoras resultan en un ecosistema más resiliente y autosostenible.

### Resultados de calado (m) para $Q_5$

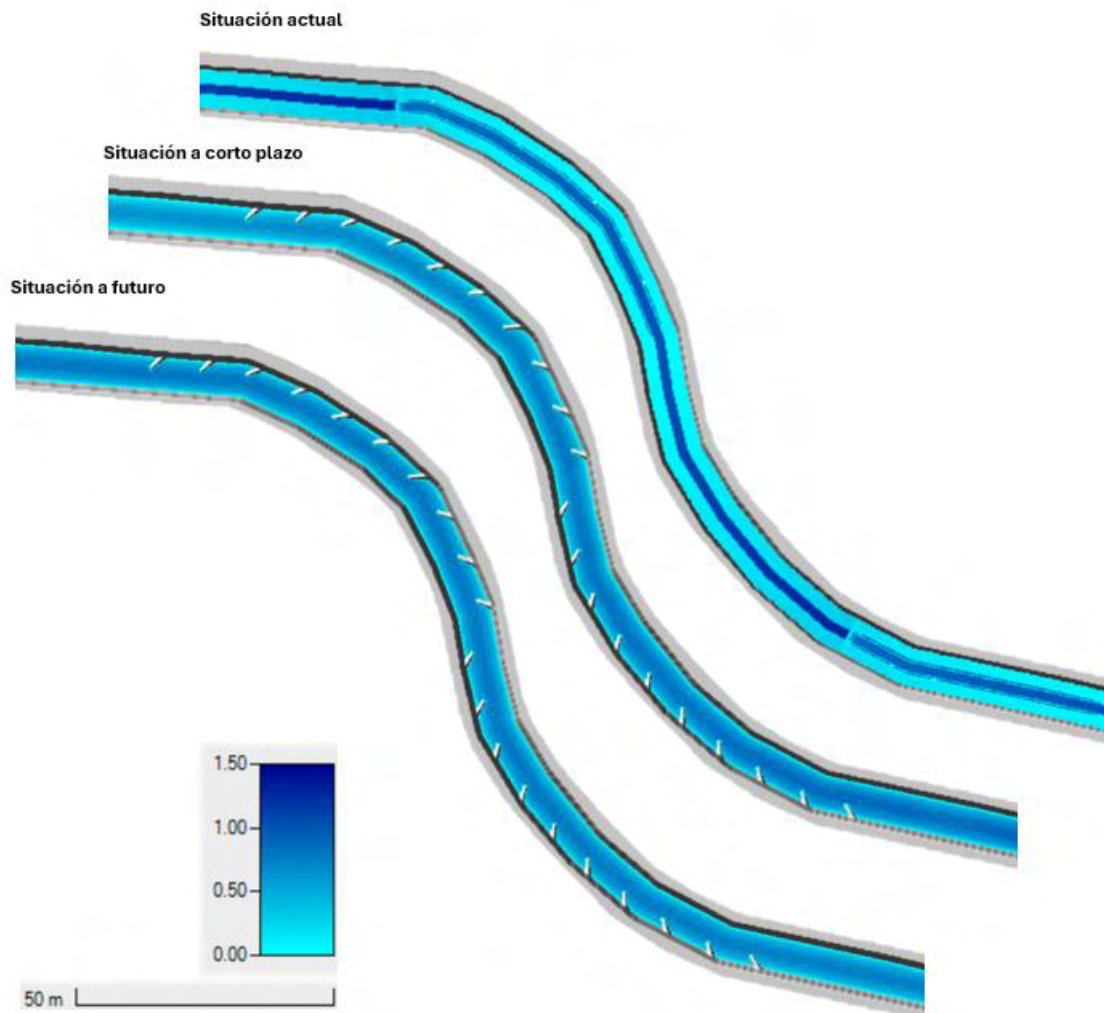


Figura 45. Representación del calado (m) de la hipótesis A1 para un caudal  $Q_5$  en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia

Es relevante analizar los resultados obtenidos para los calados. Aunque a primera vista puede parecer que la **situación actual** presenta una mayor diversidad en la variable de calado, esto no es correcto. La mayor parte del flujo se concentra en el canal de aguas bajas. Cuando el canal se llena y desborda, deja una fina lámina de agua de 0.1m o en su defecto de 0.2m al aproximarse a las barreras transversales. Este calado es insuficiente para sustentar vida piscícola y no representa las condiciones de un cauce natural.

A **corto plazo**, la distribución de los calados es más uniforme y se asemeja más a las condiciones de un río natural. El thalweg alcanza una profundidad de 0.8m, mientras que

las zonas cercanas a las orillas tienen una profundidad de 0.4m. Además, la acción erosiva de los deflectores generará pozas, lo que resultará en un aumento de la diversidad sobre la variable de calado.

En el **escenario futuro**, se ha observado previamente que el calado aumenta 0.37m para T2, lo que resulta positivo para la fauna acuática y además no representa un riesgo para la integridad de las estructuras.

Por tanto, con la aplicación de los deflectores de 45° se consigue cumplir tanto los objetivos principales como los secundarios:

- Proteger la base de los muros laterales de la canalización desviando el flujo.
- Mejorar la diversidad hidrodinámica del flujo.
- Crear una serie de hábitats y formas de lecho (zonas de sedimentos, zonas de pozas, etc.)
- Generar cuñas de sedimentos de mayor potencia (las cuales irán paulatinamente siendo colonizadas por la vegetación de ribera)

En resumen, la intervención y modificación del canal han permitido una redistribución más natural y funcional del flujo. Como resultado se obtiene una mejora sobre la diversidad hidromorfológica y la biodiversidad del ecosistema, sin comprometer la seguridad estructural.

## 6.2. Resultado y discusión en el tramo B (recto)

Las dos hipótesis propuestas resultan ser favorecedoras para el tramo recto. Por tanto en la siguiente figura 46 se ven representadas ambas hipótesis en una situación a corto y largo plazo y la situación del cauce actual (cauce hormigonado con canal de aguas bajas).

### Resultados de velocidad (m/s) para $Q_5$

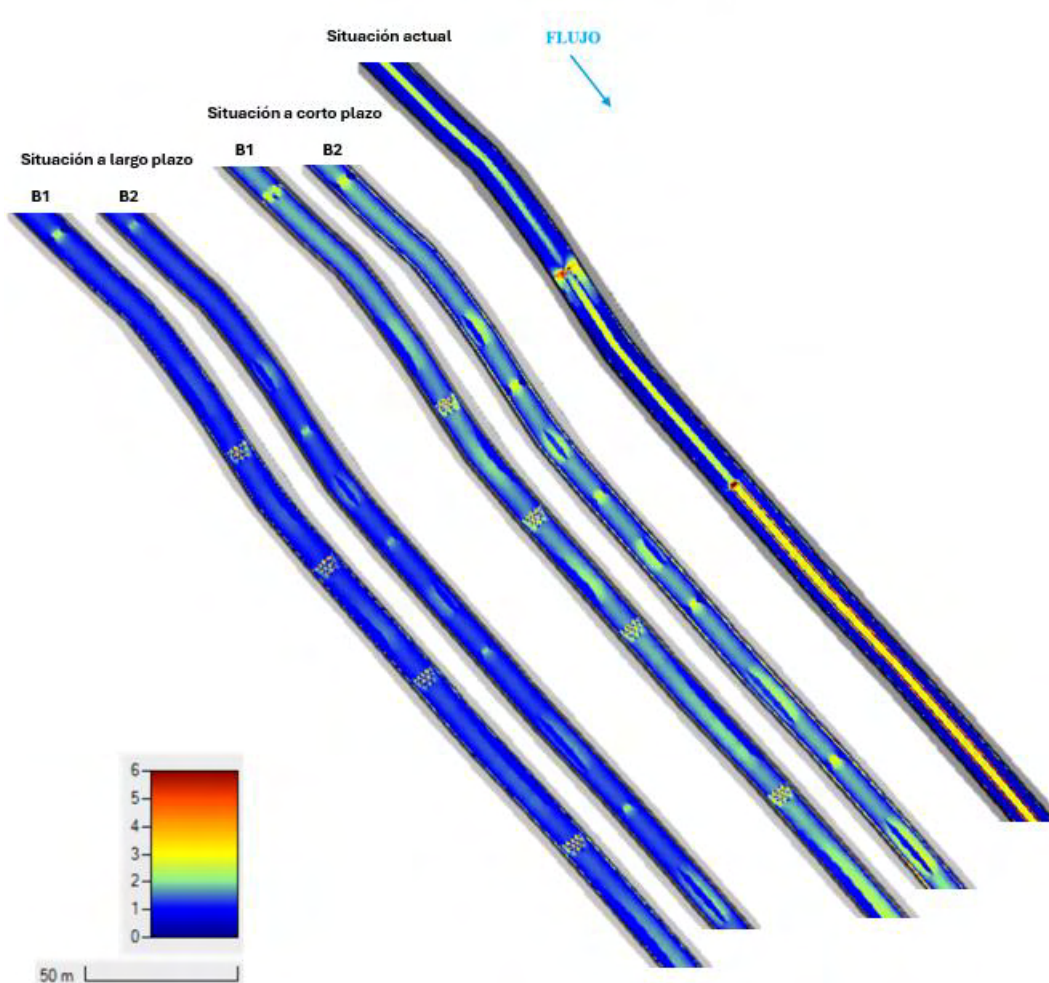


Figura 46. Representación de la velocidad (m/s) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal  $Q_5$  en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia

La **situación actual** del tramo recto es idéntica a la explicada en el apartado anterior (6.1). La única diferencia es que las velocidades máximas alcanzadas en el canal de aguas bajas son de 3.5m/s. Este valor máximo se alcanza a partir de la barrera situada a la altura de la estación de aforos dada su geometría (barrera más pequeña que las otras y que solo ocupa el cauce de aguas bajas).

En la **situación a corto plazo** (lecho de arena), ambas hipótesis indican un cambio significativo en comparación con la situación actual. La primera observación es que las velocidades máximas disminuyen (hasta un 40%) y se distribuyen de manera más heterogénea a lo largo del tramo. Se evidencia una alternancia clara de velocidades, con las más altas localizadas en las estructuras y las más bajas en las zonas intermedias. En la hipótesis B1, las velocidades muestran un mayor contraste entre los valores máximos

(4m/s) y mínimos (1.6 m/s), mientras que en la hipótesis B2 se observa una mayor variabilidad en este parámetro, lo que puede resultar más interesante. La alternancia se presenta tanto en la zona entre estructuras como alrededor de las mismas. Por ejemplo, las islas fluviales crean dos corrientes de agua que dependiendo de su proximidad a la orilla tienen una mayor o menor velocidad (figura 47). Estos contrastes y alternancias de velocidades presentes en ambas hipótesis favorecen la oxigenación del agua y por tanto, también su autodepuración. Sin embargo, la hipótesis B2 tiene una capacidad de autodepuración mejor distribuida a lo largo del tramo, mientras que la hipótesis B1 lo presenta de forma puntual en las hileras de rocas.

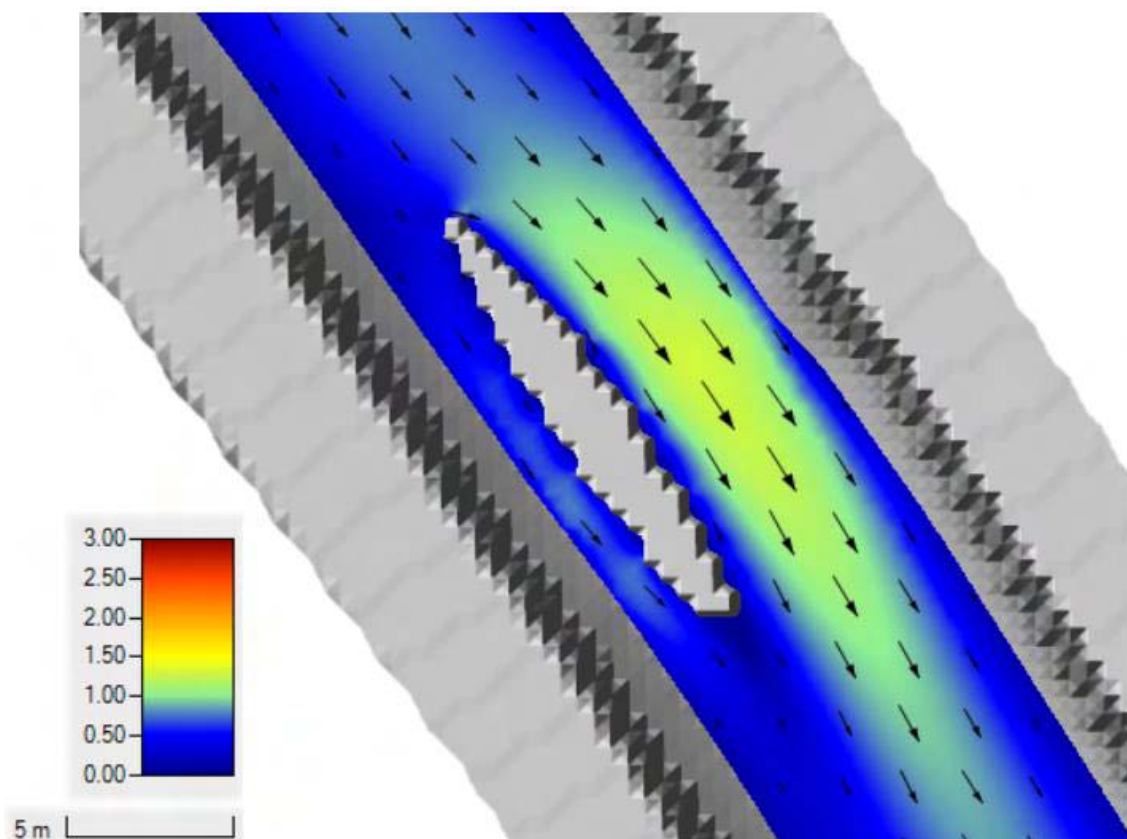


Figura 47. Ejemplo de diversificación hidrodinámica y morfofuncional desencadenado por la isla fluvial. Se representa sobre un mapa de velocidad (m/s) junto con los vectores de velocidad para caudales  $< Q_s </math>. Fuente: Elaboración propia.$

Respecto a la morfología del cauce, la hipótesis B1 presenta una mayor sinuosidad. Esta característica atribuible a las barreras laterales confiere al cauce un aspecto más natural. La hipótesis B2 también muestra alteraciones morfológicas, aunque menos plausibles que en la hipótesis B1. En esta hipótesis, las islas fluviales fragmentan el flujo, que luego es redirigido y centralizado en un único cauce mediante rampas centradoras.

A **largo plazo**, en el escenario proyectado con la vegetación completamente establecida,

se observa una reducción significativa de las velocidades del flujo en un 40%. Esta disminución de la velocidad resulta beneficiosa en situaciones de avenidas, ya que contribuye a mitigar los efectos erosivos y a mejorar la gestión del riesgo asociado a eventos de caudal elevado. En relación a la diversidad hidromorfológica, en el caso del  $Q_5$ , el patrón de flujo a corto y a largo plazo se mantiene similar. Por último, se espera que la vegetación colonice de manera efectiva las barreras laterales, las islas fluviales y parcialmente las rampas centradoras. Este proceso de colonización vegetal es fundamental para la formación de un corredor ecológico, que provea de conectividad tanto longitudinal como transversal para las especies de fauna. Al igual que en las hipótesis del tramo curvo, la colonización por parte de la vegetación mejorará la estabilidad de las estructuras.

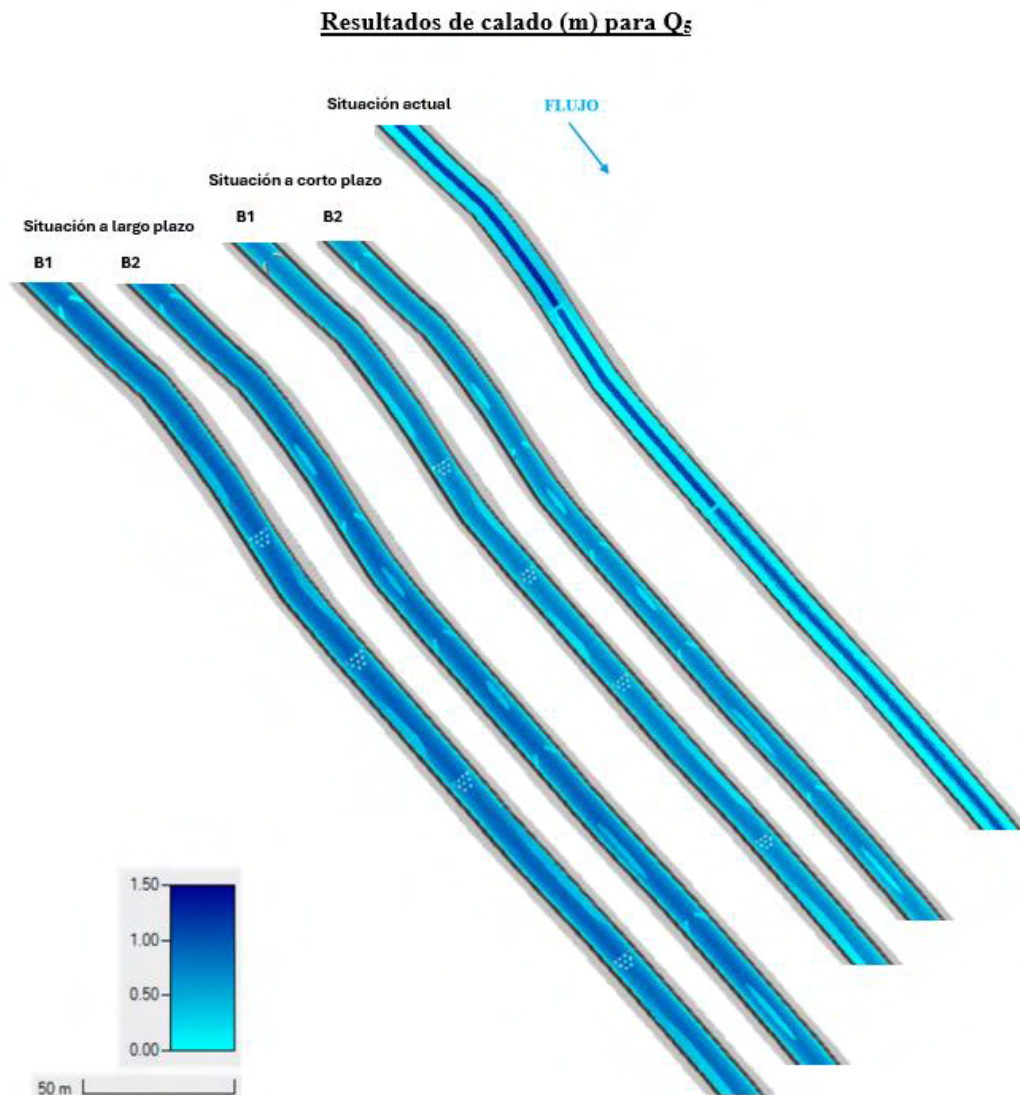


Figura 48. Representación del calado (m) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal  $Q_5$  en la situación a corto y largo plazo para su comparación con la situación actual Fuente: Elaboración propia

En relación con la diversificación del calado, se observa un fenómeno similar al del tramo curvo (zona A). En la **situación actual**, el flujo se concentra en el canal de aguas bajas, y queda una lámina de agua delgada en el resto del cauce. Tras la modificación del lecho y la incorporación de las técnicas de diversificación, se evidencia una mejor distribución del calado, que permite la colonización por diversas especies de fauna acuática, especialmente en condiciones correspondientes a un cuantil de  $Q_5$ .

Sin embargo, el río Guadarrama se caracteriza por caudales relativamente bajos, ( $Q_{50}$  de  $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$ ), que se corresponden con un calado máximo de  $0.22\text{m}$  en la **situación a corto plazo** y  $0.30\text{m}$  **a largo plazo**, lo cual limita el tamaño potencial de la fauna acuática (figura 49). Con esta distribución de calados se garantiza una continuidad longitudinal del cauce y una disponibilidad de múltiples hábitats. Además para el caudal del cuantil  $Q_{50}$ , las estructuras hidráulicas no quedan sumergidas, lo que permite la colonización de vegetación ribereña. Durante eventos de avenida, esta vegetación contribuye a ralentizar el flujo, facilitando los procesos de sedimentación. Si los eventos de avenida son recurrentes, la vegetación aún no madura, será arrastrada y se reiniciará el ciclo natural del ecosistema fluvial.

### Resultados de calado (m) para $Q_{50}$

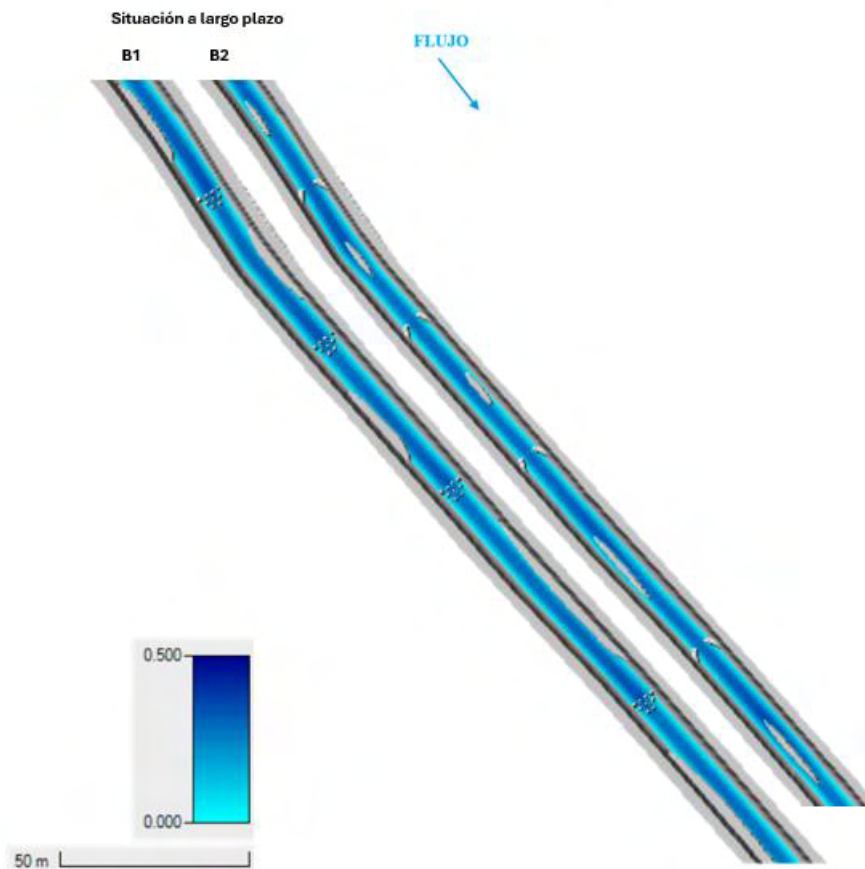


Figura 49. Representación del calado (m) de la hipótesis B1 y B2 para un caudal  $Q_{50}$  en la situación a largo plazo. Fuente: Elaboración propia.

Después del análisis realizado y tras considerar los beneficios de ambas hipótesis, se concluye que la opción óptima es diversificar las técnicas seleccionadas. Esta decisión se fundamenta en las condiciones y necesidades específicas del sistema fluvial. Dado que existen dos tramos rectos dentro del área de estudio, se implementará una hipótesis diferente en cada uno: el primer tramo recto canalizado antes de la curva (previo a la confluencia) y el tramo recto analizado después de la confluencia. (figura 50) La hipótesis B2, que presenta una mayor variabilidad en el régimen de velocidades y una mayor capacidad de autodepuración, se considera adecuada para el tramo situado después de la confluencia. Esta selección se justifica por el hecho de que la confluencia recibe aguas del arroyo de la Poveda, cuya calidad es deficiente debido a la mezcla de aguas pluviales y residuales (P. Caracterización, 2024). Por consiguiente, la hipótesis B1 se implementará en el primer tramo canalizado. La sinuosidad proporcionada por esta hipótesis mejorará el grado de naturalidad del tramo, un efecto que se ve potenciado por su proximidad al final del cauce natural (aumentará el porcentaje de sinuosidad continua, entre otros).

A continuación se presenta un mapa que recoge las hipótesis propuestas para cada tramo:

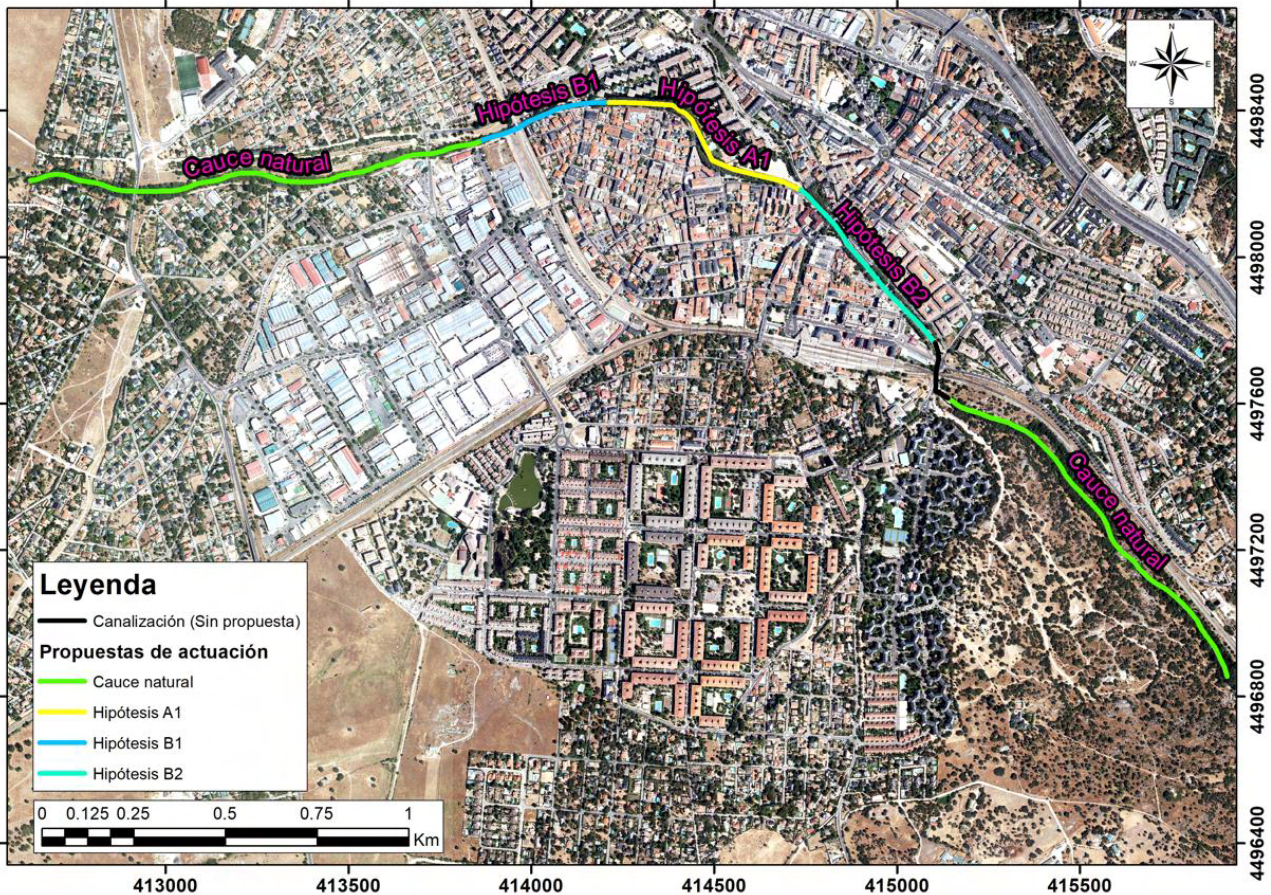


Figura 50. Localización de las hipótesis propuestas para cada tramo. Fuente: Elaboración propia.

En el mapa anterior, se puede observar un subtramo canalizado en el cual no se proponen intervenciones (representado en negro). Esta decisión se debe a que dicho subtramo atraviesa una curva ubicada debajo de una glorieta de reducida altura (ilustración 16). La implementación de intervenciones en esta área no solo resultaría funcionalmente ineficaz, sino que también podría incrementar el riesgo de desbordamiento o taponamiento debido a la acumulación de sedimentos durante eventos de avenida. En este tramo se podría plantear la recuperación del lecho fluvial (eliminación de la solera de hormigón armado del encauzamiento).



Ilustración 16. Tramo canalizado que transcurre por debajo de una glorieta. Fuente: Fotografías propias.

## 7. MONITOREO Y SEGUIMIENTO

En el ámbito de este proyecto las **técnicas que se proponen para la monitorización** de las técnicas de bioingeniería implementadas se describen en el anexo 9.

A continuación, se presentan los **parámetros a medir** mediante las diferentes técnicas de monitoreo propuestas:

- **Geomorfología:** Estudiar cambios en la morfología del lecho y de las orillas del río causados por las estructuras, mediante la comparación de imágenes.

### **Indicadores de éxito:**

- Aumento del índice de sinuosidad
- Aumento del número de ramales
- Aumento de la sedimentación en las orillas
- Establecimiento de la vegetación y especies acuáticas como resultado de la aparición de nuevos hábitats

- **Hidráulica:** Medir y analizar la velocidad, calado y dirección del flujo de agua en las proximidades las estructuras para los diferentes caudales. Se pueden comparar con las modelizaciones previamente realizadas.

### **Indicadores de éxito:**

- Reducción de la erosión de las orillas

- Formación de pozas y remansos
  - Creación de nuevos hábitats
  - Mejora de la calidad del agua
  - Aumento del número de ramales
- **Sedimentación:** Observar y cuantificar la acumulación o pérdida de sedimentos aguas arriba y aguas debajo de las estructuras.

**Indicadores de éxito:**

- Aumento en la cuña de sedimentación aguas arriba y aguas abajo de las estructuras
  - Solape de islas fluviales con las orillas
  - Diversidad en el tamaño de los sedimentos
  - Incremento de la cota del lecho
  - Incremento en la estabilidad de las márgenes, o, reducción de la erosión.
- **Biología:** Evaluar el impacto en la flora y fauna acuática y ribereña. Cuantificar el número de especies y observar su distribución.

**Indicadores de éxito:**

- Aumento de la diversidad acuática y ribereña
- Incremento en las poblaciones de las especies
- Aumento en la reproducción de especies
- Aparición de macroinvertebrados
- Aumento de zonas de refugio o alimentación
- Recuperar especies nativas
- Mejora del porcentaje de conectividad longitudinal y transversal del cauce y las riberas.

Para el análisis de la evolución hidromorfológica de los tramos se propone utilizar el “Protocolo de caracterización hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos. Código: m-r-hmf-2019”

**Los plazos para el monitoreo son los siguientes:**

- Los vuelos con drones se recomienda realizarlos una vez antes de incorporar las técnicas, otra después de la incorporación de las técnicas y posteriormente una vez al año o posterior a la sucesión de algún evento extraordinario.
- Las cámaras colocadas en puntos estratégicos pueden grabar de forma constante y realizar grabaciones en eventos extraordinarios.
- Las mediciones manuales resultan de especial interés por que son las que aseguran de forma efectiva la durabilidad de las técnicas de bioingeniería. Se recomienda una revisión al terminar los trabajos, y posteriormente revisar una vez al mes durante el primer año, hasta asegurar su estabilidad. Después las mediciones se pueden realizar una vez al año. Para medir otros parámetros de interés no es necesario acudir cada mes. Para apreciar cambios se propone tomar datos cada seis meses.

Para garantizar un monitoreo hidrológico efectivo y de alta calidad, se recomienda implementar un período mínimo de observación de diez años. Este enfoque permite capturar adecuadamente las complejas dinámicas de los sistemas fluviales. En el estudio de Manfreda, S. et al. (2024), se identifican tres desafíos principales en el monitoreo hidrológico: la escasez de datos, la variabilidad espacial y temporal, y la creciente demanda de información detallada sobre los recursos hídricos. La dinámica constante de los ríos, junto con el seguimiento a corto plazo y la deficiencia en la recopilación de datos, contribuyen significativamente a la escasez de información necesaria para una gestión efectiva (dos Reis Oliveira et al., 2020). Para abordar estos desafíos, es crucial establecer protocolos de seguimiento estandarizados que permitan la comparabilidad de datos a lo largo del tiempo y entre diferentes regiones. La colaboración interdisciplinaria y la integración de nuevas tecnologías pueden mejorar significativamente la capacidad de monitoreo. Implementar un enfoque integral y de largo plazo no solo mejorará la calidad y cantidad de datos disponibles, sino que también contribuirá al desarrollo de estrategias de gestión más robustas y adaptativas para la restauración de ríos.

## 8. CONCLUSIONES

- La modificación del lecho del canal ha seguido un **proceso de naturalización** esencial para la recuperación del río Guadarrama. La transformación de un cauce rectangular con canal de aguas bajas a una forma cóncava ha sentado las bases para aplicar técnicas de bioingeniería y lograr la diversificación funcional de los sistemas fluviales. Esta intervención complementa las acciones propuestas en el Anteproyecto y es fundamental para la rehabilitación integral del río.
- Se ha desarrollado una metodología estructurada en fases que ha permitido optimizar tanto la selección de técnicas como la propuesta de actuaciones que maximizan el incremento de la diversificación funcional de los tramos analizados.
- La intervención y modificación del canal han permitido una **redistribución más natural y funcional de los calados**, lo que ha permitido mejorar tanto la diversidad morfológica como la capacidad de soportar vida acuática, sin comprometer la seguridad estructural de los muros cajeros no sujetos a trabajos de demolición.
- Tras la implementación de las técnicas de bioingeniería, **las velocidades del flujo máximas** se han reducido en un 25% (tramo curvo) y en un 40% (tramo recto) respecto a la situación inicial.
- Con la incorporación de las estructuras se ha formado un amplio abanico de calados, velocidades y patrones de flujo. Por tanto, se concluye, que la **diversidad hidrodinámica y morfofuncional** mejoran de manera significativa. Mediante este proceso se mejora la calidad del hábitat acuático.
- A **corto plazo**, se espera que las estructuras implementadas resistan eventos adversos, y que inicien la diversificación morfofuncional del río mediante el transporte de sedimentos. Este transporte dará lugar a la creación de nuevos hábitats, que podrán ser colonizados por diversas especies vegetales y animales, promoviendo un ecosistema dinámico y en constante evolución.
- A **largo plazo**, la intervención aportará beneficios ecológicos significativos, en

los que se incluye un incremento en la biodiversidad y una mejora en la conectividad ecológica. La vegetación establecida no solo refuerza estructuralmente los deflectores, sino que también contribuye a la formación de nuevos hábitats, mejora la calidad del agua y del sustrato mediante procesos de filtración, y facilita los procesos de sedimentación, entre otros beneficios. Estos beneficios crean un entorno fluvial más resiliente y autosostenible, favoreciendo la salud general del ecosistema.

- En la **zona A (tramo curvo)** ambas hipótesis son válidas, pero la hipótesis A1 (deflectores de 45°) muestra una mejora significativa respecto a la situación inicial. Mejora la diversidad hidrodinámica, protege los muros laterales, fomenta la aparición de nuevos hábitats y tiene mayor capacidad de retención de sedimentos.
- En la **zona B (tramo recto)** ambas hipótesis presentan resultados beneficiosos. La hipótesis B1 muestra una sinuosidad más elevada lo que otorga mayor naturalidad al cauce. La hipótesis B2 presenta una mayor variabilidad en el régimen de velocidades y una mayor capacidad de autodepuración. Para mejorar la diversidad del tramo se propone utilizar las dos hipótesis (cada una en un tramo recto diferente).
- Todas las técnicas de bioingeniería han sido **adecuadamente dimensionadas** mediante la aplicación de la metodología basada en el cálculo de variables máximas limitantes, específicamente calados y velocidades, tanto en escenarios de corto como de largo plazo, garantizando así un enfoque conservador en términos de seguridad.
- La **monitorización y seguimiento** de las estructuras implementadas debe ser de obligado cumplimiento para garantizar la correcta evolución de su integridad y funcionalidad. El monitorización a largo plazo permitirá recopilar datos de gran valor para el desarrollo de estrategias de gestión más robustas y adaptativas para la restauración de ríos.

En resumen, la intervención en el canal urbano mediante las técnicas de bioingeniería ha logrado cumplir con los objetivos principales y secundarios propuestos. Se mejora la biodiversidad hidrodinámica y morfofuncional del ecosistema fluvial y que influye mejorando la biodiversidad. Todo ello se consigue sin comprometer la seguridad estructural de las técnicas aplicadas. Esta intervención sirve como un ejemplo de cómo las técnicas de bioingeniería pueden ser efectivas en la recuperación de ecosistemas acuáticos urbanos degradados.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Chesapeake Bay Trust. (n.d.). Final Project Report: Grant 13970. [https://cbtrust.org/wp-content/uploads/Grant\\_13970-Final\\_Project\\_Report.pdf](https://cbtrust.org/wp-content/uploads/Grant_13970-Final_Project_Report.pdf)

Dos Reis Oliveira, P. C., van der Geest, H. G., Kraak, M. H. S., Westveer, J. J., Verdonschot, R. C. M., & Verdonschot, P. F. M. (2020). *Over forty years of lowland stream restoration: Lessons learned?* *Journal of Environmental Management*, 264\*, 110417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110417>

Fernández Yuste, J. A., Martínez Santa-María, C., & Carrero Díez, L. (2023). *Manual de diseño y cálculo de rampas con flujo ascendente*. Confederación Hidrográfica del Duero. <https://www.chduero.es/documents/20126/427605/ManualDisenoCalculoRampas.pdf>

Forest, M. (2020, June 15). *HEC-RAS subgrid bathymetry theory and application*. Kleinschmidt Group. <https://www.kleinschmidtgrou.com/ras-post/hec-ras-subgrid-bathymetry-theory-and-application/>

Hickman, E. L., & Thompson, T. M. (n.d.). *Stream Restoration Series: Cross Vane* (Fact Sheet Number 1). Virginia Tech. <https://cbtrust.org/wp-content/uploads/Cross-Vane-Fact-Sheet.pdf>

Hickman, E. L., & Thompson, T. M. (n.d.). *Stream Restoration Series: J-Hook Vane* (Fact Sheet number 3). Virginia Tech. <https://cbtrust.org/wp-content/uploads/J-Hook-Vane-Fact-Sheet.pdf>

Iowa Department of Natural Resources. (2018, April). *River Restoration Toolbox Practice Guide* 7. [https://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/RiverRestoration/toolbox/stream-bank-toe-protection/Practice%207\\_Streambank\\_Toe\\_Potection\\_Full\\_Chapter.pdf](https://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/RiverRestoration/toolbox/stream-bank-toe-protection/Practice%207_Streambank_Toe_Potection_Full_Chapter.pdf)

Jamieson, E., et al. (2009). *River Management* (Vol. 26). WIT Press. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/RM09/RM09026FU1.pdf>

Li, P., Li, D., Sun, X., Chu, Z., Xia, T., & Zheng, B. (2022). *Application of ecological restoration technologies for the improvement of biodiversity and ecosystem in the river*. *Water*, 14(9), 1402. <https://doi.org/10.3390/w14091402>

Manfreda, S., et al. (2024) *Advancing river monitoring using image-based techniques: challenges and opportunities*. *Hydrological Sciences Journal*, 69:6, 657-677, DOI: 10.1080/02626667.2024.2333846

Martí, E., & Sabater, F. (2009). *La capacidad de gestión de nutrientes de los ríos y arroyos es especialmente importante en el caso de sistemas que reciben aguas de estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR)*. *Revista de Gestión Ambiental*, 15(2), 123-134.

McCullah, J. (n.d.). *Bendway Weirs*. State.va.us. [http://www.extranet.vdot.state.va.us/locdes/hydraulic\\_design/nchrp\\_rpt544/content/htm](http://www.extranet.vdot.state.va.us/locdes/hydraulic_design/nchrp_rpt544/content/htm)

[l/Bendway\\_Weirs/Bendway\\_Weirs.html](#)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2019). *Protocolo de Caracterización de HMF*. Gobierno de España. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/protocolo-caracterizacion-hmf-abril-2019\\_tcm30-496596.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/protocolo-caracterizacion-hmf-abril-2019_tcm30-496596.pdf)

Nakamura, K. (2008). *River restoration efforts in Japan: Overview and perspective*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/253859779\\_River\\_restoration\\_efforts\\_in\\_Japan\\_overview\\_and\\_perspective](https://www.researchgate.net/publication/253859779_River_restoration_efforts_in_Japan_overview_and_perspective)

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2014). *Design methods for in-stream flow control structures*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22237>

Natural Resources Conservation Service. (2013). *Design of Stream Barbs*. <https://docslib.org/doc/2290891/design-of-stream-barbs>

Natural Resources Conservation Service. (2007). *National Engineering Handbook Part 654: Technical Supplement 14H - Flow Changing Techniques*. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC.

Ritcher, B., et al. (2017). *Upper Arkansas River Habitat Restoration Project: 2013-2015 Monitoring Report*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Typical-rock-vane-structure-used-during-habitat-restoration-on-the-Upper-Arkansas-River\\_fig7\\_344105411](https://www.researchgate.net/figure/Typical-rock-vane-structure-used-during-habitat-restoration-on-the-Upper-Arkansas-River_fig7_344105411)

Schall, J. D., Mussetter, R. A., Watson, C. C., & Biedenbarn, D. S. (2006). *The Cross Vane, W-Weir and J-Hook Structures*. [https://scwa2.com/wp-content/uploads/2020/06/The\\_Cross\\_Vane\\_W-Weir\\_and\\_J-Hook\\_Structures\\_Paper\\_Updated\\_2006.pdf](https://scwa2.com/wp-content/uploads/2020/06/The_Cross_Vane_W-Weir_and_J-Hook_Structures_Paper_Updated_2006.pdf)

Schilling, D., & Bizjak, K. F. (2009). *Design of Stream Barbs*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 124, 301-310. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/RM09/RM09026FU1.pdf>

Soil & Environmental Consultants, PA. (n.d.). *Cross-Vane Structure*. <https://sandec.com/services/restoration/attachment/cross-vane-structure/>

Radspinner, R., Diplas, P., Lightbody, A., & Sotiropoulos, F. (2010). *River training and ecological enhancement potential using in-stream structures*. Journal of Hydraulic Engineering, 136(12), 967-980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000260)

International Flood Management. (n.d.). *Environmental Aspects of Integrated Flood Management*. [https://www.floodmanagement.info/publications/policy/ifm\\_env\\_aspects/Environmental\\_Aspects\\_of\\_IFM\\_Sp.pdf](https://www.floodmanagement.info/publications/policy/ifm_env_aspects/Environmental_Aspects_of_IFM_Sp.pdf)

Iowa Department of Natural Resources. (Abril, 2018). *River Restoration Toolbox Practice Guide 7: Streambank Toe Protection*. Full Chapter. [https://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/RiverRestoration/toolbox/stream-bank-toe-protection/Practice%207\\_Streambank\\_Toe\\_Protection\\_Full\\_Chapter.pdf](https://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/RiverRestoration/toolbox/stream-bank-toe-protection/Practice%207_Streambank_Toe_Protection_Full_Chapter.pdf)

---

# ANEXOS

---



## ÍNDICE

ANEXO 1. DIVERDISAD HIDRODINÁMICA.....	5
ANEXO 2. DOCUMENTACIÓN CARTOGRÁFICA.....	9
1. Cuenca hidrográfica.....	10
2. Usos del suelo.....	10
3. Mapa litológico.....	11
4. Zonas protegidas.....	11
5. Ficha técnica de la estación de aforo .....	12
6. Localización de la estación de aforo.....	14
ANEXO 3. SITUACIÓN ACTUAL.....	15
1. Preparación del MDT.....	16
2. Definir la malla.....	27
3. Condiciones de contorno.....	29
ANEXO 4. SITUACIÓN PRE-OPERACIONAL.....	31
1. Preparación del MDT.....	32
2. Estudios de prueba y error en la disposición de los deflectores.....	33
ANEXO 5. SITUACIÓN POST-OPERACIONAL.....	34
1. Preparación del modelo para las hipótesis A1 y A2.....	35
2. Preparación del modelo para las hipótesis B1 y B2.....	38
ANEXO 6. MODELIZACIONES.....	41
1. Tabla resumen de modelizaciones.....	42
2. Teoría de las Ecuaciones SWE-ELM para Aguas Poco Profundas.....	42
ANEXO 7. RESULTADOS DE LAS MODELIZACIONES EN EL TRAMO A.....	44
ANEXO 8. RESULTADOS DE LAS MODELIZACIONES EN EL TRAMO B.....	48
ANEXO 9. MONITOREO Y SEGUIMIENTO.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura. 1. Cuenca hidrográfica y tramo de estudio sobre Ortofoto PNOA. Fuente: Bing Hybrid en Arcgis.</i>	10
<i>Figura. 2. Mapa de usos de suelo generales de la cuenca hidrográfica de estudio. Fuente: Elaboración propia basado en información del CORINE</i>	10
<i>Figura. 3. Mapa litológico de la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia basado en información del IGN.</i>	11
<i>Figura. 4. Zona protegida Cuenca del río Guadarrama – Red Natura 2000. Fuente: Geoportal</i>	11
<i>Figura. 5. Ficha técnica de la estación de aforo 3100 – Villalba 1/2. Fuente: CEDEX.</i>	12
<i>Figura. 6. Ficha técnica de la estación de aforo 3100 – Villalba 2/2. Fuente: CEDEX.</i>	13
<i>Figura. 7. Estación de aforo 3100 - Villalba. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS.</i>	14
<i>Figura. 8. Modelo digital de superficies de 2m de la zona de estudio (MDS02). Fuente: CNIG</i>	16
<i>Figura. 9. Detalle del MDS02 sobre la zona de estudio. Fuente: CNIG</i>	17
<i>Figura. 10. Distinción de zonas naturales (recuadro negro) y zonas canalizadas (recuadro rojo) dentro de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.</i>	18
<i>Figura. 11. Representación del paso 1. Relleno del canal a cota de coronación. El círculo presenta el detalle de la eliminación de estructuras transversales que afectan a la continuidad del cauce. Fuente: Elaboración propia.</i>	19
<i>Figura. 12. Sección transversal representativa del río Guadarrama de la zona canalizada en hormigón. Fuente: Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.</i>	20
<i>Figura. 13. Sección transversal representativa del arroyo de la Poveda de la zona canalizada en hormigón. Fuente: Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.</i>	20
<i>Figura. 14. Modificación de la sección transversal del río Guadarrama, para representar el tramo canalizado en hormigón. Fuente: Elaboración propia.</i>	21
<i>Figura. 15. Modificación de la sección transversal del arroyo de la Poveda, para representar el tramo canalizado en hormigón. Fuente: Elaboración propia.</i>	21
<i>Figura. 16. Sección transversal en la confluencia de ambos ríos. Fuente: Elaboración propia.</i>	22
<i>Figura. 17. Resultado final del paso 2: Construcción del canal y ubicación de las secciones transversales. Fuente: Elaboración propia.</i>	23
<i>Figura. 18. Modificación mediante secciones transversales (modelo 1D) en la zona de transición del tramo natural al tramo canalizado en el río Guadarrama. Fuente: Elaboración propia.</i>	23
<i>Figura. 19. Arriba se representa la sección transversal tipo y abajo se representan las modificaciones realizadas a las secciones transversales para asimilarse a la sección transversal tipo. Fuente: Elaboración propia.</i>	24
<i>Figura. 20. Perfil longitudinal donde se observa la diferencia de cota entre el terreno relleno y el terreno modificado en la zona de transición entre lo natural y lo artificial. Fuente: Elaboración propia.</i>	24
<i>Figura. 21. Vista en 3D del resultado final de la modificación del canal con una resolución de 0.1 a la izquierda y 0.5 a la derecha. Fuente: Elaboración propia.</i>	25
<i>Figura. 22. Secciones transversales en las zonas donde se localizan las barreras. A la izquierda se muestra el ejemplo tipo de las 6 barreras y a la derecha se muestra la barrera de la estación de aforo. Fuente: Elaboración propia.</i>	26
<i>Figura. 23. Resultado final del MDT con la inclusión de las barreras. Fuente: Elaboración propia.</i>	26
<i>Figura. 24. Vista 3D de las barreras transversales dentro del MDT. Fuente: Elaboración propia.</i>	27
<i>Figura. 25. Detalle de la malla tras elaborar las líneas de refinamiento correspondientes. Fuente: Elaboración propia.</i>	28
<i>Figura. 26. Ejemplo de barrera transversal sin línea de refinamiento (izquierda) y con línea de refinamiento (derecha). Fuente: Elaboración propia.</i>	28
<i>Figura. 27. Detalle de la malla desde una vista más general, donde se aprecia un tamaño de malla de menor resolución en las zonas externas del cauce y mayor resolución en las partes internas al mismo. Fuente: Elaboración propia.</i>	29

Figura. 28. Ejemplo de hidrograma para el periodo de retorno de 2 años en HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia. .... 30

Figura. 29. Sección transversal modificada para obtener un cauce que represente la realidad. La línea gris clarita representa el cauce de hormigón, mientras que la línea con puntos negros representa el cauce natural. Fuente: Elaboración propia. .... 32

Figura. 30. Estudio del efecto de los deflectores en función de la separación entre estructuras. De arriba a abajo separación de: 20m, 15m y 10m ..... 33

Figura. 31. Líneas de apoyo para la definición de los deflectores representadas en ArcGIS. Fuente: Elaboración propia..... 36

Figura. 32. Posición, distancia y ángulos definidos para los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) incorporados en el MDT. Fuente: Elaboración propia. .... 36

Figura. 33. Editor de las características de los deflectores incorporados (Altura del deflector, longitud y ancho). Fuente: Elaboración propia..... 37

Figura. 34. Resultados en 3D de la incorporación de los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia..... 38

Figura. 35. Líneas de apoyo para la definición de las estructuras correspondientes a la hipótesis B1 (izq.) y B2 (drcha.) Islas fluviales y barras laterales (rojo), rampas centradoras (verde) e hileras de rocas (blanco). Fuente: Elaboración propia en ArcGIS..... 38

Figura. 36. Técnicas de bioingeniería para la hipótesis B1 incorporados en el MDT. Fuente: Elaboración propia. .... 39

Figura. 37. Resultados en 3D de la incorporación de la doble rampa centradora (zona previa del puente) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia. .... 40

Figura. 38. Resultados en 3D de la incorporación de las técnicas de bioingeniería correspondientes a la hipótesis B1 (izquierda) y B2 (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia. .... 40

Figura. 39. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal  $Q_{50}$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 45

Figura. 40. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 46

Figura. 41. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 46

Figura. 42. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal T10 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 47

Figura. 43. Resultado de la primera modelización de la hipótesis B2 en la cual todas las islas fluviales están en el centro del cauce. Fuente: Elaboración propia. .... 49

Figura. 44. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal  $Q_{50}$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 50

Figura. 45. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 51

Figura. 46. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 51

Figura. 47. Representación de la velocidad sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal T10 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia. .... 52

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración. 1. Beneficios que proporciona la biodiversidad hidrodinámica. Fuente: Elaboración propia .....</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración. 2. Balance de beneficios que presenta un ecosistema fluvial con mayor o menor diversidad hidromorfológica. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración. 3. Esquema ilustrativo de los elementos que permiten un ecosistema más resiliente. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración. 4. Resumen de posibles beneficios que se pueden obtener de un ecosistema con mayor diversidad hidromorfológica. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>8</i>

---

## ANEXO 1. DIVERSIDAD HIDRODINÁMICA

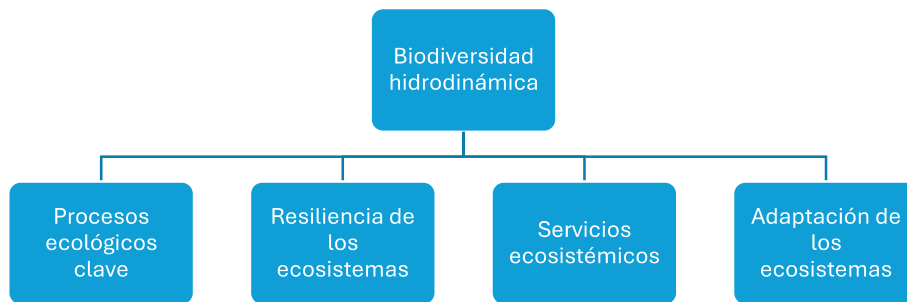
---

---

*Justificación de la importancia de la diversidad hidrodinámica*

---

La **diversidad hidrodinámica** desempeña un papel fundamental en la estructura y función de los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como en la prestación de servicios ecosistémicos vitales. Esta diversidad se refiere a la variabilidad en los regímenes de flujo de agua, que incluyen factores como la velocidad, dirección y patrones de movimiento. La justificación de su importancia radica en varios aspectos:



*Ilustración. 1. Beneficios que proporciona la biodiversidad hidrodinámica. Fuente: Elaboración propia*

En primer lugar, la diversidad hidrodinámica influye en los **procesos ecológicos clave**, como la sedimentación, erosión, transporte de nutrientes y oxigenación del agua. Un aspecto que influye en los procesos ecológicos clave es la velocidad del flujo. Los rápidos, las aguas lentas, e incluso las pozas, dan lugar a diferentes formas del lecho como por ejemplo cauces más anchos, más sinuosos o profundos que a su vez, presentan unas características propias.

Los procesos ecológicos clave desempeñan un papel fundamental en la sustentabilidad y la funcionalidad saludable de los ecosistemas fluviales. La sedimentación y la erosión, por ejemplo, son procesos que modelan la morfología del lecho del río y la estructura de los hábitats acuáticos, afectando directamente a la biodiversidad y la disponibilidad de recursos para la fauna y la flora asociadas. Por otro lado, el transporte de nutrientes es crucial para el suministro de elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de la biota acuática, mientras que la oxigenación del agua es un factor determinante para mantener condiciones óptimas de hábitat y evitar la proliferación de organismos patógenos. Por tal razón, la preservación y el restablecimiento de la diversidad hidrodinámica promueve que los ecosistemas fluviales puedan desarrollarse de manera autónoma y en armonía con su entorno natural.

La capacidad de gestión de nutrientes de los ríos y arroyos es especialmente importante en el caso de sistemas que reciben aguas de estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) (Marti et al., 2004; Martí&Sabater, 2009). Este es el caso del río Guadarrama aguas arriba de Collado Villalba al que vierte, por ejemplo, la EDAR El Chaparral (TM Guadarrama).

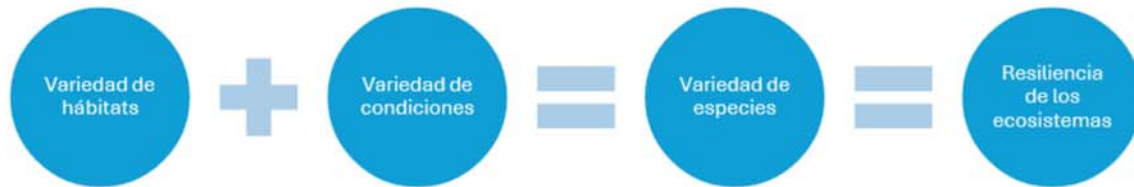


Ilustración. 2. Balance de beneficios que presenta un ecosistema fluvial con mayor o menor diversidad hidromorfológica. Fuente: Elaboración propia.

Además, la diversidad hidrodinámica promueve la **resiliencia de los ecosistemas** al proporcionar una variedad de hábitats y condiciones ambientales que pueden albergar una amplia diversidad de especies. Los diferentes regímenes de flujo crean microhábitats que permiten la adaptación y supervivencia de organismos especializados en condiciones específicas. La resiliencia derivada de esta diversidad incrementa la capacidad de los ecosistemas para resistir perturbaciones y cambios ambientales. Al mantener una amplia gama de especies adaptadas a distintas condiciones, los ecosistemas pueden responder de manera más eficaz y flexible ante condiciones adversas. Esto contribuye a preservar su estabilidad y funcionalidad a largo plazo, incluso frente a eventos estresantes.

Por ejemplo, en un escenario donde un río está contaminado y solo alberga un tipo de bacteria debido a las limitaciones hidrodinámicas que impiden la supervivencia de otras especies, la resiliencia del ecosistema se ve comprometida. Esta falta de diversidad bacteriana restringe las capacidades del ecosistema para enfrentar y mitigar la contaminación. En contraste, un ecosistema con alta diversidad hidrodinámica que incluye múltiples especies de bacterias, algunas de las cuales son especializadas en la

descomposición de contaminantes, posee una mayor capacidad de respuesta y recuperación frente a la contaminación del agua.



*Ilustración. 3. Esquema ilustrativo de los elementos que permiten un ecosistema más resiliente. Fuente: Elaboración propia.*

En términos de **servicios ecosistémicos**, los ecosistemas con una diversidad hidrodinámica adecuada proporcionan una amplia gama de beneficios para la sociedad (ilustración 4) y contribuye a mantener la provisión constante de estos servicios, asegurando el bienestar humano y la sostenibilidad de las comunidades dependientes de los recursos hídricos.

Regulación del clima	Filtración de contaminantes	Calidad del agua	Recreación y turismo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> <li>• Humedad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor dilución</li> <li>• Más organismos biodegradadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más oxigenada</li> <li>• Más filtrante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesca</li> <li>• Agricultura</li> </ul>

*Ilustración. 4. Resumen de posibles beneficios que se pueden obtener de un ecosistema con mayor diversidad hidromorfológica. Fuente: Elaboración propia.*

Los ecosistemas acuáticos dependen en gran medida de los regímenes hidrológicos para mantener su estructura y funcionamiento. La preservación y gestión adecuada de esta diversidad permite la **adaptación** de los ecosistemas a los constantes cambios provenientes del cambio global y la degradación ambiental fomentada por el ser humano. Por tanto, su adaptabilidad permitirá garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y el bienestar humano.

Como punto de partida del proyecto, es importante comprender y manejar adecuadamente la diversidad hidrodinámica para conservar y gestionar de forma sostenible los recursos hídricos.

---

## ANEXO 2. DOCUMENTACIÓN CARTOGRÁFICA

---

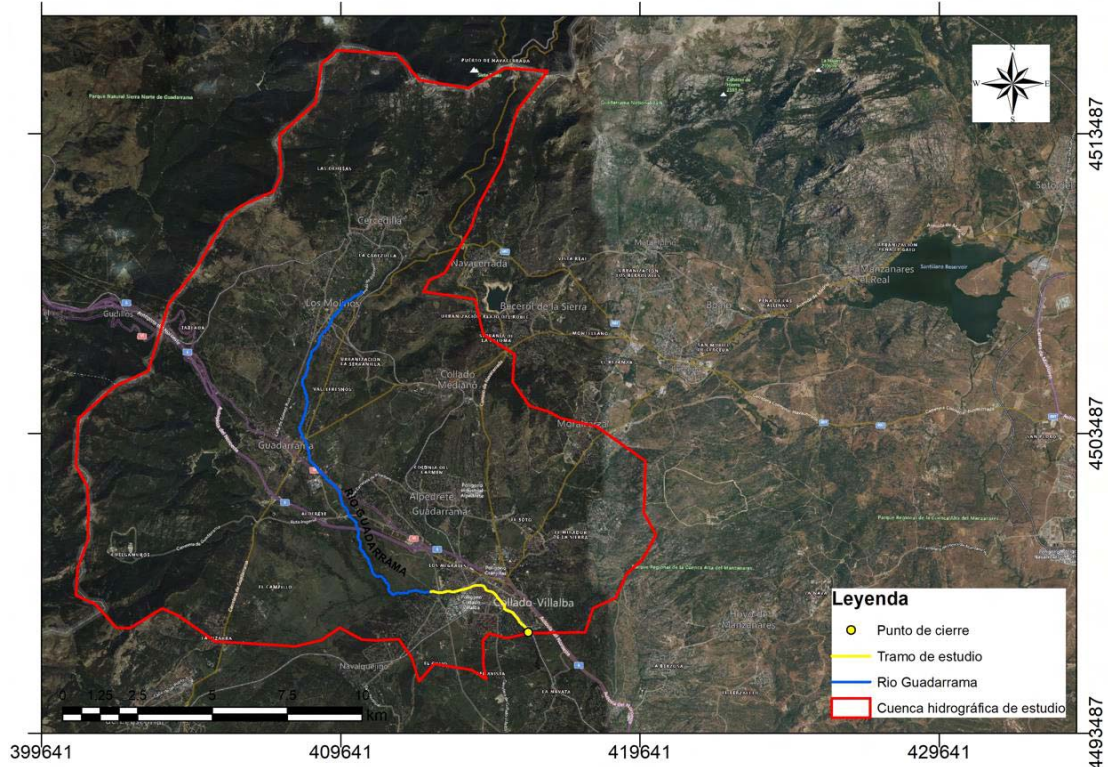


Figura. 1. Cuenca hidrográfica y tramo de estudio sobre Ortophoto PNOA. Fuente: Bing Hybrid en Arcgis.

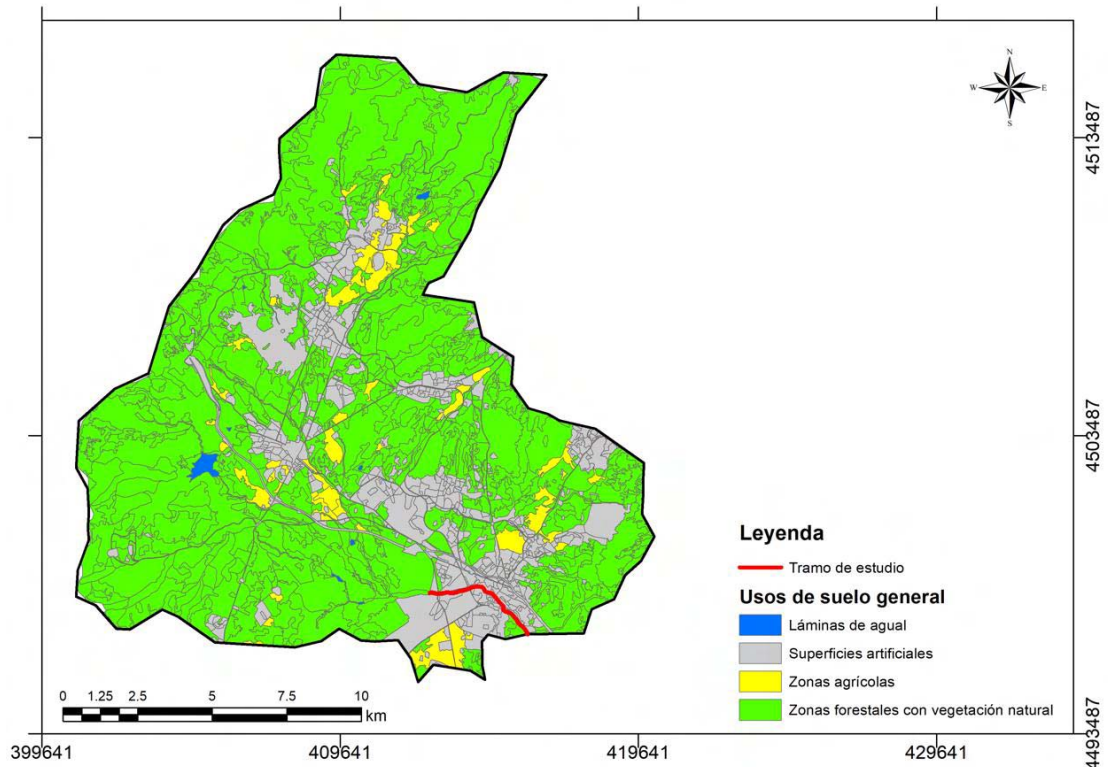


Figura. 2. Mapa de usos de suelo generales de la cuenca hidrográfica de estudio. Fuente: Elaboración propia basado en información del CORINE

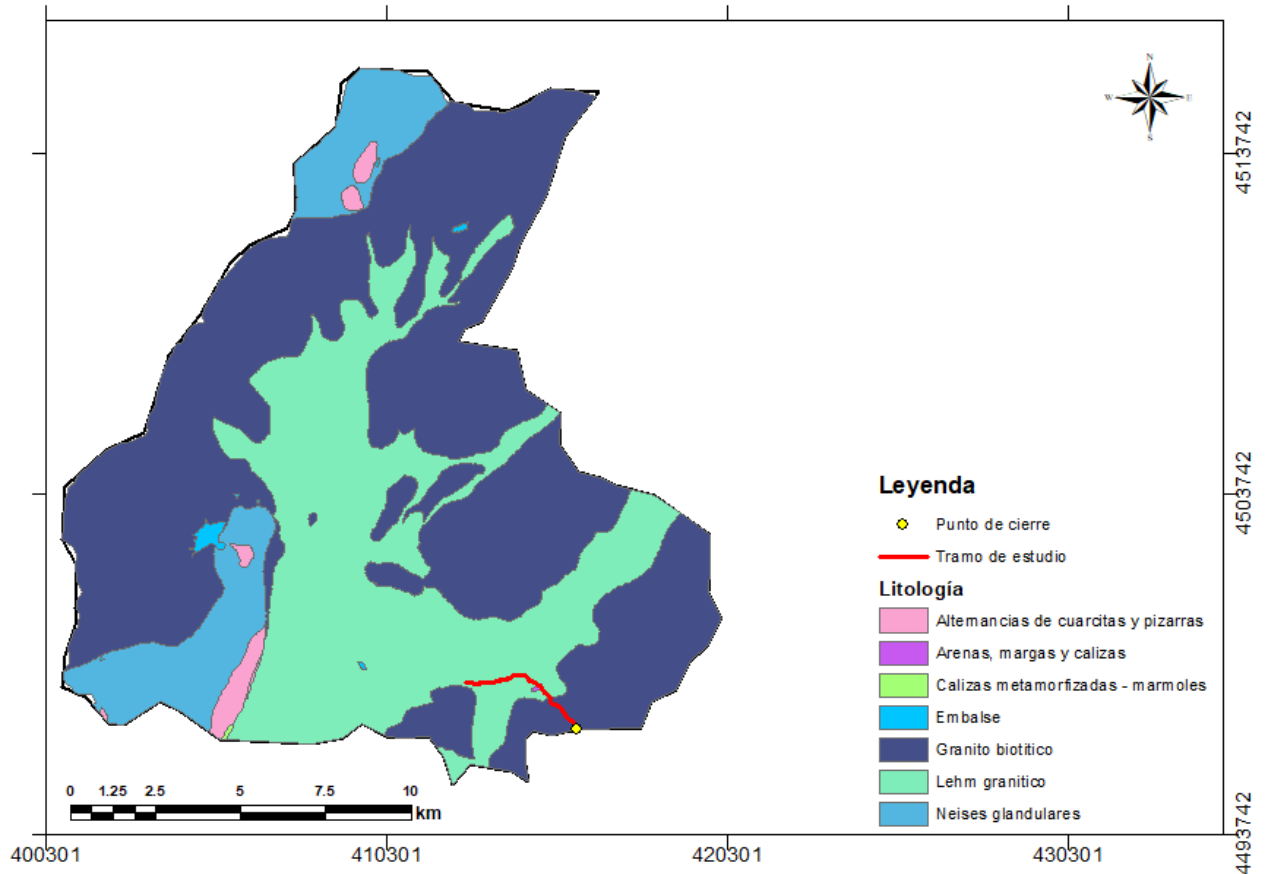


Figura. 3. Mapa litológico de la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia basado en información del IGN.

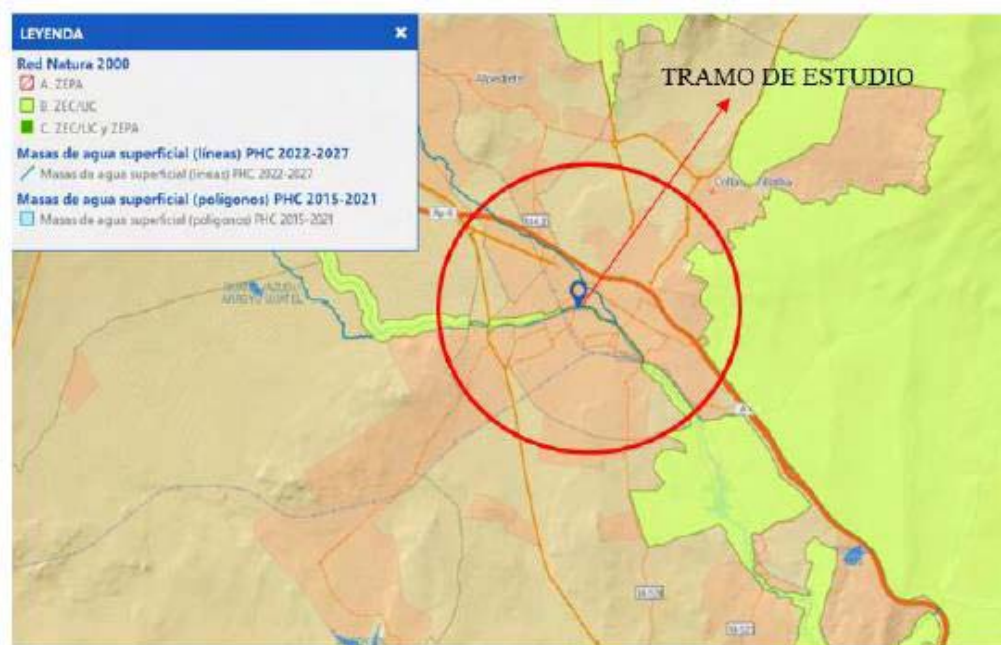


Figura. 4. Zona protegida Cuenca del río Guadarrama – Red Natura 2000. Fuente: Geoportal

C.H. TAJO

3100 VILLALBA

Identificación

Estado	ALTA	Inicio	1962	Cota (m)	850
Cód. ROEA	3100	Cód. SAIH		Cód. SAICA	
Cód. DMA	-				
Cód. masa de agua	ES030MSPF0404021				
UTM X	414.935	Y	4.497.967	Huso	30
				Datum	ETRS89
Río	Guadarrama				
Cuenca receptora (km2)	234				
Sistema de explotación	MACROSISTEMA				
T. Municipal	Collado Villalba				
Provincia	Madrid				
Hoja 1:50.000	SAN LORENZO DE EL ESCORIAL (533)				

Fotografía

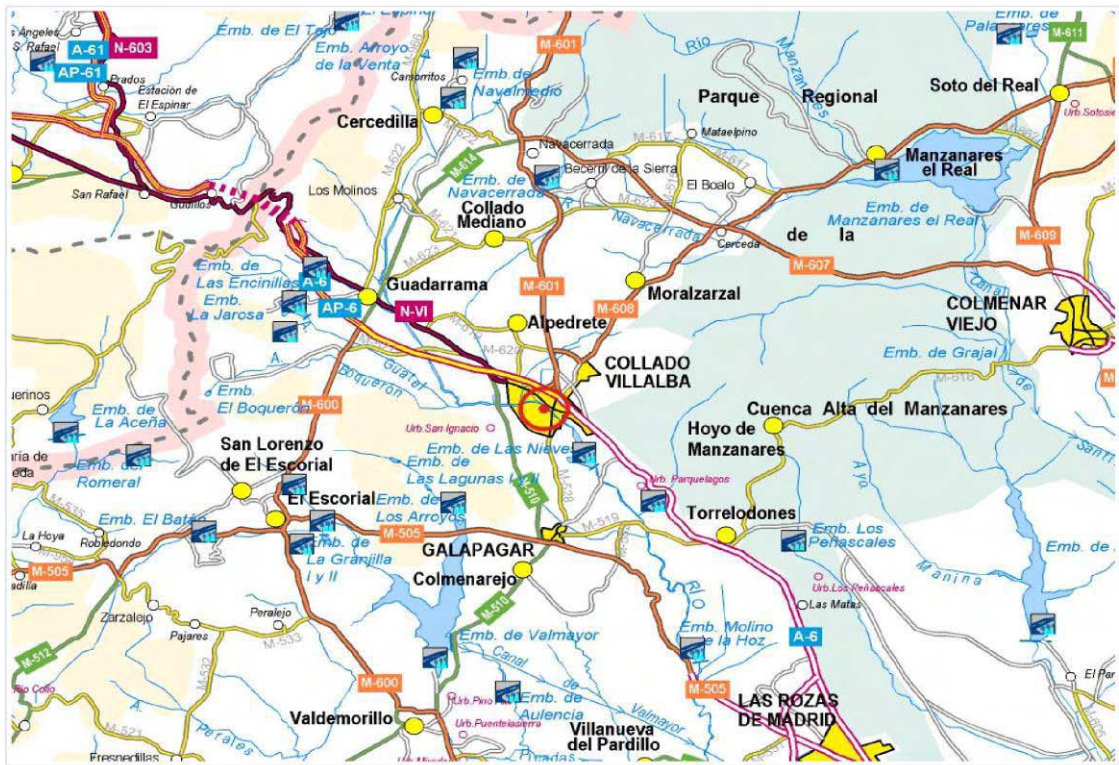


Tipología

Sensor	BOYA Y CONTRAPESO / LIMNIGRAFO	Longitud (m)		Ancho (m)	12,8
Tipo de Estación	ENCAUZAMIENTO CON CANAL DE AGUAS BAJAS	Caseta		Pasarela	
Régimen de caudales	ALTERADO	Escala	SÍ (EXTERIOR)	Vertedero	

Figura. 5 Ficha técnica de la estación de aforo 3100 – Villalba 1/2. Fuente: CEDEX.

Plano de situación



Sección tipo

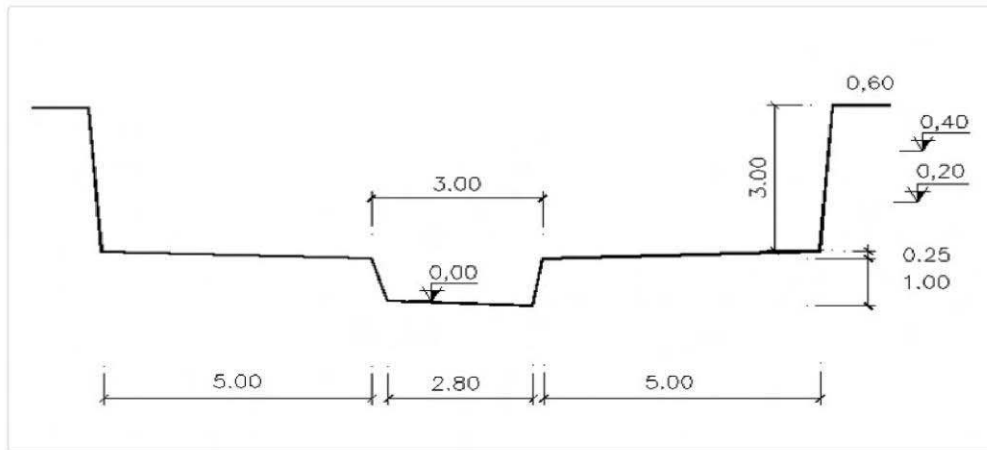


Figura. 6. Ficha técnica de la estación de aforo 3100 – Villalba 2/2. Fuente: CEDEX.



Figura. 7. Estación de aforo 3100 - Villalba. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS.

---

## ANEXO 3. SITUACIÓN ACTUAL

---

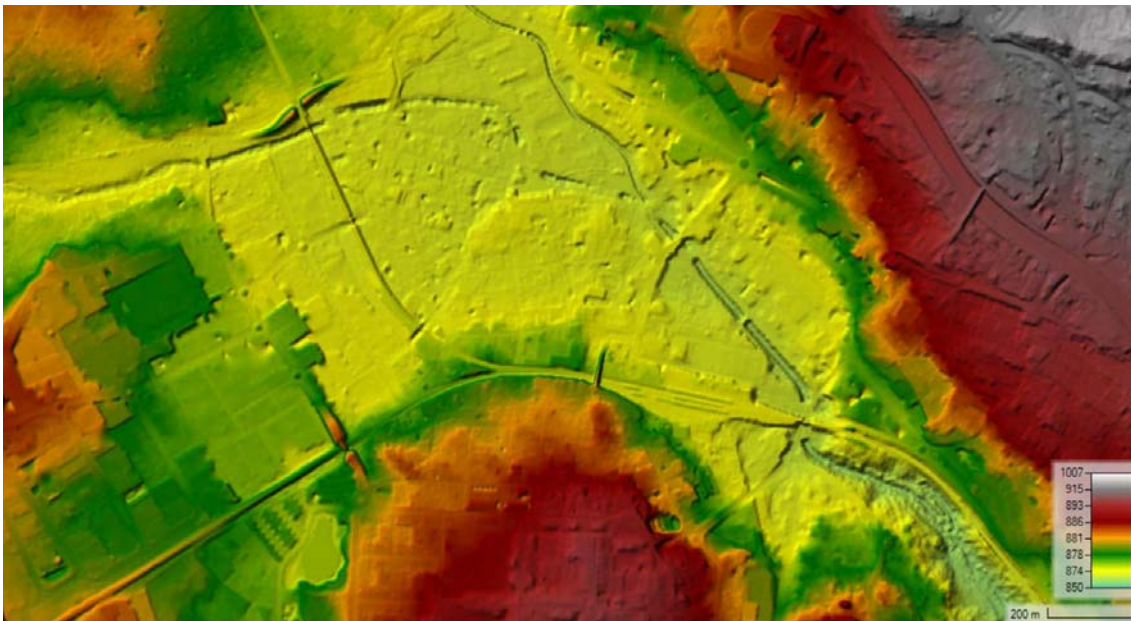
---

*Preparación del modelo digital del terreno (MDT) en la situación actual*

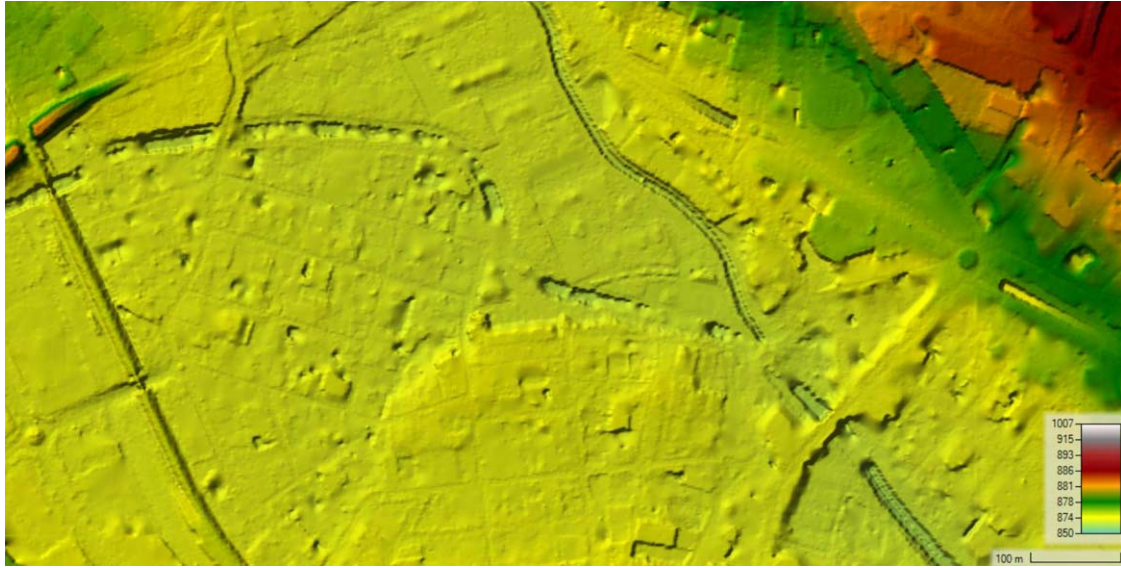
---

## 1. Preparación del MDT

Para iniciar la fase preparatoria del modelo, se ha procedido a recabar la información geoespacial de la región de interés. En el contexto del Anteproyecto, se ha dado prioridad al empleo del Modelo Digital de Superficies con resolución de 2m (**MDS02**), debido a su capacidad para proporcionar una representación detallada y precisa de los elementos topográficos superficiales relevantes para el análisis de inundaciones. Con el objetivo de mantener la coherencia en los datos utilizados, se ha optado por utilizar el mismo modelo, aunque se reconoce que también sería apropiado emplear el Modelo Digital de Elevaciones (MDT), dado que el flujo hidráulico no se desviará del lecho fluvial, y por ende, la topografía circundante no afecta a la modelización hidráulica. Además, es relevante señalar que se espera realizar cambios significativos en la forma del lecho, por tanto, se destaca que la elección entre ambos modelos no tiene impacto en los objetivos del estudio.



*Figura. 8. Modelo digital de superficies de 2m de la zona de estudio (MDS02). Fuente: CNIG*



*Figura. 9. Detalle del MDS02 sobre la zona de estudio. Fuente: CNIG*

Como se puede observar en las figuras anteriores, el canal no tiene una estructura bien definida. Además, su continuidad se ve interrumpida de forma constante por la elevación de la superficie que representa los puentes vehiculares. En su estado actual, este modelo resulta inadecuado para propósitos de modelización. Por consiguiente, en los siguientes apartados se detallará el meticuloso proceso de transformación necesario para convertirlo en un modelo funcional y efectivo.

En primer lugar, señalar que en todos los procesos se diferencian dos zonas (figura 10); Las zonas naturales (recuadros negros) y la zona canalizada (recuadro rojo).

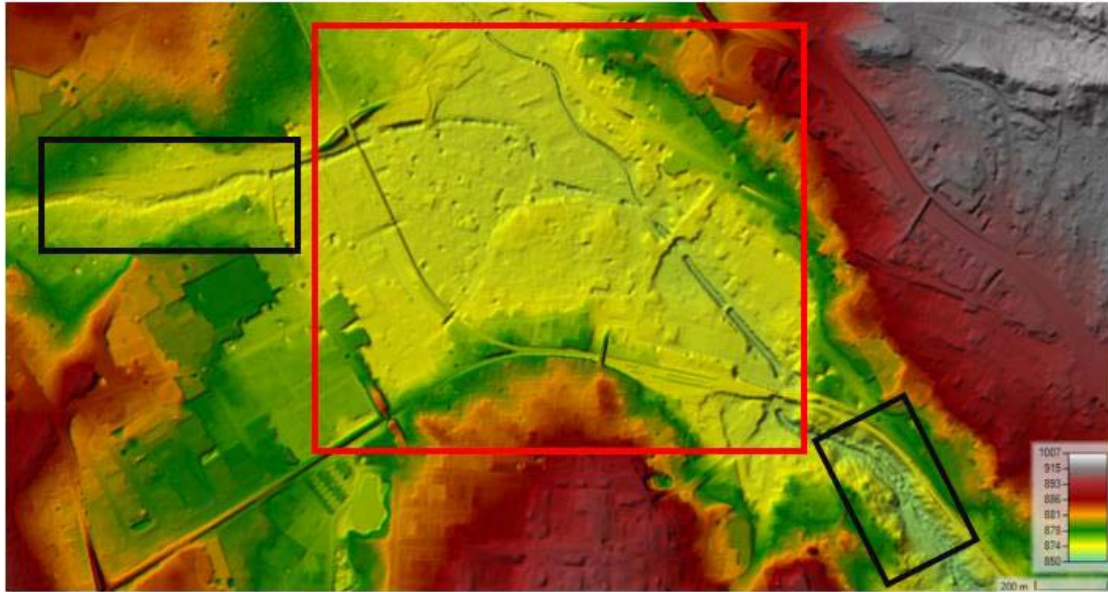


Figura. 10. Distinción de zonas naturales (recuadro negro) y zonas canalizadas (recuadro rojo) dentro de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

### **Paso 1: Relleno del canal.**

Para facilitar la reestructuración del canal de hormigón, el primer paso consiste en realizar el relleno del canal hasta la cota de coronación en cada punto (figura 11). Este paso se puede realizar ya que se conoce que la modelización solo influirá en la parte interna del canal (no hay desbordamientos). Este procedimiento se ha llevado a cabo utilizando ArcGIS, donde se ha generado un polígono que representa el contorno del canal y, posteriormente, se le ha asignado la cota de coronación correspondiente en cada ubicación. Este proceso se ejecuta únicamente en el tramo canalizado, dejando sin modificar las secciones inicial y final del tramo, que corresponden a las áreas naturales adyacentes. Una vez completado el polígono, se convierte en un raster en formato TIFF para su exportación a HEC-RAS.

En la extensión Ras Mapper de HEC-RAS, se dispone de una función que permite superponer capas para generar un nuevo MDT. A continuación, se presentan las figuras que muestran el resultado obtenido. Para un análisis más detallado, se ha seleccionado una de las zonas pertenecientes al canal.

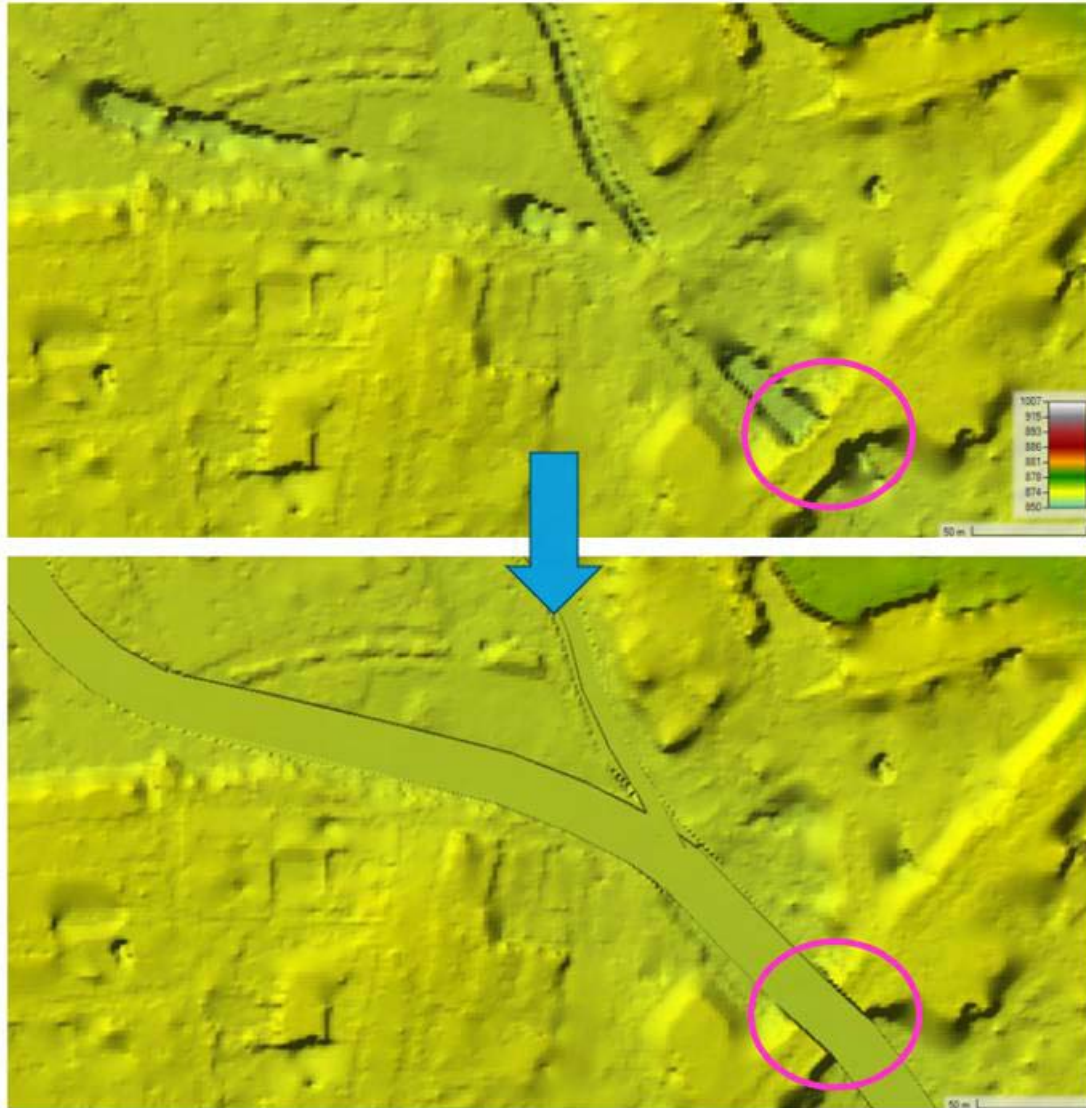


Figura. 11. Representación del paso 1. Relleno del canal a cota de coronación. El círculo presenta el detalle de la eliminación de estructuras transversales que afectan a la continuidad del cauce. Fuente: Elaboración propia.

Como se ve reflejada en la figura, el relleno también permite eliminar los puentes vehiculares que anteriormente impedían un flujo de agua continuo (círculo).

## Paso 2: Construcción del canal

Una vez definido el lecho del cauce, el siguiente paso implica la adecuación geométrica del canal de hormigón. La herramienta de creación de modificaciones disponible en Ras Mapper simplifica el proceso de diseño de los dos canales. Se implementa el diseño especificado en el Anteproyecto tal como se muestra en las figuras correspondientes 12 y 13.

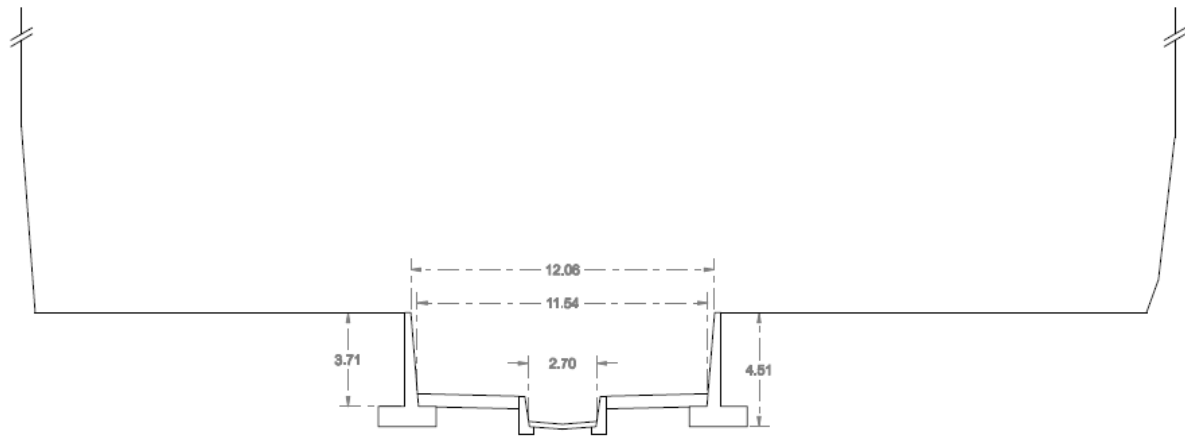


Figura. 12. Sección transversal representativa del río Guadarrama de la zona canalizada en hormigón. Fuente: Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.

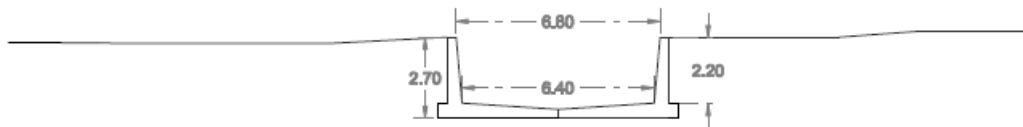


Figura. 13. Sección transversal representativa del arroyo de la Poveda de la zona canalizada en hormigón. Fuente: Anteproyecto de renaturalización del río Guadarrama y del arroyo de la Poveda a su paso por el término municipal de Collado Villalba.

El resultado se muestra en las siguientes figuras 14 y 15

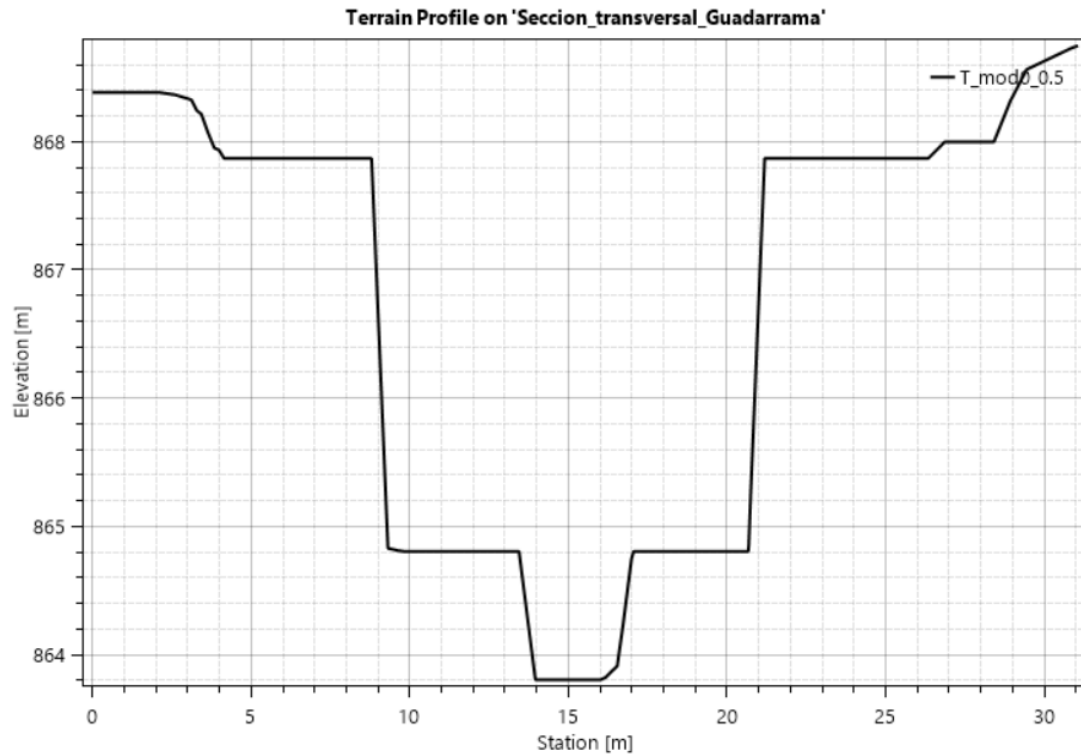


Figura. 14. Modificación de la sección transversal del río Guadarrama, para representar el tramo canalizado en hormigón. Fuente: Elaboración propia.

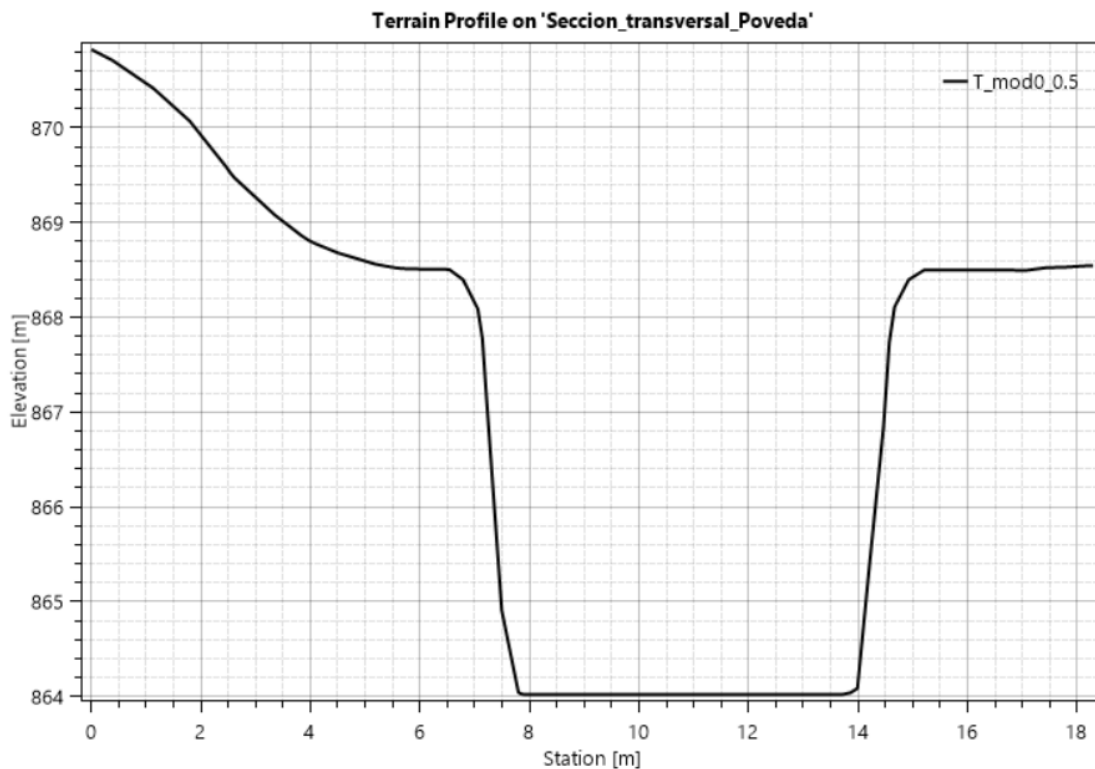


Figura. 15. Modificación de la sección transversal del arroyo de la Poveda, para representar el tramo canalizado en hormigón. Fuente: Elaboración propia.

El río Guadarrama se caracteriza por estar conformado por dos canales, uno de los cuales

corresponde al canal de aguas bajas. El arroyo de la Poveda presenta un solo canal confinado por muros de hormigón de 2.2 metros de altura, aunque en el gráfico se observa que alcanzan una altura de 4 metros. Esta discrepancia se debe a una simplificación en el proceso de ajuste necesario para igualar la cota del terreno en el punto de confluencia de ambos cauces. Es importante señalar que esta disparidad no afecta a los resultados, como se demostrará posteriormente, incluso en el escenario más desfavorable ya que hay que recordar que no se van a utilizar caudales que puedan desbordar.

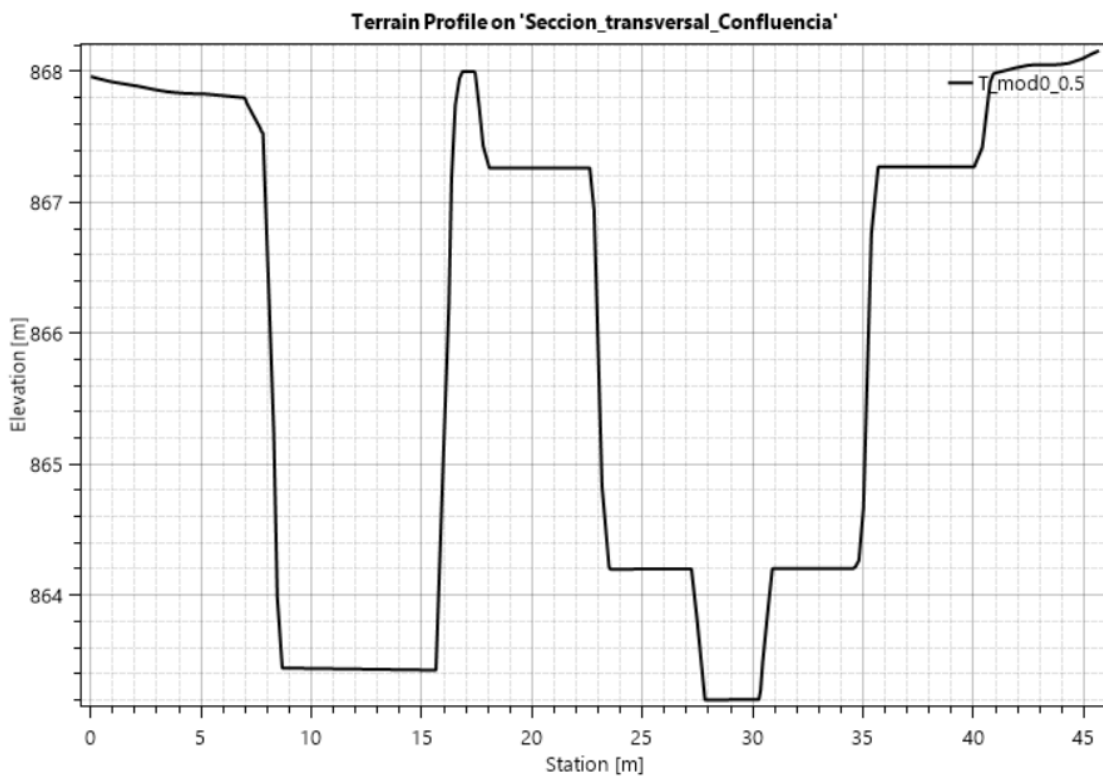


Figura. 16. Sección transversal en la confluencia de ambos ríos. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra el resultado de incluir dichas modificaciones y la ubicación de las secciones transversales que se acaban de comentar.



Figura. 17. Resultado final del paso 2: Construcción del canal y ubicación de las secciones transversales. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la profundidad del cauce principal (4m) ha sido necesario realizar una modificación adicional en la zona confinada entre el tramo natural inicial y el tramo canalizado. Para este caso concreto se han dibujado secciones transversales que, posteriormente, han sido modificadas manualmente una a una para obtener el resultado deseado.

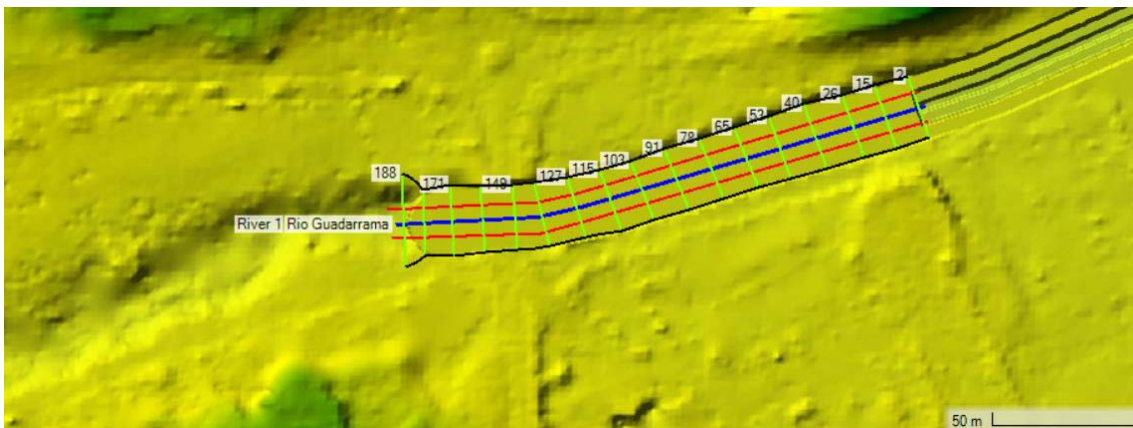


Figura. 18. Modificación mediante secciones transversales (modelo 1D) en la zona de transición del tramo natural al tramo canalizado en el río Guadarrama. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de modificación implica crear secciones transversales y posteriormente se ajustan manualmente una a una a través del editor unidimensional (1D). Para orientar el diseño de estas modificaciones, se ha tomado como referencia una sección transversal tipo (Figura 19), situada aguas arriba de la propia zona a modificar. El objetivo de esta modificación es reducir la pendiente resultante de la diferencia de cota entre ambas zonas, para evitar posibles saltos de agua a la hora de realizar modelizaciones. (figura 20)

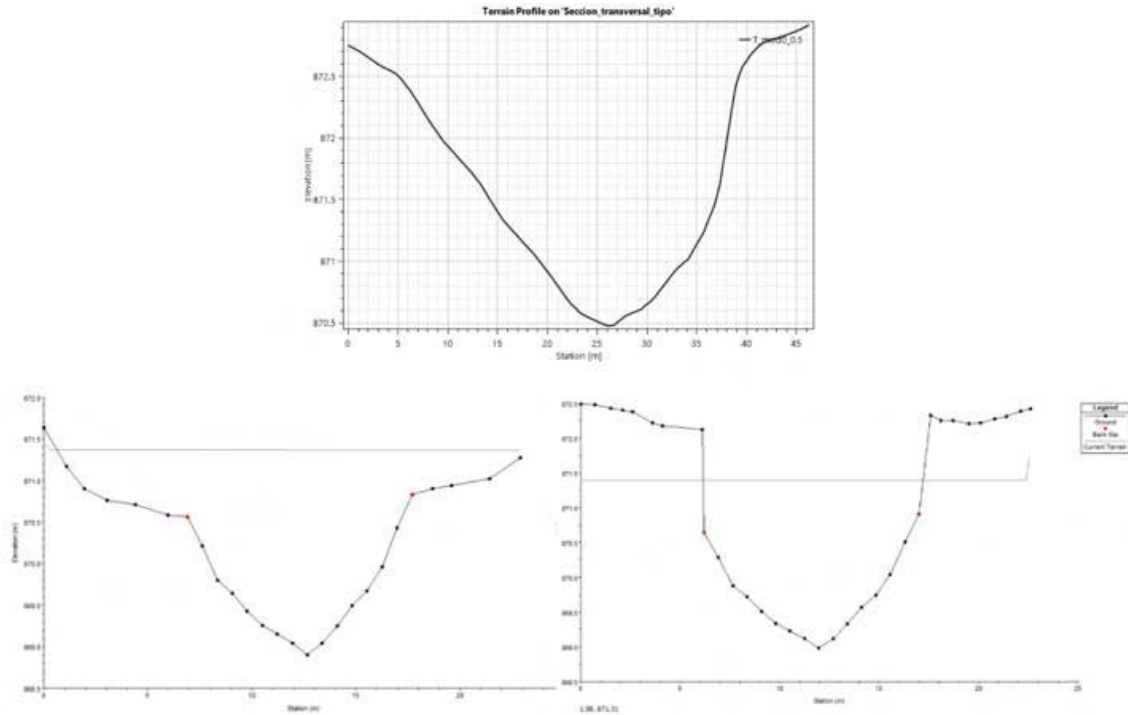


Figura. 19. Arriba se representa la sección transversal tipo y abajo se representan las modificaciones realizadas a las secciones transversales para asimilarse a la sección transversal tipo. Fuente: Elaboración propia.

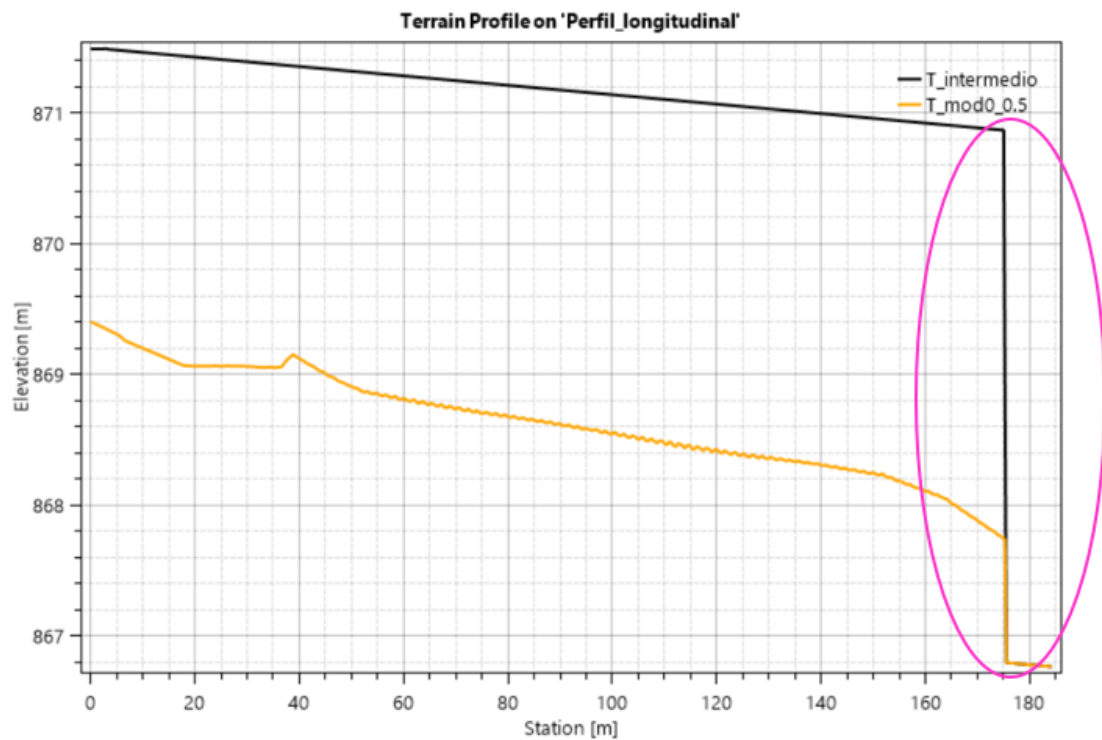
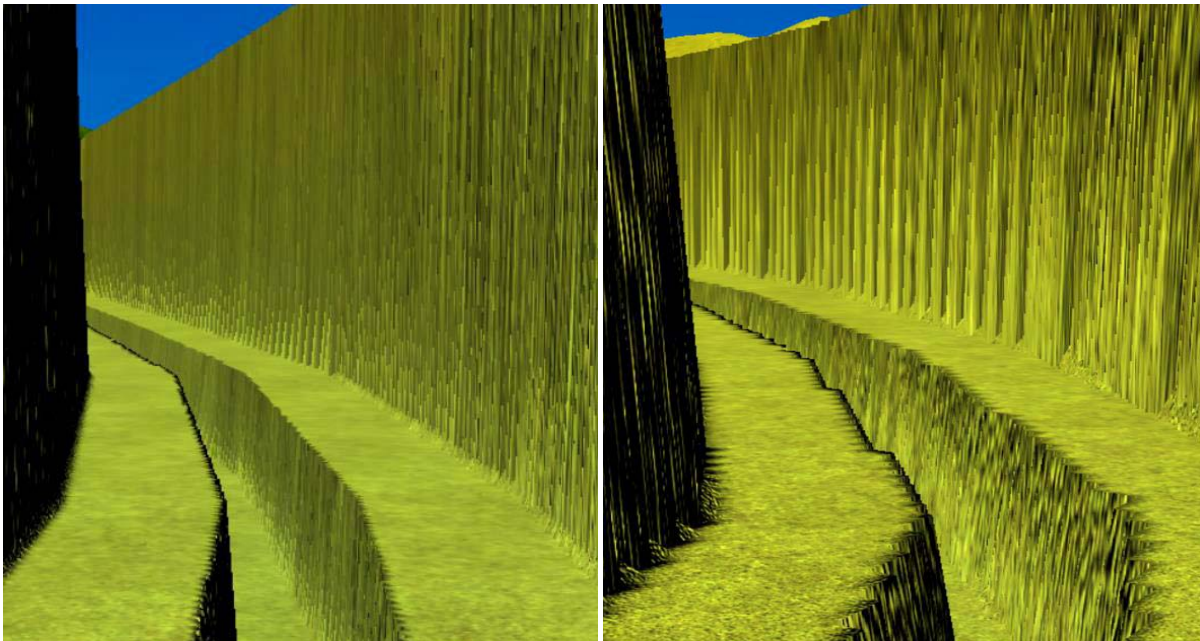


Figura. 20. Perfil longitudinal donde se observa la diferencia de cota entre el terreno relleno y el terreno modificado en la zona de transición entre lo natural y lo artificial. Fuente: Elaboración propia.

La representación en 3D adjunta muestra el aspecto final del canal modificado. Se presenta una comparación entre dos figuras: la primera, en la izquierda, corresponde a una representación del terreno con una resolución de 0.1, que inicialmente estaba destinada a ser utilizada para la modelización. Sin embargo, con el objetivo de optimizar el rendimiento y la eficiencia del proceso, se tomó la decisión de emplear una precisión de 0.5 en su lugar.

Esta elección conlleva una consecuencia visual clara: se observa un patrón de zig-zag en las paredes del canal en la representación con resolución 0.5. A pesar de ello, si bien este aspecto puede resultar evidente a nivel visual, no tiene un impacto significativo en los resultados finales del análisis hidráulico. De esta manera, se ha logrado un equilibrio entre la eficacia del proceso computacional y la precisión de los resultados finales.



*Figura. 21. Vista en 3D del resultado final de la modificación del canal con una resolución de 0.1 a la izquierda y 0.5 a la derecha. Fuente: Elaboración propia.*

### **Paso 3: Incluir las barreras transversales**

El último paso implica la incorporación de las barreras transversales identificadas a lo largo del tramo de estudio; un total de 7 barreras. Para esta labor, se ha empleado nuevamente la extensión Ras Mapper como herramienta de trabajo.

Las primeras 6 barreras, cuya finalidad es la de mantener una lámina de agua uniforme, se extienden a lo ancho del cauce y sobresalen 10 cm sobre el nivel del lecho del canal de aguas bajas (Gráfico de la izq - figura 22). La última barrera, situada a la altura de la

estación de aforo, cumple una función distinta: asegurar la retención de agua hasta alcanzar un nivel predeterminado, garantizando así la obtención continua de datos de aforamiento. En consecuencia, esta barrera ocupa exclusivamente el canal de aguas bajas, manteniéndose 10 cm por debajo de la cota de coronación del mismo. (Gráfico de la drcha - figura 22).

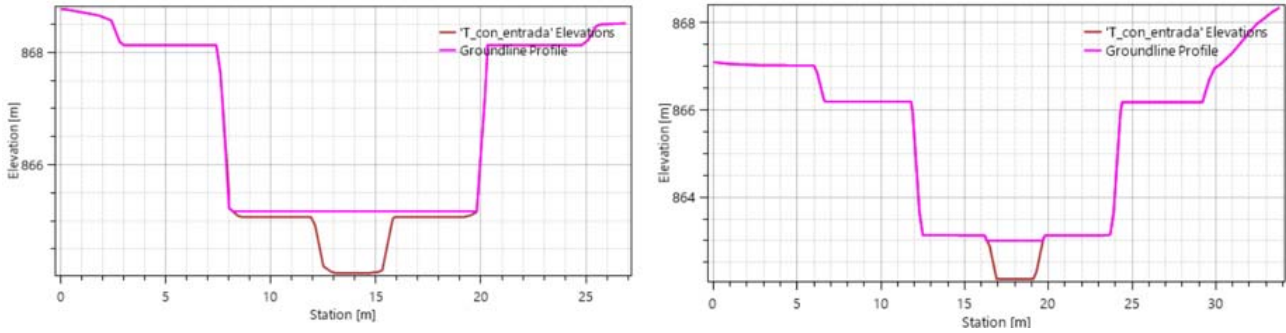


Figura. 22. Secciones transversales en las zonas donde se localizan las barreras. A la izquierda se muestra el ejemplo tipo de las 6 barreras y a la derecha se muestra la barrera de la estación de aforo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta una vista en planta y una vista en 3D del resultado de la inserción de las barreras transversales:



Figura. 23. Resultado final del MDT con la inclusión de las barreras. Fuente: Elaboración propia.

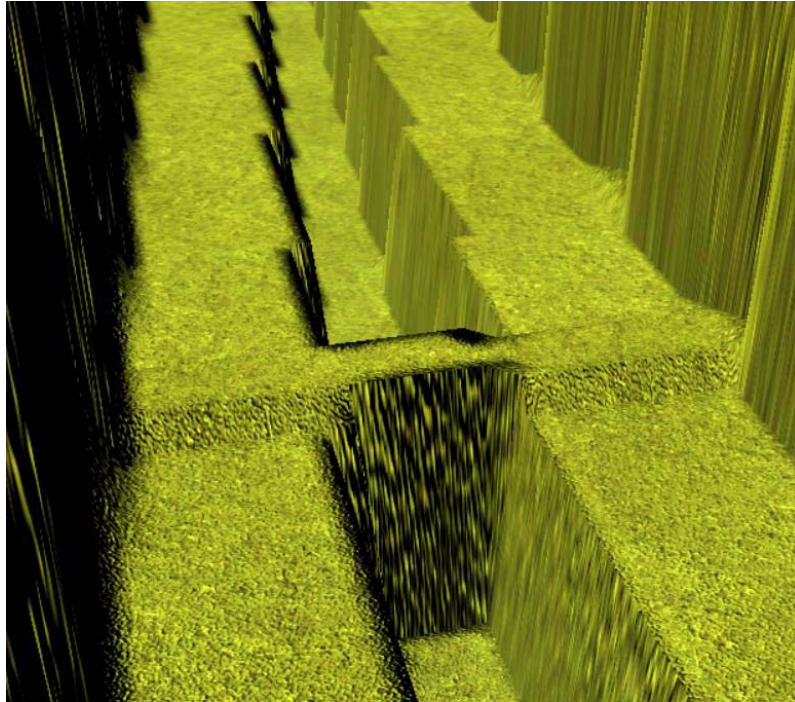


Figura. 24. Vista 3D de las barreras transversales dentro del MDT. Fuente: Elaboración propia.

## 2. Definir la malla

El siguiente paso es generar una **malla de cálculo** que cubra todo el área de interés. En este caso, la malla se ciñe al cauce con un margen de 20m a cada lado aproximadamente. La malla divide el área de estudio en múltiples celdas o elementos finitos, cada uno con sus propiedades hidráulicas asociadas, como la elevación del terreno o la rugosidad, entre otros. Esta discretización permite al software calcular el flujo de agua y la propagación de inundaciones de manera precisa en cada punto del dominio mediante el uso de ecuaciones de la dinámica de fluidos. El resultado es la velocidad, la profundidad y la dirección del flujo de agua en cada celda de la malla.

Como ya se ha comentado anteriormente, HEC-RAS utiliza la técnica de subgrid y por consiguiente se ha tomado la decisión de elaborar una malla con un **tamaño de celda de 5m**. Dentro de esta estructura de malla, se han implementado una serie de refinamientos con el propósito de reducir el tamaño de las celdas y mejorar la resolución en las áreas críticas de interés, buscando así alcanzar resultados más precisos. Como se evidencia en la figura 25, los **ajustes de refinamiento** se han ubicado estratégicamente en las márgenes de ambos canales: el de aguas bajas y el de aguas ordinarias. Esta decisión se fundamenta en la necesidad de evitar el desbordamiento del agua fuera del canal, lo cual

podría distorsionar significativamente los resultados del análisis hidráulico.

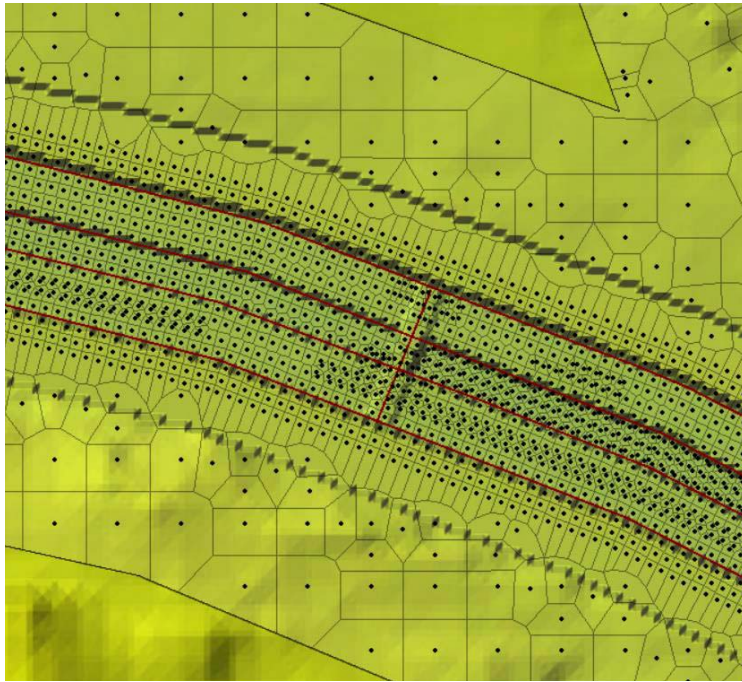


Figura. 25. Detalle de la malla tras elaborar las líneas de refinamiento correspondientes. Fuente: Elaboración propia.

Además, se han implementado líneas de refinamiento adicionales en las ubicaciones de las 7 barreras identificadas. La siguiente figura 26 muestra una sección longitudinal en HEC-RAS, donde las celdas están representadas en marrón. Es necesario establecer líneas de refinamiento en las barreras transversales para evitar que el agua atraviese estas barreras prematuramente a través de las mismas debido a la compartición de celdas. Sin las líneas de refinamiento (como se observa en la imagen de la izquierda), el agua puede fluir a través de la barrera antes de tiempo. En cambio, al utilizar líneas de refinamiento (como se observa en la imagen de la derecha), las barreras funcionan correctamente permitiendo el paso del agua una vez superada la cota de coronación de la barrera.

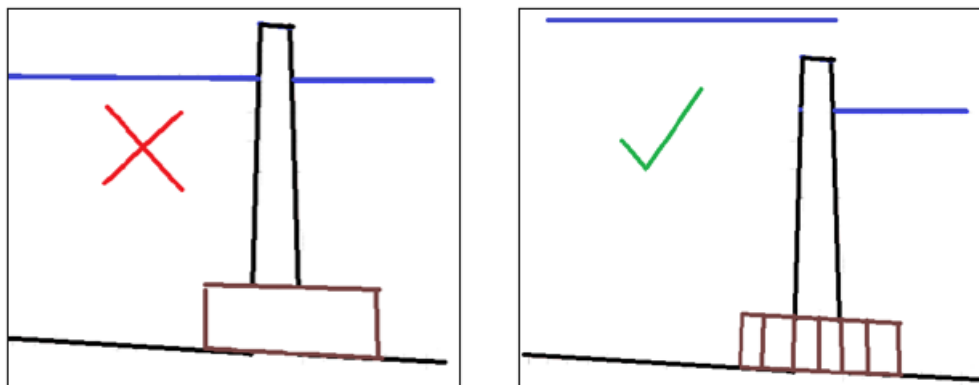


Figura. 26. Ejemplo de barrera transversal sin línea de refinamiento (izquierda) y con línea de refinamiento (derecha). Fuente: Elaboración propia.

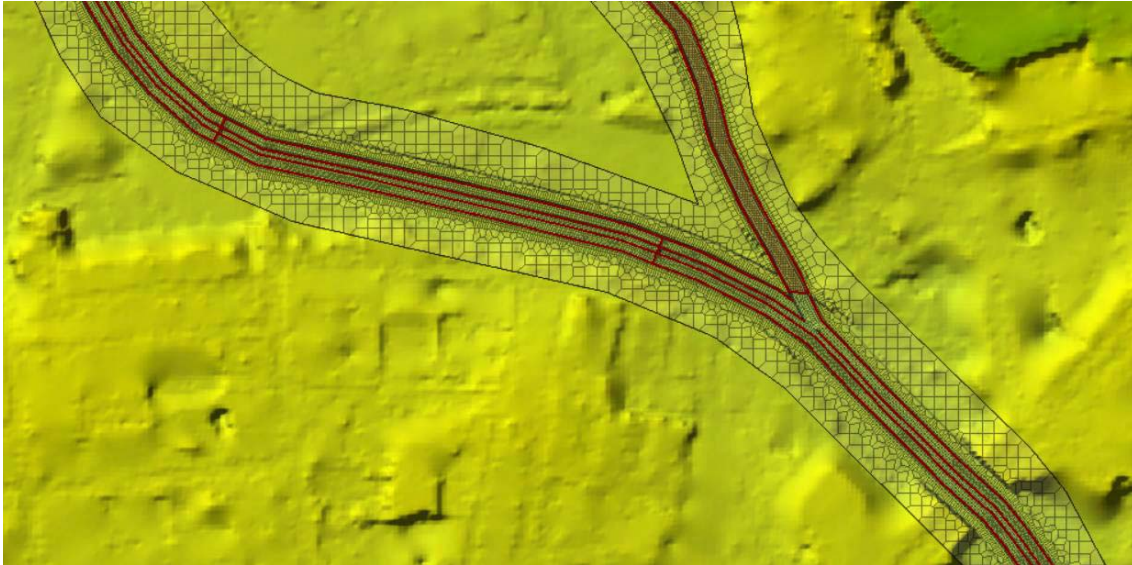


Figura. 27. Detalle de la malla desde una vista más general, donde se aprecia un tamaño de malla de menor resolución en las zonas externas del cauce y mayor resolución en las partes internas al mismo. Fuente: Elaboración propia

### 3. Condiciones de contorno

Dado que se está empleando un enfoque bidimensional (2D), es necesario aplicar un hidrograma como **condición de entrada**. Como ejemplo (Figura 28), para el T2 se establece un hidrograma de 24h con datos registrados cada hora. Para evitar posibles irregularidades en el flujo, como "olas" o "desbordamientos" se ha establecido un caudal inicial bajo que se incrementa gradualmente durante las primeras 12 horas del hidrograma. Posteriormente, este caudal alcanza su valor deseado y se mantiene constante durante las siguientes 12 horas, garantizando así que el flujo de agua alcance un régimen permanente en el tiempo. Para T10 también se utiliza un hidrograma de 24h.

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date:  Time:

Fixed Start Time: Date: 12APR2024 Time: 0000

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m <sup>3</sup> /s)
1	11Apr2024 2400	00:00:00	5
2	12Apr2024 0100	01:00:00	7.478
3	12Apr2024 0200	02:00:00	9.955
4	12Apr2024 0300	03:00:00	12.433
5	12Apr2024 0400	04:00:00	14.91
6	12Apr2024 0500	05:00:00	17.388
7	12Apr2024 0600	06:00:00	19.865
8	12Apr2024 0700	07:00:00	22.343
9	12Apr2024 0800	08:00:00	24.82
10	12Apr2024 0900	09:00:00	27.298
11	12Apr2024 1000	10:00:00	29.775
12	12Apr2024 1100	11:00:00	32.253
13	12Apr2024 1200	12:00:00	34.73
14	12Apr2024 1300	13:00:00	34.73
15	12Apr2024 1400	14:00:00	34.73
16	12Apr2024 1500	15:00:00	34.73
17	12Apr2024 1600	16:00:00	34.73
18	12Apr2024 1700	17:00:00	34.73
19	12Apr2024 1800	18:00:00	34.73
20	12Apr2024 1900	19:00:00	34.73
21	12Apr2024 2000	20:00:00	34.73
22	12Apr2024 2100	21:00:00	34.73
23	12Apr2024 2200	22:00:00	34.73
24	12Apr2024 2300	23:00:00	34.73
25	12Apr2024 2400	24:00:00	34.73

Figura. 28. Ejemplo de hidrograma para el periodo de retorno de 2 años en HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de  $Q_5$  y  $Q_{50}$ , donde los caudales son menores en comparación con T2, se ha acertado el tiempo de ajuste del hidrograma ya que se alcanza un estado de equilibrio de forma más rápida. De tal forma que para  $Q_5$  son 12h mientras que para  $Q_{50}$  son 6h.

Respecto a la **condición de salida** se selecciona “Normal Depth” que se utiliza cuando se quiere caracterizar el comportamiento del flujo bajo condiciones estables. Se determina como la pendiente localizada entre la sección de salida a una sección anterior. En este caso se establece un Normal Depth = 0.5

---

## ANEXO 4. SITUACIÓN PRE-OPERACIONAL

---

*Preparación del modelo digital del terreno (MDT) en la situación pre-operacional*

Como paso preliminar a la incorporación de las estructuras de bioingeniería, se propone la remoción de la solera de hormigón existente. Esta modificación tiene como objetivo obtener un cauce con una estructura más natural, de forma cóncava, que simule un lecho fluvial compuesto por arena, replicando las condiciones naturales del entorno. A su vez, también se pretende eliminar todas las barreras transversales presentes en el tramo de estudio.

La modificación en HEC-RAS se realiza mediante secciones transversales modificadas manualmente mediante el modelado en 1D. El resultado final se presenta a continuación:

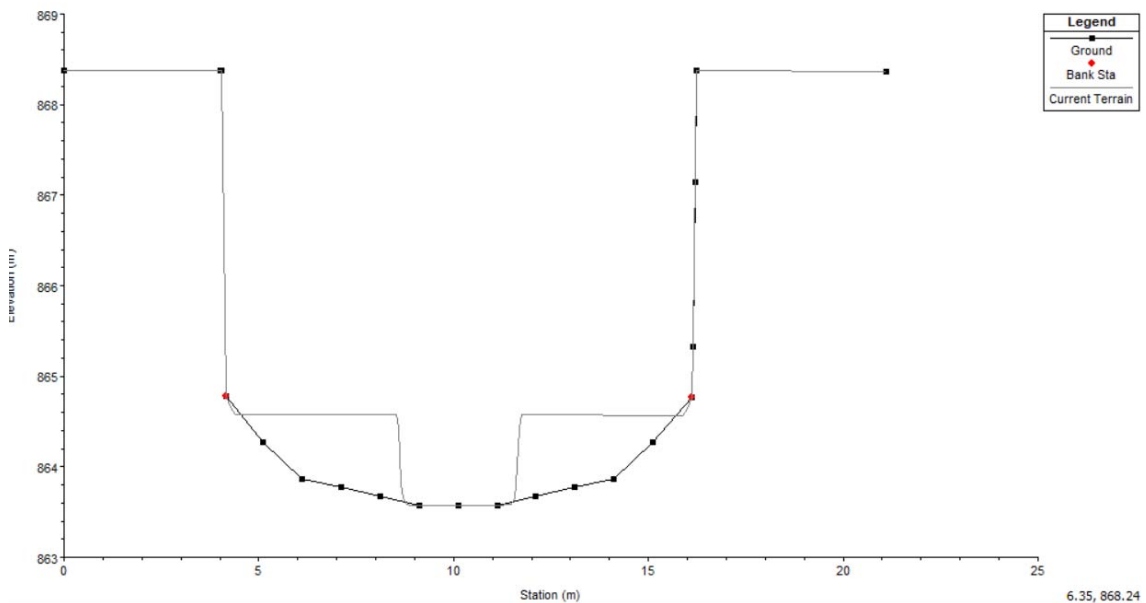


Figura. 29. Sección transversal modificada para obtener un cauce que represente la realidad. La línea gris clarita representa el cauce de hormigón, mientras que la línea con puntos negros representa el cauce natural. Fuente: Elaboración propia.

*Estudios de prueba y error en la disposición de los deflectores*

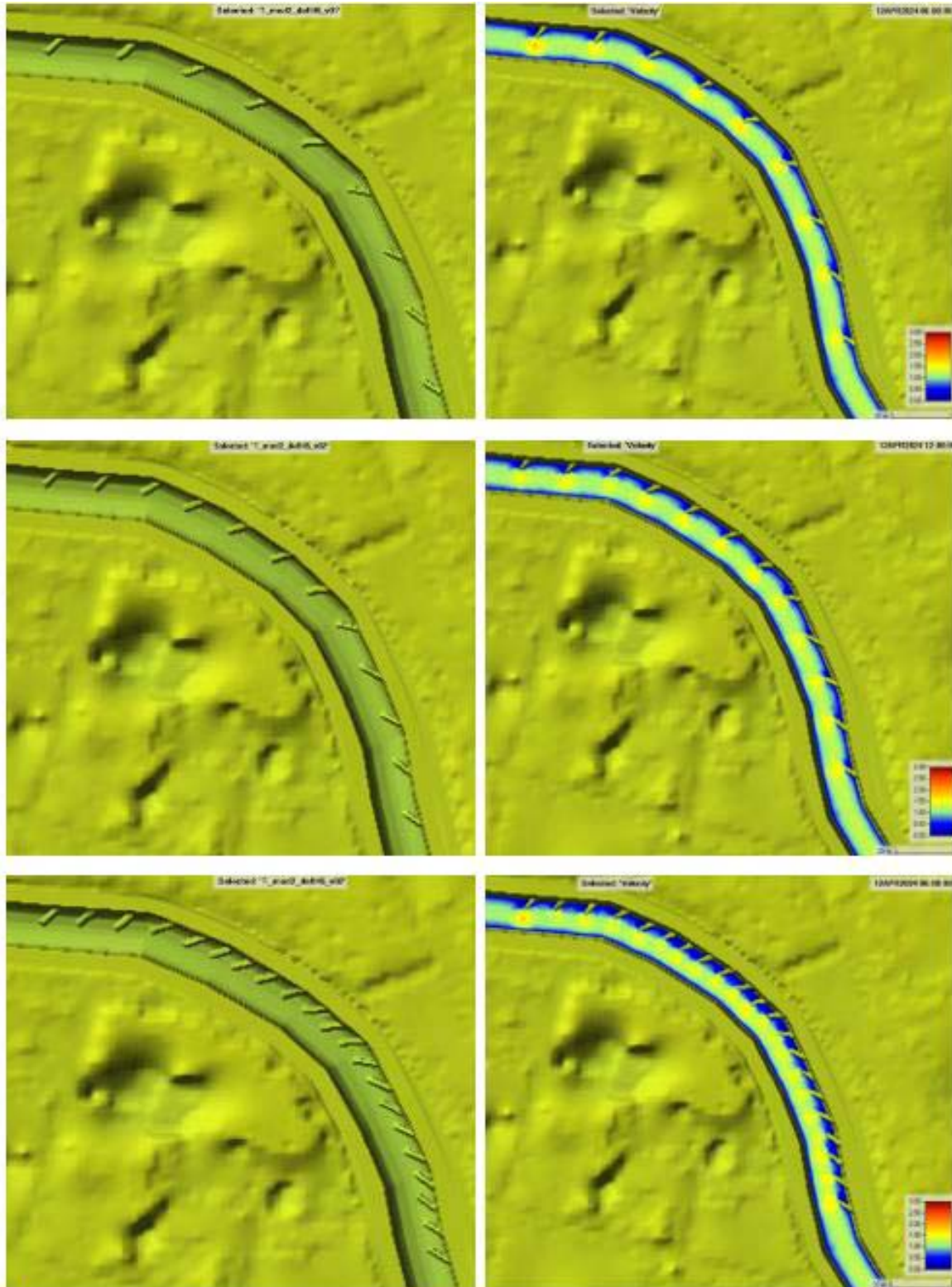


Figura. 30. Estudio del efecto de los deflectores en función de la separación entre estructuras. De arriba a abajo separación de: 20m, 15m y 10m

---

## ANEXO 5. SITUACIÓN POST-OPERACIONAL

---

---

*Preparación del modelo digital del terreno (MDT) en la situación post-operacional*

---

## **1. Preparación del modelo para las hipótesis A1 y A2**

Para preparar el modelo se han utilizado las mismas herramientas que en la situación pre-operacional; ArcGIS y Ras Mapper de HEC-RAS.

El primer paso es crear una guía en ArcGIS con algunos de los datos geométricos para facilitar la incorporación de las estructuras a HEC-RAS. Estos datos son: posición, distancia y ángulo. Para empezar, se traza una línea que sigue el contorno de las curvas externas, cuyo punto inicial es 10m antes de llegar a la curva y el punto final 10m después de la misma. Es importante extender la longitud de esta línea más allá de la longitud de la curva para evitar que el primer deflector se ubique en la zona problemática. Este primer deflector, es el encargado de marcar el cambio y por ello, debe colocarse en la sección previa a la curva.

Posteriormente, esta línea se ha dividido en segmentos de 15m\*, y en cada punto de segmentación se ha dibujado una línea con un ángulo de 45° o 90° respecto a la línea de curva, dependiendo de la hipótesis seleccionada. Al seguir esta metodología se obtendrán 10 deflectores por curva. Estas líneas se han exportado de ArcGIS e importado en HEC-RAS.

\* Se han llevado a cabo modelizaciones con separaciones de 10 y 20m. La modelización con una separación de 10m demuestra ser efectiva en términos de funcionalidad, pero conlleva un sobrecosto innecesario en la ejecución de la obra. Por el contrario, la modelización con una separación de 20m resulta ineficaz, ya que no proporciona la protección adecuada contra la erosión de la orilla. La modelización con una separación intermedia de 15m se encuentra en un punto de equilibrio, ya que ofrece una protección adecuada de la orilla sin incurrir en gastos excesivos al colocar estructuras adicionales.



Figura. 31. Líneas de apoyo para la definición de los deflectores representadas en ArcGIS. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, utilizando el editor de RAS Mapper, se han establecido formas superpuestas a las líneas. Esta metodología se ha adoptado porque facilita y agiliza la edición de los polígonos en tiempo real, en lugar de tener que editar en ArcGIS y exportar cada vez. El resultado que se obtiene en este punto son líneas superpuestas que simulan los deflectores con la separación y ángulo deseados.

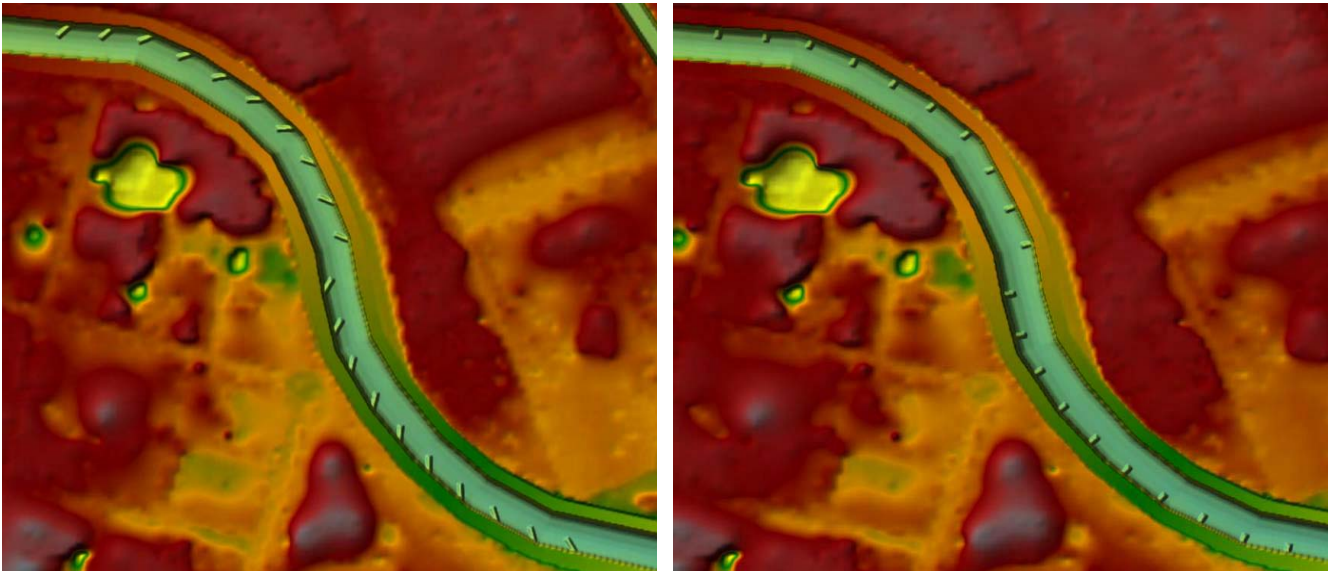


Figura. 32. Posición, distancia y ángulos definidos para los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) incorporados en el MDT. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la longitud real de los deflectores, se debería utilizar la longitud teórica indicada en la tabla 8. Sin embargo, para mejorar la interpretación visual de los resultados, se ha extendido la longitud hasta alcanzar aproximadamente 1m más. Finalmente, se

deben fijar las cotas de los deflectores. Para ello, se toma la cota inferior a la que se le ha sumado 0,7m en la parte más distal y 1,7m en la parte cercana al muro, respetando así las cotas de dimensionamiento previamente establecidas (figura 33).

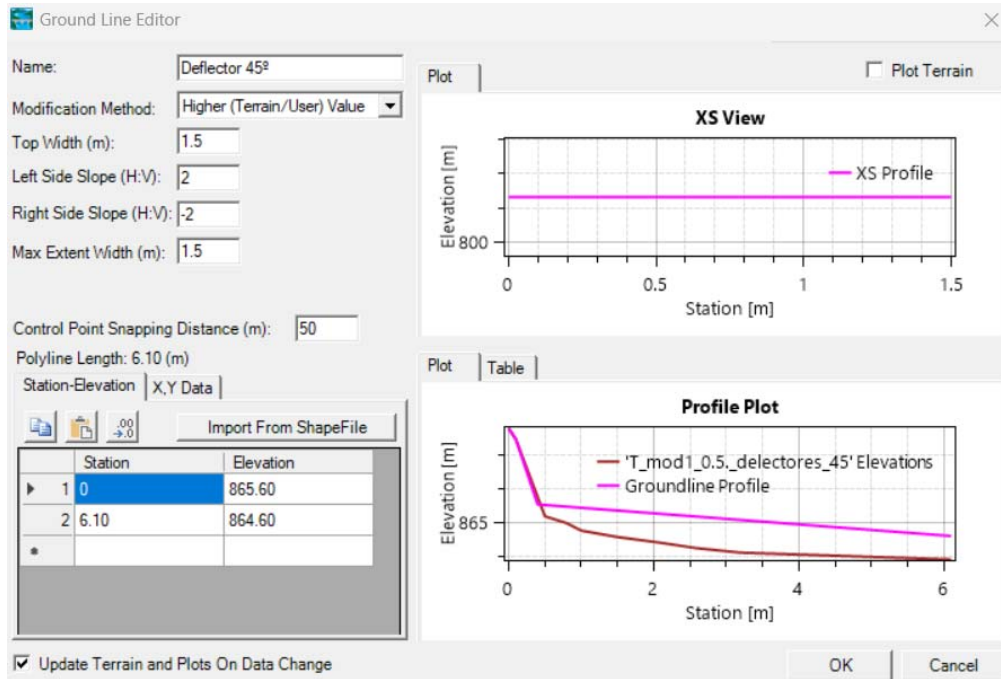


Figura. 33. Editor de las características de los deflectores incorporados (Altura del deflector, longitud y ancho).  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, mediante la visualización en 3D de HEC-RAS se verifica si los deflectores se han incorporado correctamente. Tras lo anterior, se procede a crear un nuevo MDT con las estructuras incorporadas y ya se puede proceder a realizar la simulación correspondiente (figura 34).

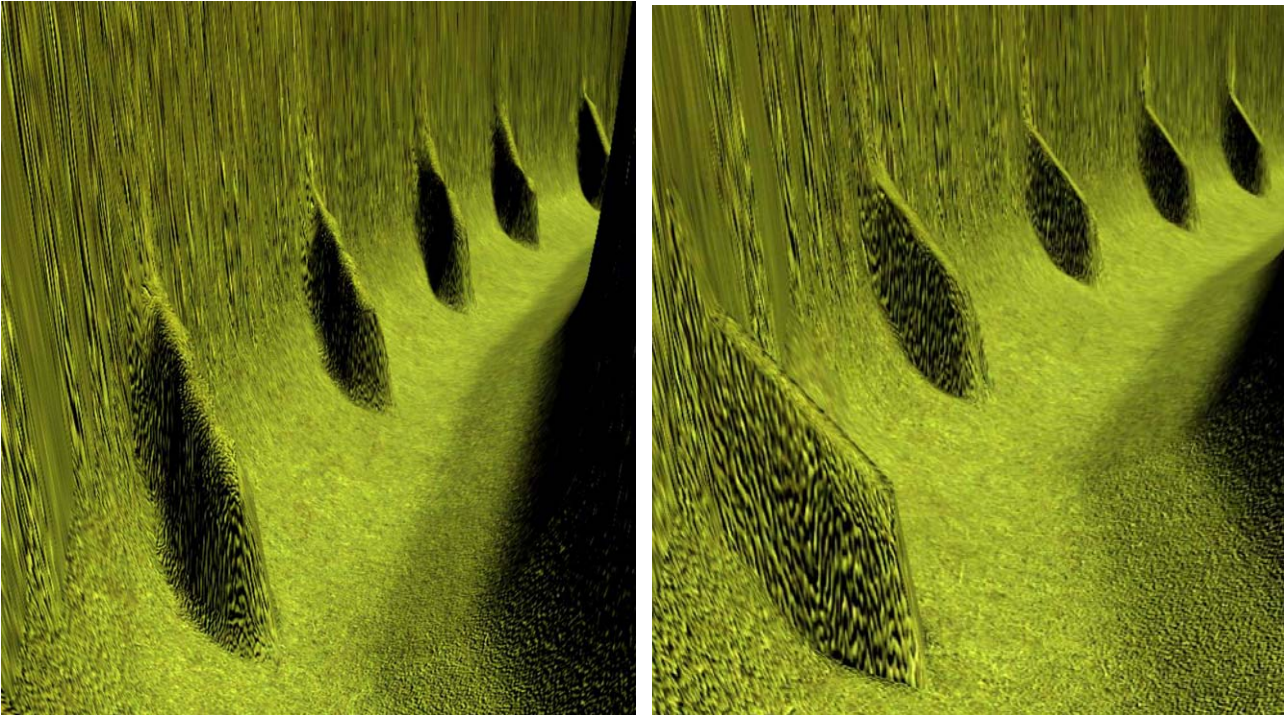


Figura. 34. Resultados en 3D de la incorporación de los deflectores de 45° (izquierda) y 90° (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

## 2. Preparación del modelo para las hipótesis B1 y B2

La metodología para incorporar las estructuras del tramo B es similar a las del tramo A. Lo primero es realizar la guía en ArcGIS (figura 35)

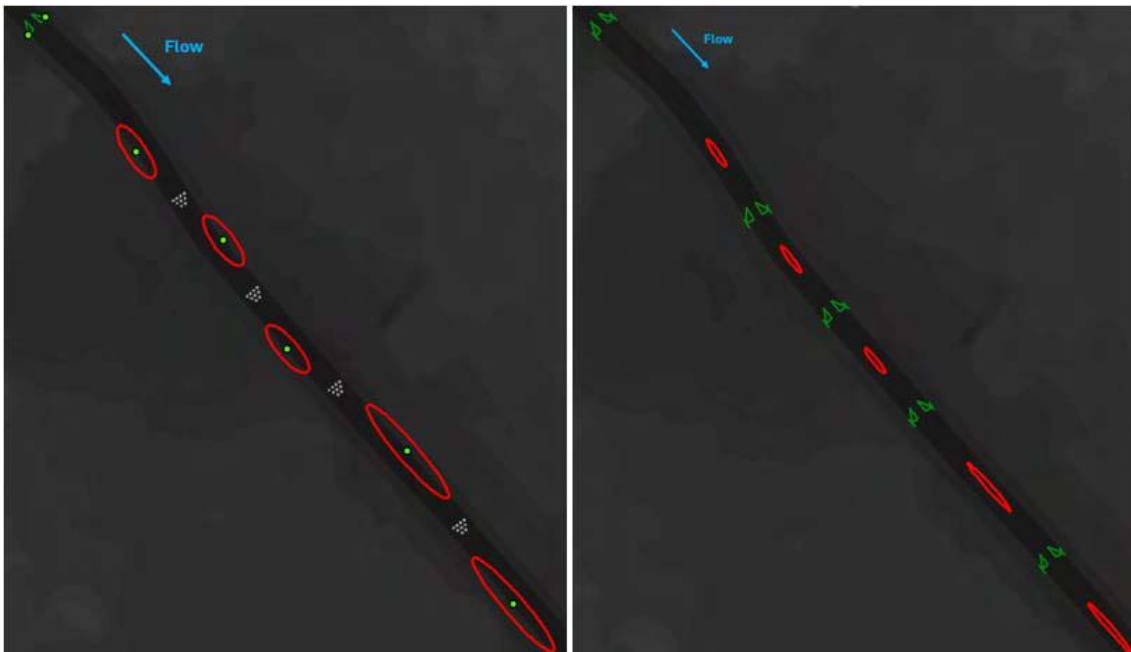


Figura. 35. Líneas de apoyo para la definición de las estructuras correspondientes a la hipótesis B1 (izq.) y B2 (drcha.) Islas fluviales y barras laterales (rojo), rampas centradoras (verde) e hileras de rocas (blanco). Fuente: Elaboración propia en ArcGIS

Tanto para las barras laterales como para las islas (fig. rojas) se han usado polígonos

elipsoidales con los tamaños correspondientes especificados en el apartado 5.4.3\*\* de dimensionamiento. En el caso de la barra lateral solo se utiliza la mitad de la elipse. La rampa centradora (fig. verde) sigue el mismo procedimiento que el de los deflectores del tramo A. Por último, las hileras de rocas (fig. blanca) se han introducido como polígonos circulares. Estas líneas se han exportado de ArcGIS e importado en HEC-RAS. Mediante la herramienta Ras-Mapper se han superpuesto polígonos sobre las líneas guía y se han asignado las alturas correspondientes a cada técnica. El resultado obtenido es el siguiente:

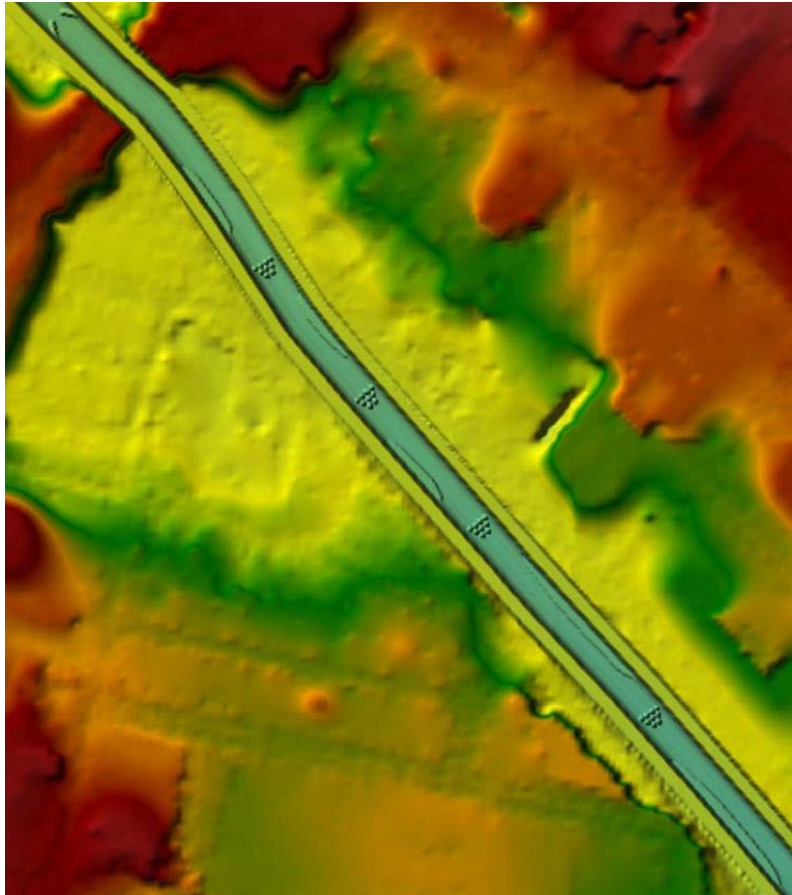


Figura. 36. Técnicas de bioingeniería para la hipótesis B1 incorporados en el MDT. Fuente: Elaboración propia.

\*\*Se realizó una prueba inicial con un tamaño de isla de 30 y 60m. Sin embargo, resultó excesivo ya que prácticamente se produjeron un solape del efecto de las técnicas. Finalmente se han reducido a la mitad, es decir, 15 y 30m

Mediante la visualización en 3D de HEC-RAS se verifica si las estructuras se han incorporado correctamente. Tras lo anterior, se procede a crear un nuevo MDT con las estructuras incorporadas y ya se puede proceder a realizar la simulación correspondiente (figura 37 y 38)

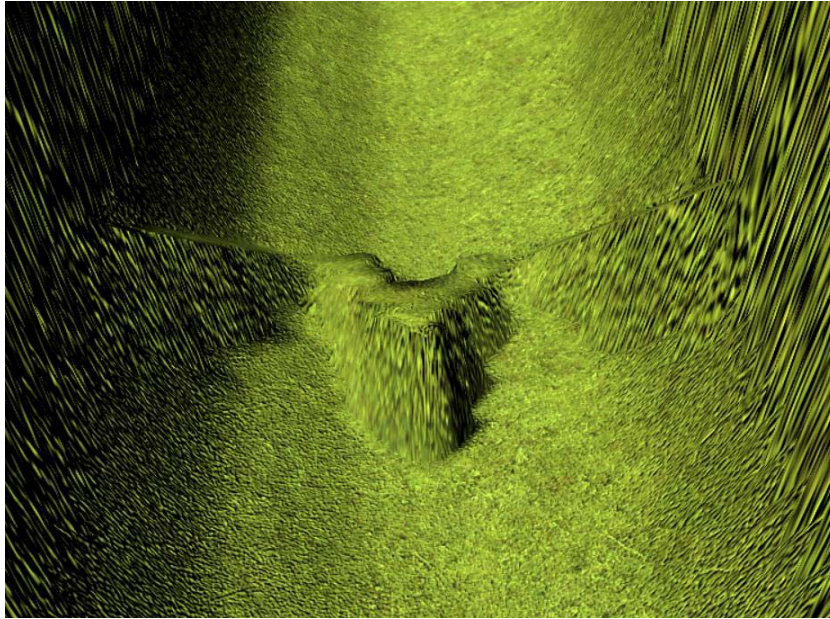


Figura. 37. Resultados en 3D de la incorporación de la doble rampa centradora (zona previa del puente) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

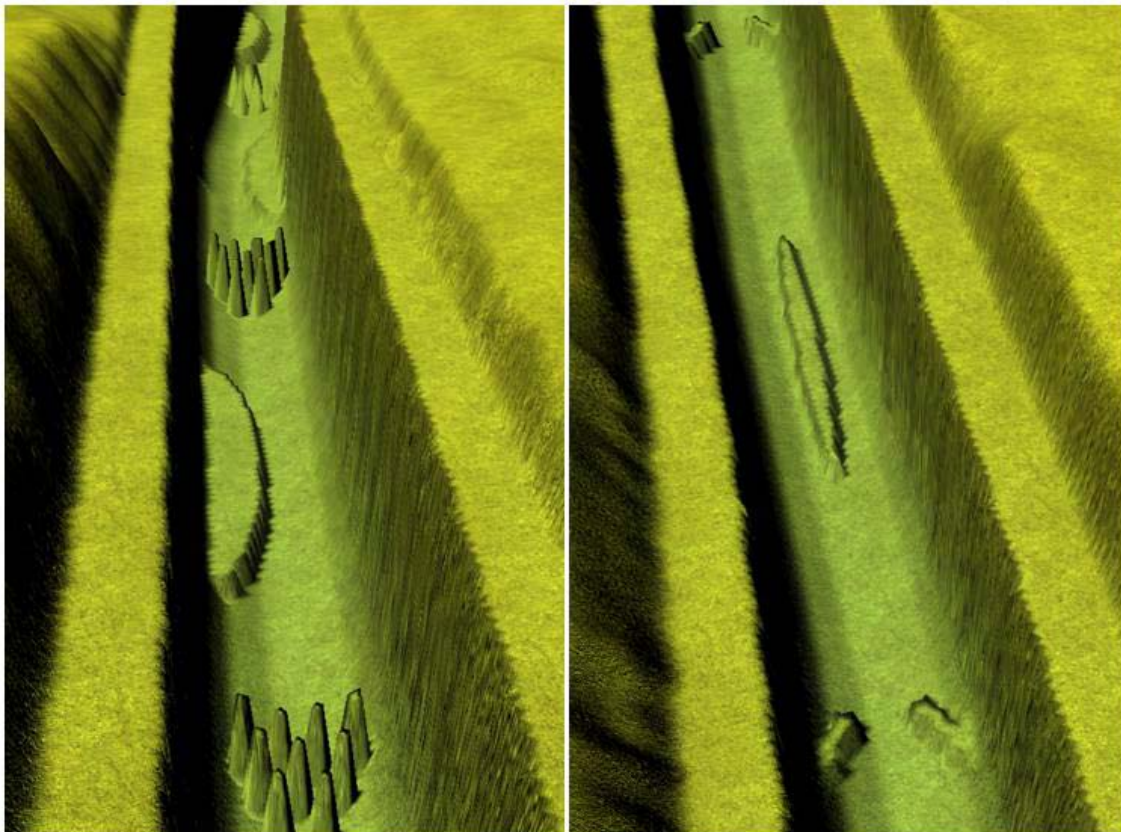


Figura. 38. Resultados en 3D de la incorporación de las técnicas de bioingeniería correspondientes a la hipótesis B1 (izquierda) y B2 (derecha) en el modelo de HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

A primera vista, las hileras de roca en la figura anterior pueden no parecer una representación precisa de la realidad. No obstante, desde un punto de vista hidráulico, tienen el mismo efecto, como se demostrará posteriormente.

---

## ANEXO 6. MODELIZACIONES

---

*Tabla resumen de las modelizaciones*

La siguiente tabla muestra todas las modelizaciones realizadas con éxito. Suman un total de 48 modelizaciones.

RESUMEN DE LAS MODELIZACIONES REALIZADAS													
Caudales Mod/sustrato	Q <sub>50</sub>			Q <sub>5</sub>			T2			T10			SWE-ELM Q5
	A	V	H	A	V	H	A	V	H	A	V	H	ARENA
Mod0			X			X			X			X	
Mod1	X	X		X	X		X	X		X	X		
Mod2	X	X		X	X		X	X		X			X
Mod3	X	X		X	X		X	X		X	X		X
Mod4	X	X		X	X		X	X		X			X
Mod5	X	X		X	X		X	X		X			X

Mod0 = Situación actual con un canal hormigonado

A = Arena

Mod1 = Situación sin cauce de aguas bajas ni estructuras

V = Vegetación

Mod2 = Situación en la hipótesis A1

H = Hormigón

Mod3 = Situación en la hipótesis A2

Mod4 = Situación en la hipótesis B1

Mod5 = Situación en la hipótesis B2

Los tiempos de simulación para cada caudal son: Para T2 y T10 se aplicará un tiempo de simulación de 24h, para Q<sub>5</sub> de 12h y para Q<sub>50</sub> de 6h.

*Teoría de las Ecuaciones SWE-ELM para Aguas Poco Profundas:*

Las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) combinadas con el método de mínimos cuadrados ELM (SWE-ELM) representan una simplificación significativa de las ecuaciones de Navier-Stokes, específicamente diseñadas para describir el flujo de fluidos en escenarios donde la profundidad del agua es considerablemente menor en comparación con la longitud horizontal de la región de interés. Estas ecuaciones son particularmente útiles en la modelización de fenómenos en cuerpos de agua poco profundos, como lagos costeros.

El movimiento del agua es un fenómeno complejo que puede ser modelado en dos o tres dimensiones (2D o 3D). En la modelización 2D, se consideran dos componentes

horizontales de la velocidad ( $x$  e  $y$ ). En contraste, la modelización 3D se aplica a situaciones como la rotura de presas o cascadas. Las modelizaciones 2D emplean frecuentemente las ecuaciones de difusión Wave, las cuales simplifican el problema al desconsiderar la aceleración y basarse en la gravedad y la fricción para simular el flujo del agua de manera eficiente.

Para obtener resultados más precisos en la modelización de aguas poco profundas, se recomienda el uso de las ecuaciones SWE-ELM. Estas ecuaciones consideran las velocidades horizontales ( $x$  e  $y$ ) mientras que desprecian la velocidad vertical, bajo el supuesto de que la lámina de agua es mucho mayor que la profundidad. La hipótesis subyacente es que la velocidad horizontal es constante a cualquier profundidad, permitiendo la eliminación de la componente vertical de la velocidad. Además, las ecuaciones SWE-ELM tienen en cuenta la aceleración (dinámica de olas) y la fricción, lo cual añade complejidad pero proporciona un detalle más fino del comportamiento del agua.

Las ecuaciones SWE-ELM son particularmente útiles en los siguientes escenarios:

- Avenidas: Situaciones donde una ola aumenta significativamente el caudal y luego disminuye, reflejando cambios abruptos en el flujo.
- Contracciones en el canal: Eventos que provocan variaciones en la velocidad del agua debido a cambios en la geometría del canal.
- Ríos planos: Donde la gravedad no es la fuerza primaria, y las velocidades juegan un papel más crucial, como en el caso de pequeñas olas generadas por la perturbación de una piedra en un charco.
- Giros bruscos: Situaciones que requieren un análisis detallado de las velocidades para entender el comportamiento del flujo en curvas pronunciadas.

Las ecuaciones SWE-ELM son una herramienta poderosa para la modelización de aguas poco profundas, y proporcionan un equilibrio entre complejidad y precisión. Al despreciar la velocidad vertical, se simplifica considerablemente el cálculo sin sacrificar la exactitud necesaria para muchos escenarios prácticos. Para casos que requieren una modelización completa, incluyendo la velocidad vertical, sería necesario emplear las ecuaciones SWE-EM, típicamente reservadas para eventos extremos como roturas de presas.

---

## ANEXO 7. RESULTADOS COMPLETOS DE LAS MODELIZACIONES EN EL TRAMO A

---

A continuación se detallan los resultados obtenidos para los caudales propuestos ( $Q_5$ ,  $Q_{50}$ , T2 y T10) en la situación a corto plazo sobre arena. Como se ha observado previamente, en ambas hipótesis, la diferencia de calados obtenida en la situación a corto plazo (sustrato de arenas) como de la futura (con vegetación), no presenta un cambio significativo. Por consiguiente, el factor más limitante identificado es la velocidad. Por esta razón, se presentan exclusivamente los resultados a corto plazo, a pesar de que se han realizado también las modelizaciones para la situación futura con vegetación.

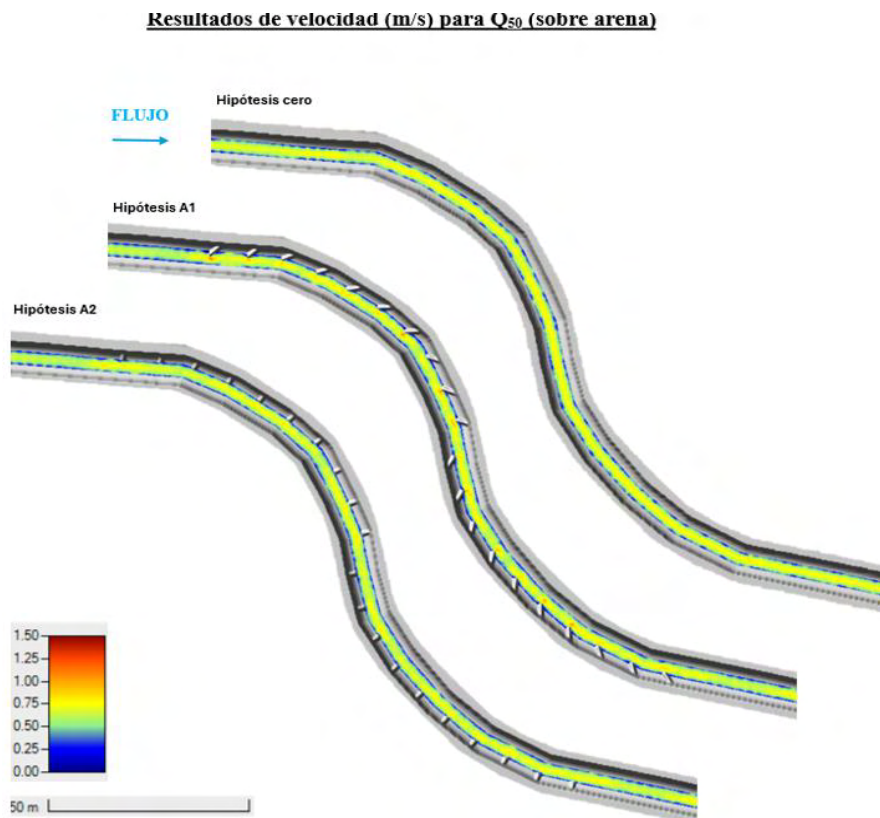


Figura. 39. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal  $Q_{50}$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados de velocidad (m/s) para  $Q_5$  (sobre arena)**

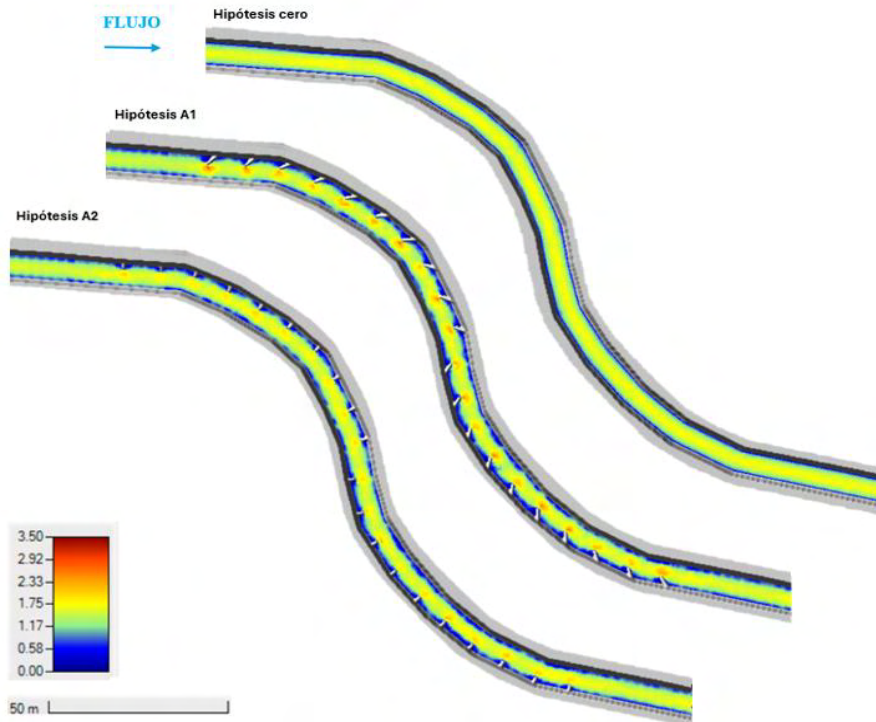


Figura. 40. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados de velocidad (m/s) para T2 (sobre arena)**

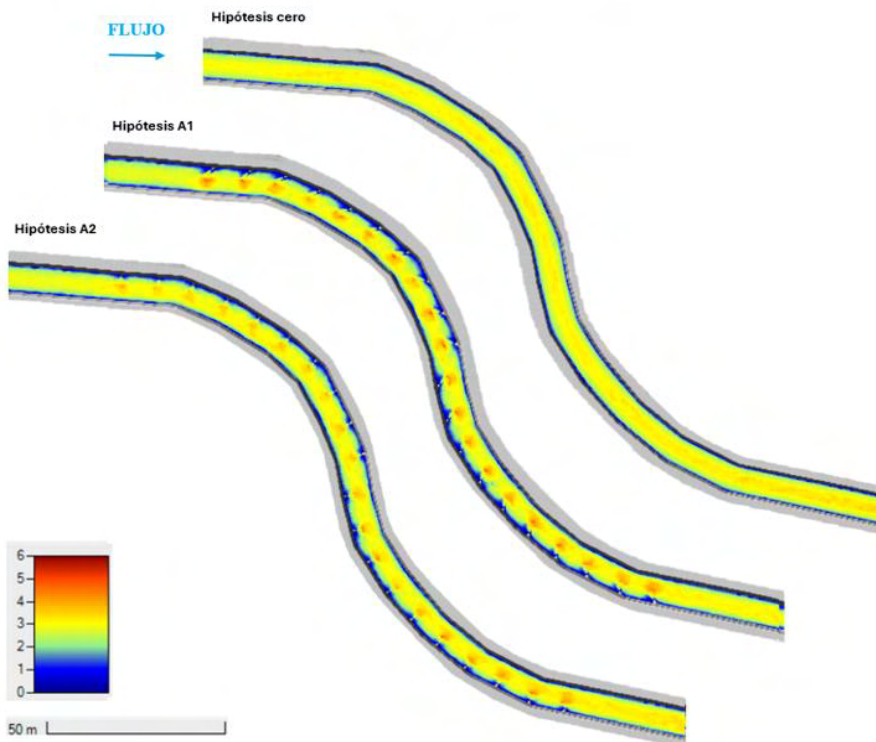


Figura. 41. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

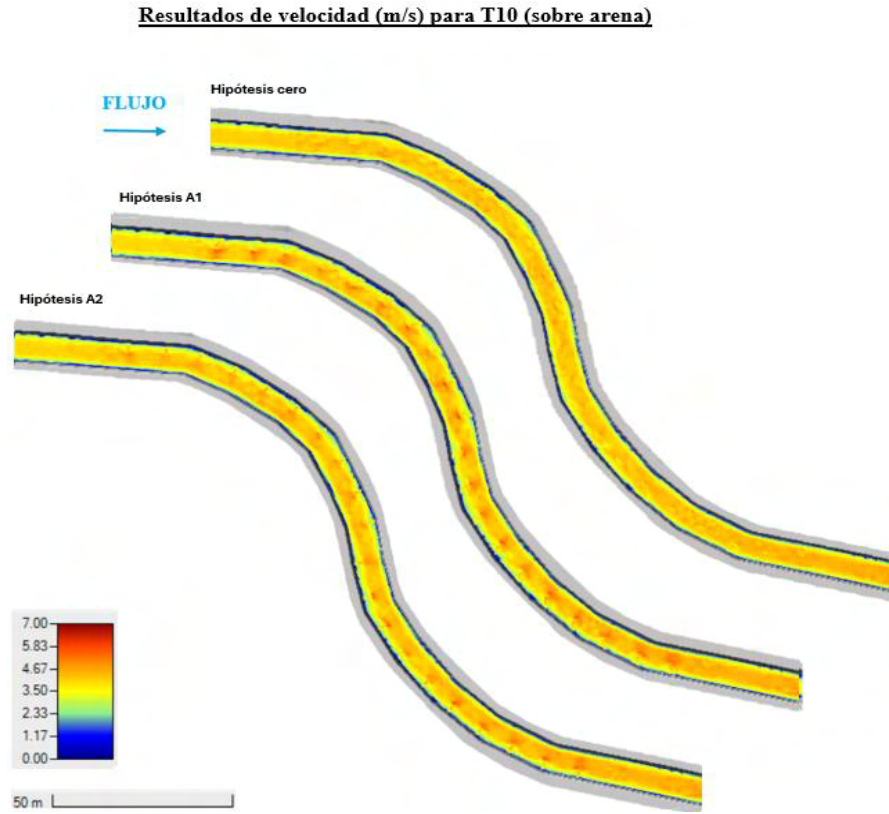


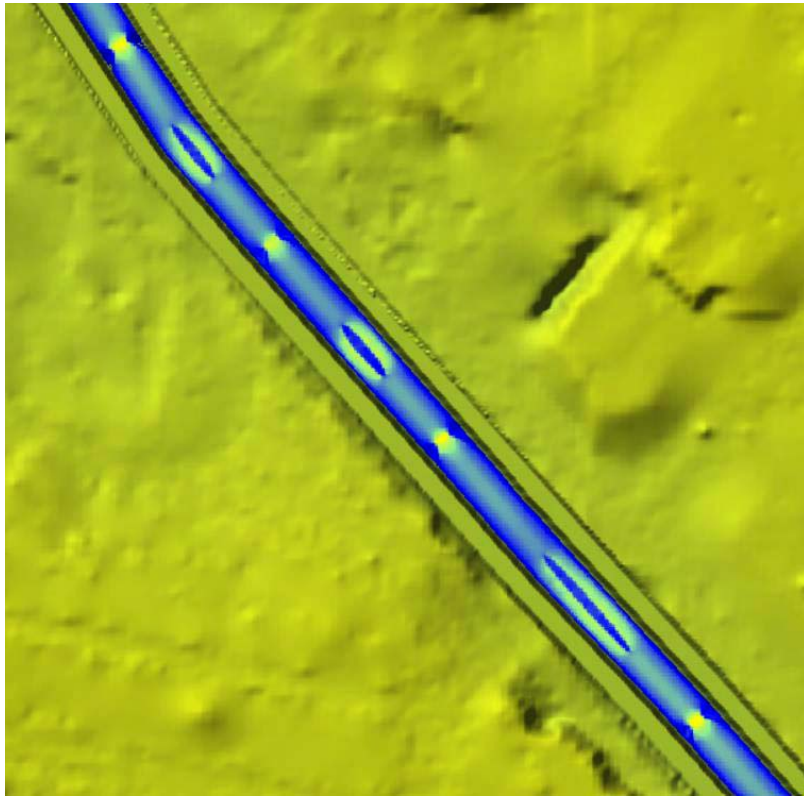
Figura. 42. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona A) para un caudal T10 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

---

## ANEXO 8. RESULTADOS COMPLETOS DE LAS MODELIZACIONES EN EL TRAMO B

---

La primera propuesta del tramo B2 consiste en establecer islas fluviales centralizadas combinadas con rampas centradoras. El resultado es un flujo con un aspecto simétrico y poco natural. El flujo se centraliza y se divide en dos corrientes de manera constante y uniforme. La solución que se ha aplicado en la hipótesis B2 es situar las islas fluviales de forma alterna en los tercios más cercanos a las márgenes y alguna isla fluvial centrada en el cauce.



*Figura. 43. Resultado del patrón de flujo de la primera modelización de la hipótesis B2 en la cual todas las islas fluviales están en el centro del cauce. Fuente: Elaboración propia.*

A continuación se detallan los resultados obtenidos para los caudales propuestos ( $Q_5$ ,  $Q_{50}$ , T2 y T10) en la situación a corto plazo sobre arena. Como se ha observado previamente, el calado resultante tanto de la situación a corto plazo como de la futura, donde se establece la vegetación, no presenta un cambio significativo. Por consiguiente, el factor más limitante identificado es la velocidad. Por esta razón, se presentan exclusivamente los resultados sobre arena, a pesar de haberse realizado también las modelizaciones para la situación futura con vegetación.

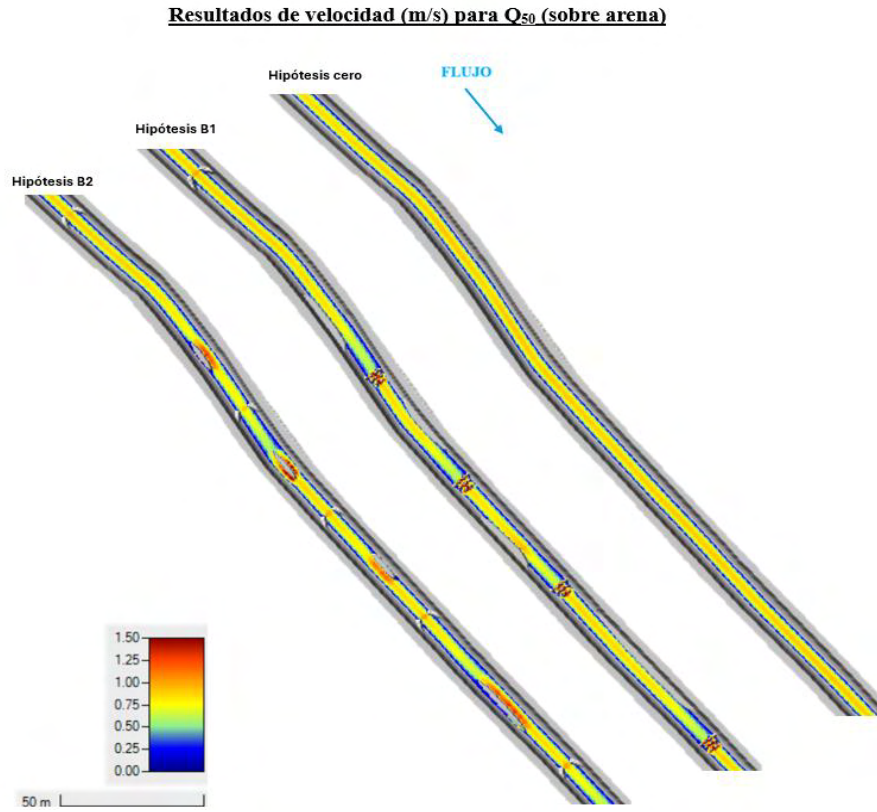


Figura. 44. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal  $Q_{50}$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados de velocidad (m/s) para  $Q_5$  (sobre arena)**

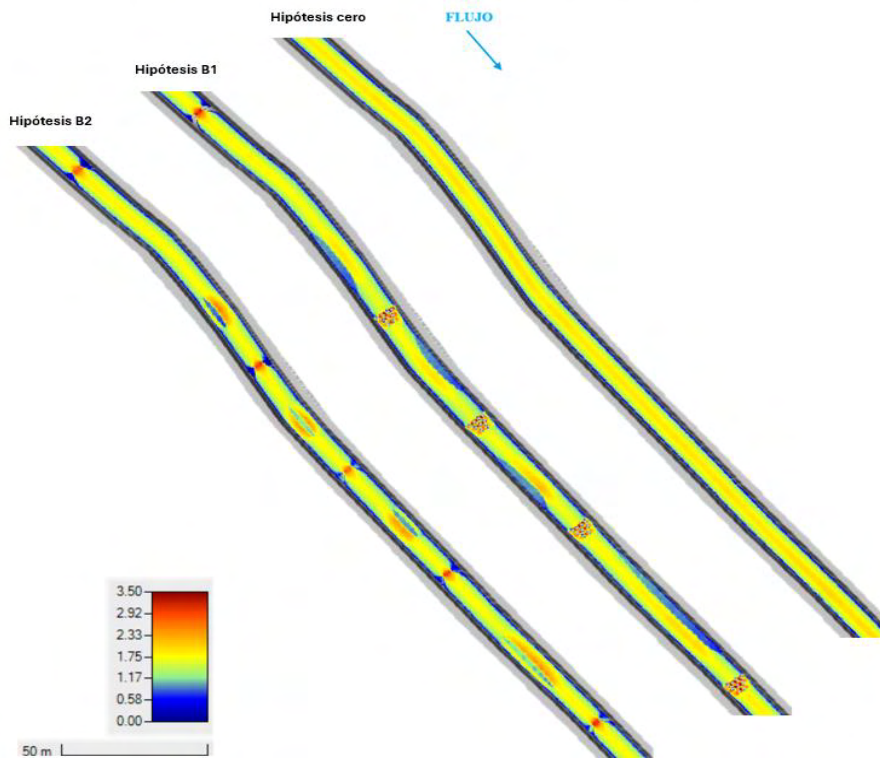


Figura. 45. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal  $Q_5$  sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados de velocidad (m/s) para T2 (sobre arena)**

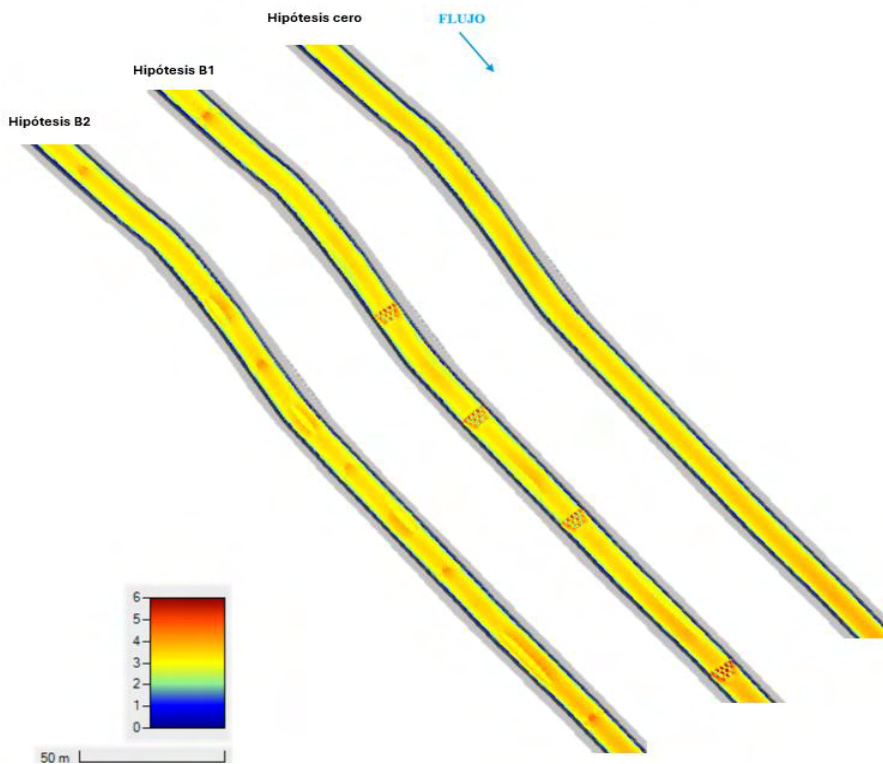


Figura. 46. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal T2 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados de velocidad (m/s) para T10 (sobre arena)**

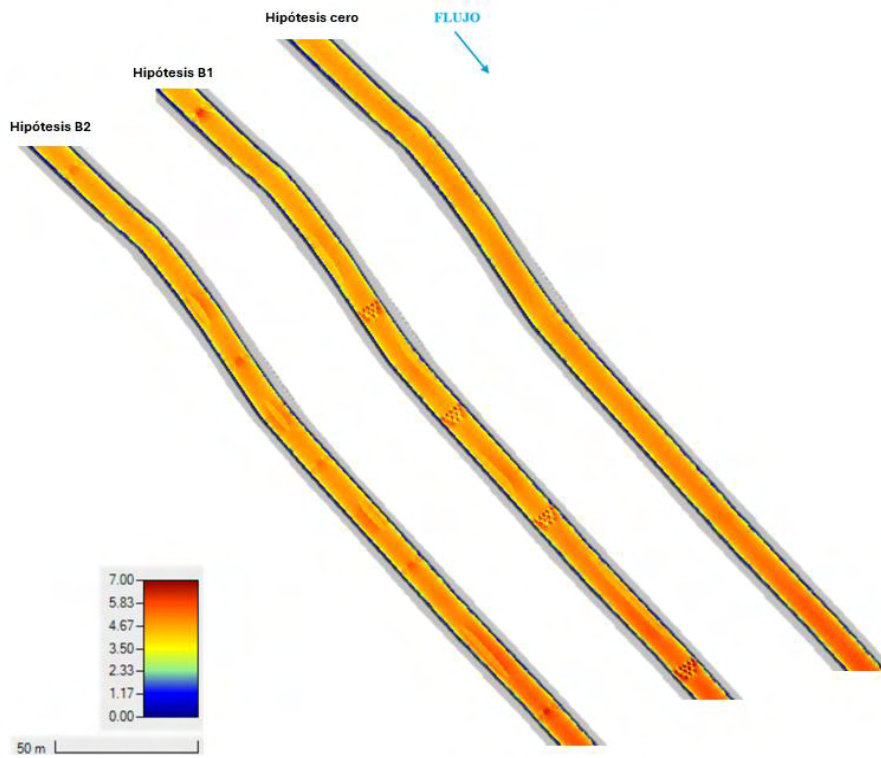


Figura. 47. Representación de la velocidad (m/s) sobre las 3 hipótesis (zona B) para un caudal T10 sobre sustrato de arena. Fuente: Elaboración propia.

---

## ANEXO 9. MONITOREO Y SEGUIMIENTO

---

---

### *Técnicas de monitoreo y seguimiento*

---

En el ámbito de este proyecto las **técnicas que se proponen para la monitorización** de las técnicas de bioingeniería implementadas son las siguientes:

- **Drones:** Esta técnica es un buen sustituto a la teledetección ya que esta última es más eficaz a gran escala. Dado la escasa anchura del cauce y la densa vegetación circundante, los vuelos de drones son particularmente efectivos en este contexto. El uso de drones equipados con cámaras de alta resolución permitirá capturar imágenes detalladas de las estructuras implementadas y sus alrededores. Esto facilitará evaluar cambios en la geometría de las estructuras, la sedimentación aguas arriba y aguas abajo, así como posibles variaciones en la vegetación circundante que podrían afectar el flujo del río. La ventaja del vuelo de dron es que un vuelo único cubre todo el tramo de estudio y la desventaja es que para realizar la monitorización continua requiere de vuelos periódicos. Se recomienda al menos un vuelo antes de la instalación de las estructuras para establecer un punto de partida y luego vuelos regulares, por ejemplo, anualmente, para documentar la evolución del proyecto y evaluar su efectividad a largo plazo
- **Cámaras in situ:** Estas cámaras in situ capturan imágenes y videos que permiten un seguimiento visual directo de los cambios en el entorno fluvial. Estas imágenes permiten observar la dinámica del agua y los efectos locales de las estructuras sobre la sedimentación, la erosión o el desarrollo de la vegetación. La ventaja es que proporcionan un monitoreo continuo útil, lo cual resulta interesante para evaluar resultados post-evento como las avenidas. La desventaja es que su rango de visión es más limitado que el de los drones, por lo que deben colocarse estratégicamente.
- **Mediciones manuales:** Esta técnica proporciona datos directos y detallados sobre los parámetros de interés y se complementa con los datos recopilados por las técnicas automatizadas. Mediante la medición directa se pueden obtener datos tanto de la integridad estructural como sus efectos. Por ejemplo, en el artículo de Hickman, E. L., & Thompson, T. M. (n.d.) se explica que su monitorización se

basa en detectar si la estructura se ha desplazado o desprendido por causa de una tormenta o avenida. Otra comprobación que realizan es si la charca de socavación que es efecto directo de los deflectores tiene una profundidad adecuada, ya que el exceso de profundidad puede provocar una erosión del lecho. La ventaja de esta técnica es que se pueden recoger datos que mediante imágenes resultaría muy complicado, como es en este último caso. La desventaja es que requiere de personal cualificado que realice mediciones de forma regular y que el tiempo para obtener estos datos se incrementa.

- **Estación de monitoreo automatizado:** Para el caso de estudio esta técnica es la menos recomendada debido a su presupuesto y a la limitación de datos visuales. Estas estaciones realizan mediciones continuas y en tiempo real de variables como el caudal, turbidez o calidad del agua entre otros. La ventaja es que la automatización garantiza una recopilación de datos constante y fiable. La desventaja es que las estaciones miden parámetros numéricos y no integran cámaras de visión, lo cual resulta importante para ver los efectos y la durabilidad de las técnicas de bioingeniería.

Existen otras técnicas de monitoreo que no se han contemplado en este proyecto, dadas sus características. En el estudio de Manfreda, S. et al. (2024) se proponen técnicas que incluyen teledetección o participación ciudadana. Sin embargo, se destaca que estas metodologías son susceptibles a perturbaciones significativas. Por ejemplo, las técnicas de imágenes satelitales están sujetas a variables locales como la iluminación, condiciones ambientales, vegetación y características del lecho del río. Por otro lado, la participación ciudadana puede introducir errores, por lo que se resalta la necesidad de establecer un riguroso protocolo de procesamiento de datos para validar la precisión de la información recopilada.