

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Civil

Estudio morfodinámico del río Genil aguas abajo de la presa de Cordobilla

Autor: Álvaro Moreno Mirallas

Tutor: Antonio Ruiz Reina

**Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de
Fluidos**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Civil

Estudio morfodinámico del río Genil aguas abajo de la presa de Cordobilla

Autor:

Álvaro Moreno Mirallas

Tutor:

Antonio Ruiz Reina

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Carrera: Estudio morfodinámico del río Genil aguas abajo de la presa de Cordobilla

Autor: Álvaro Moreno Mirallas

Tutor: Antonio Ruiz Reina

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Mi mayor agradecimiento solo puede ir dirigido a mis padres. Gracias de verdad, porque la vuestra es una aportación imprescindible para que yo haya podido finalizar mi carrera. Me habéis permitido estudiar lo que me gusta y, lo más importante, habéis sido pacientes. Con cada caída me habéis ayudado a levantarme y habéis comprendido la dificultad que me ha supuesto cada examen y cada curso. Nunca habéis dicho una mala palabra o puesto una mala cara ante un suspenso. Al contrario, me habéis alentado a seguir y me habéis ayudado a levantarme. Por supuesto, habéis estado también en las buenas situaciones y habéis celebrado cada pequeño aprobado como una gran victoria. No os puedo estar más agradecido.

Gracias a mi hermano, porque el tópico de los hermanos que se llevan mal no es real. El hecho de que hayas escogido un camino similar al mío me hace pensar que tan mal no lo he hecho.

Gracias Sara, que me has soportado cuando más estresado he estado. Me has animado en las peores situaciones y me has apoyado incondicionalmente. En cierto modo, esta carrera la has corrido conmigo, de principio a fin.

Por supuesto, doy las gracias a mis compañeros de batalla. Esta carrera sería mucho más difícil sin el compañerismo que he encontrado: desde compañeros de clase, hasta los que he llegado a considerar mis grandes amigos. Sin duda, el apoyo mutuo que nos damos hace el camino más llevadero.

Gracias Antonio por tu tutela en este trabajo, por estar siempre dispuesto y disponible. Por dar lo mejor de ti en cada clase e intentar mejorar las mismas constantemente.

Y, por último, a aquellos profesores que también han despertado en mí una ilusión por la carrera, que por momentos parecía desvanecerse. Profesores como ellos hacen que el esfuerzo valga la pena y que te sientas en el camino correcto.

Resumen

El problema de la colmatación en embalses está cada vez más presente en la obra civil. En primer lugar, porque los embalses más antiguos no consideraban dicha situación. Por otro lado, hoy en día es un problema que cada vez es más tenido en cuenta. Un embalse colmatado pierde capacidad de almacenamiento de agua, fin para el que es construido.

El embalse de Cordobilla fue construido para responder a distintas opciones de aprovechamiento. La mayoría de su aportación se destina a regadío y abastecimiento.

Las herramientas informáticas actuales aportan una nueva posibilidad para comprender el transporte de sedimento. Este estudio pretende hacer uso del software HEC-RAS para analizar un caso real de transporte de sedimento. Concretamente, se ha realizado un modelo 1D.

El embalse de Cordobilla se encuentra totalmente colmatado debido a que la presa de Cordobilla no permite el paso de sedimento a través de ella. Debido a esto, el tramo del río Genil aguas abajo de la misma, no recibe aporte ninguno de sedimento. Esta es la primera situación que ha sido simulada en este trabajo.

Por otro lado, en caso de que se realice un dragado del embalse, se ha planteado la posibilidad de verter el sedimento dragado al cauce del río Genil, aguas abajo de la presa. También se emplea HEC-RAS para estudiar la viabilidad de esta actuación. Se han estudiado distintas situaciones, variando los rendimientos de dragado y vertido de sedimento. Se ha buscado una solución que no se alargue en el tiempo y que no tenga un impacto significativo en el comportamiento morfodinámico del tramo estudiado.

Por último, se ha llevado a cabo un estudio de las soluciones que existen actualmente para resolver el problema colmatación en el embalse de Cordobilla a largo plazo. Se ha justificado la elección de una de estas soluciones.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Ecuaciones	xx
1 Introducción	1
2 Situación Actual	3
2.1. Localización y características del embalse	3
2.2. Problemática	4
2.3. Contexto Histórico	5
3 Descripción del modelo	7
3.1 Sobre HEC-RAS	7
3.2 Descripción de los procesos	7
3.3 Geometría del modelo	8
3.3.1 Estructuras	11
3.4 Flujo	19
3.5 Rozamiento del lecho	20
3.6 Materiales del lecho	22
3.7 Aporte de sedimento	27
3.7.1 Rendimientos de aporte de sedimento	29
4 Análisis de los resultados	31
4.1 Caso a)	31
4.2 Caso b)	42
4.2.1 Caso b.1	42
4.2.2 Caso b.2	43
4.2.3 Caso b.3	47
4.2.4 Caso b.4	51
4.2.5 Caso b.5	55
5 Solución teórica para el problema de la colmatación en el embalse de Cordobila	61
5.1 Diferentes soluciones contra la colmatación de embalses	61
5.1.1 Técnicas que minimizan la deposición de sedimento	61
5.1.2 Técnicas que permiten la sedimentación en el embalse	63
5.2 Valoración de alternativas	64
5.3 Flood by-pass para en embalse de Cordobilla	64
6 Conclusiones	67
7 Bibliografía	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del número de Manning.	21
Tabla 2. Curvas granulométricas	23
Tabla 3. Expresiones empleadas para el transporte de sedimento.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Embalse de Cordobilla.	3
Figura 2. Presa de Cordobilla.	4
Figura 3. Embalse de Cordobilla colmatado.	4
Figura 4. Vista aérea del área de estudio.	8
Figura 5. Modelo del terreno	9
Figura 6. Trazado del Eje, Banks Lines y Flow Paths (2). Detalle.	10
Figura 7. Trazado del Eje, Banks Lines y Flow Paths (1).	10
Figura 8. Secciones transversales (1).	11
Figura 9. Secciones transversales (2). Detalle.	11
Figura 10. Estructuras.	12
Figura 11. Sección Estructura 1.	13
Figura 12. Modelado de la Estructura 1.	13
Figura 13. Secciones para puentes. Manual del usuario de HEC-RAS.	14
Figura 14. Estructura 2. Puente.	14
Figura 15. Secciones Estructura 2.	15
Figura 16. Modelado de la Estructura 2.	15
Figura 17. Secciones Estructura 3.	16
Figura 18. Modelado Estructura 3.	16
Figura 19. Puente de Miragenil.	17
Figura 20. Secciones Estructura 4	17
Figura 21. Modelado Estructura 4.	18
Figura 22. Estructura 5.	18
Figura 23. Secciones Estructura 6.	19
Figura 24. Introducción del hidrograma.	20
Figura 25. Hidrograma completo de la simulación.	20
Figura 26. Distribución valores de Manning.	21
Figura 27. Introducción de valores del número de Manning por sección.	22
Figura 28. Curvas granulométricas	24
Figura 29. Curva granulométrica: Arcilla Gravosa	25
Figura 30. Introducción de los datos de sedimento.	25
Figura 31. Transporte de sedimento. Condiciones de contorno	28
Figura 32. Configuración de una condición de contorno de entrada de sedimento.	28
Figura 33. Lecho actual.	33
Figura 34. Lecho final. Caliza triturada.	33

Figura 35- Lecho final. Arenisca Triturada	34
Figura 36. Lecho final. Arena Hormigón.	34
Figura 37. Lecho final. Arena arcillosa 2.	35
Figura 38. Lecho final. Arena arcillosa 1.	35
Figura 39. Lecho final. Arcilla Gravosa.	36
Figura 40. Estructura 1. Arena Arcillosa 2.	37
Figura 41. Estructura 1. Arena Arcillosa 1.	37
Figura 42. Estructura 1. Arenisca Triturada.	37
Figura 43. Estructura 1. Arena Hormigón.	37
Figura 44. Estructura 1. Caliza Triturada.	37
Figura 45. Estructura 1. Situación inicial.	37
Figura 46. Estructura 1. Arcilla Gravosa.	38
Figura 47. Estructura 2. Situación inicial.	38
Figura 48. Estructura 2. Caliza Triturada.	38
Figura 49. Estructura 2. Arenisca Triturada.	38
Figura 50. Estructura 2. Arena Hormigón.	38
Figura 51. Estructura 2. Arena Arcillosa 1.	39
Figura 52. Estructura 2. Arena Arcillosa 2.	39
Figura 53. Estructura 2. Arcilla Gravosa.	39
Figura 54. Estructuras 3 y 4. Situación inicial.	40
Figura 55. Estructuras 3 y 4. Caliza Triturada.	40
Figura 56. Estructuras 3 y 4. Arena Hormigón.	40
Figura 57. Estructuras 3 y 4. Arena Triturada.	41
Figura 58. Estructuras 3 y 4. Arena Arcillosa 1.	41
Figura 59. Estructuras 3 y 4. Arena Arcillosa 2.	41
Figura 60. Estructuras 3 y 4. Arcilla Gravosa.	42
Figura 61. Caso b.1. Arriba: Caliza Triturada. /Debajo: Arcilla Gravosa.	43
Figura 62. Caso b.2. Caliza Triturada.	45
Figura 63. Caso b.2. Arcilla Gravosa	45
Figura 64. Caso b.3. Caliza Triturada.	49
Figura 65. Caso b.4. Arcilla Gravosa.	49
Figura 66. Caso b.4. Caliza Triturada.	53
Figura 67. Caso b.4. Arcilla Gravosa.	53
Figura 68. Caso b.5. Caliza Triturada.	57
Figura 69. Caso b.5. Arcilla Gravosa.	57
Figura 70. Esquema Offstream Reservoir.	62
Figura 71. Esquema Flood by pass (1).	62
Figura 72. Esquema Flood by pass (2).	62
Figura 73. Esquema Vent Turbid Density Current.	63

Figura 74. Esquema Sediment Sluicing.	63
Figura 75. Zonas de toma y vertido.	65
Figura 76. Trazado en planta del by-pass.	65
Figura 77. Perfil del terreno para el trazado propuesto.	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de continuidad	7
Ecuación 2. Ecuación de la cantidad de movimiento	7
Ecuación 3. Ecuación de Exner	7
Ecuación 4. Expresión de Ackers-White	26
Ecuación 5. Expresiones de Tofaletti	27
Ecuación 6. Expresión de Meyer-Peter	27

1 INTRODUCCIÓN

El embalse de Cordobilla (Puente Genil, Córdoba) se encuentra en el cauce del río Genil. Actualmente, se encuentra colmatado de forma que ha perdido cerca de la totalidad de su capacidad. Esto supone un gran problema para los distintos agentes cuya principal fuente de recursos hídricos es este embalse.

La colmatación es un problema muy común en embalses que, cada vez, es más tenido en cuenta. Hoy en día es recomendable considerarlo desde la misma concepción de una presa. Sin embargo, las presas antiguas no presentan ninguna solución al paso de sedimento o a la acumulación de este.

Por otro lado, aguas abajo de la presa, el régimen morfodinámico del cauce se ve alterado debido al nulo aporte de sedimento proveniente de aguas arriba de esta. Actualmente existen soluciones que buscan reducir este impacto en el cauce. En España comienzan actualmente a tenerse más en cuenta, aunque aún hay mucho camino por recorrer.

El principal objetivo de este Proyecto de Fin de Carrera es el estudio comparativo de la situación actual del cauce aguas abajo del embalse y una situación hipotética en la que sí exista un aporte de sedimento. Por último, se analiza de forma cualitativa una solución técnica al problema de colmatación a largo plazo en embalses existentes.

2 SITUACIÓN ACTUAL

El problema de la colmatación del embalse de Cordobilla no es actual, sino que cuenta con una larga trayectoria. A pesar de las numerosas peticiones para la solución del problema, nunca se ha abordado el mismo para una solución de largo plazo. Al menos, hasta ahora.

2.1. Localización y características del embalse

El embalse de Cordobilla fue construido en 1953, en el río Genil, a la altura de Puente Genil (el municipio queda aguas abajo de la presa). Perteneció a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (zona de Córdoba).

El embalse tiene una capacidad máxima de 34 Hm³, aunque actualmente se encuentra muy colmatado: la capacidad máxima de este se encuentra muy por abajo de la máxima.

En cuanto a la presa, esta es de gravedad. Su cota sobre coronación es de 218,25 m.s.n.m. y su altura sobre el cauce de 37,5 m. La longitud de la coronación es de 165m.

Los principales usos a los que está destinado el embalse de Cordobilla son: Abastecimiento, Riegos, Electricidad y Caudal Ecológico.



Figura 1. Embalse de Cordobilla.

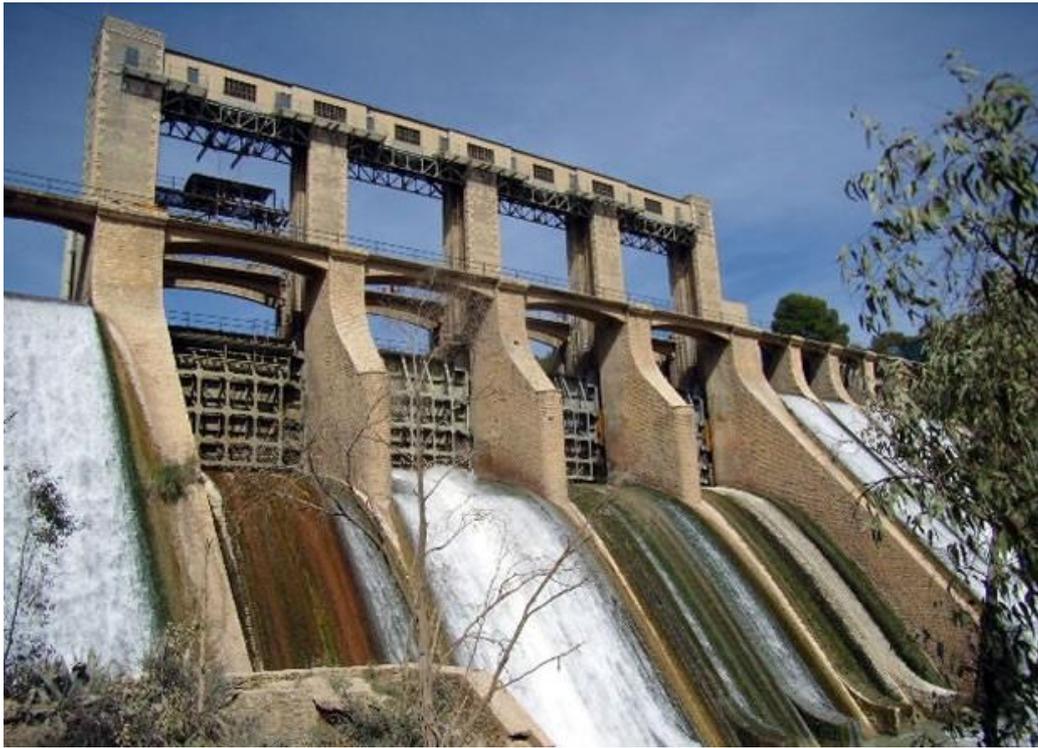


Figura 2. Presa de Cordobilla.

2.2. Problemática

La colmatación del embalse de Cordobilla alcanza casi la totalidad de su capacidad, impidiendo el aprovechamiento adecuado de los recursos hídricos para el que fue ideado. La toma se llevan a cabo por la margen derecha de éste, mediante el canal Genil-Cabra. Actualmente, la colmatación dificulta la toma.



Figura 3. Embalse de Cordobilla colmatado.

2.3. Contexto Histórico

Como ya se ha dicho, el problema de la colmatación del embalse de Cordobilla no es algo reciente. Sin embargo, durante los últimos años ha crecido en importancia al verse su capacidad gravemente reducida.

En 2011 el problema es tal que la Junta de Andalucía propone un plan para solucionar el problema de colmatación. Sin embargo, éste queda paralizado al no contar con la DIA (Declaración de Impacto Ambiental). La obtención de la DIA supondrá mayor demora en el inicio de las obras.

En 2016 se pretende encontrar una solución “definitiva” para un problema que existe desde una década atrás. El cauce se desplaza a su margen izquierda debido a la acumulación de sedimentos y las tomas para el riego están situadas en la margen derecha.

Hasta ahora se realizaban limpiezas constantes del cauce. Sin embargo esto no soluciona el problema. El embalse vuelve a colmarse y no supone una solución eficiente a largo plazo.

Se propone como solución la colocación de un azud que derive el agua necesaria hacia la margen derecha del embalse y distribuirla mediante un canal por este lado.

Las obras no se llevan a cabo y el problema persiste. En 2017, la Asociación de Regantes de Andalucía (Feragua) caracteriza la colmatación del embalse en un 90%. La acumulación de sedimento continúa reduciendo la capacidad útil del embalse. El 29 de noviembre, la colmatación da lugar a inundaciones del río Genil a su paso por Badalatosá.

En 2019 tiene lugar la apertura del proceso de licitación para llevar a cabo la construcción del canal por la margen derecha, prevista para abril del año 2019. Ya en junio, el proyecto recibe la Declaración de Impacto Ambiental. El presupuesto base es de 2,9 millones de euros.

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para llevar a cabo el estudio morfodinámico del cauce del río Genil, aguas abajo de la presa de Cordobilla, se ha hecho uso del *software* HEC-RAS. Se ha realizado un modelo para el que ha sido necesario definir la geometría de este, las características hidráulicas y las características del sedimento.

3.1 Sobre HEC-RAS

HEC-RAS son las siglas de “*Hydrological Engineering Center – River Analysis System*”. Se trata de un *software* desarrollado por el “*Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers*” para la modelización hidráulica de ríos en régimen permanente, régimen no permanente, transporte de sedimentos y calidad del agua.

Permite realizar análisis en 1D y en 2D. En ambos casos, el análisis lo lleva a cabo mediante la resolución de las *ecuaciones de Saint-Venant*. El sistema de ecuaciones de Saint-Venant se compone por las *ecuaciones de continuidad* y la *ecuación de cantidad de movimiento*. Para el caso concreto de un estudio morfodinámico que considere transporte de sedimento, esto se implementa en HEC-RAS en la opción 1D, con flujo “casi-inestable” o “*quasi unsteady*”. Por otro lado, se pretende estudiar un tramo de río, siendo una dimensión más importante que las demás. Por ello, el estudio 1D se considera adecuado. Esta elección se ve reforzada al tener en cuenta que un estudio 1D supone menor tiempo computacional que uno 2D. Ambas expresiones se emplean con la siguiente forma final:

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0$$

Ecuación 1. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Ecuación 2. Ecuación de la cantidad de movimiento

Para el caso que contempla transporte de sedimento, se suma a las anteriores la *expresión de Exner*:

$$(1 - \lambda_b)B \frac{\partial \mu}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

Ecuación 3. Ecuación de Exner

3.2 Descripción de los procesos

Antes de profundizar en la configuración del modelo realizado, es necesario exponer los distintos escenarios que se estudiarán con la finalidad de comparar sus resultados. En primer lugar, se diferencian dos casos principales:

- CASO 1°. Se pretende reflejar en este caso la situación actual en la que no existe aporte de sedimentos aguas abajo de la presa de Cordobilla. Por tanto, a la hora de configurar el modelo, no se definirá ninguna entrada de sedimento, ya que la misma se encuentra impedida debido a la presencia de la presa.
- CASO 2°. Para este caso se considera un aporte de sedimento, proveniente del que conforma la

colmatación del embalse de Cordobilla. Este aporte seguirá un rendimiento previamente establecido. Dicho aporte supone una configuración adicional en el modelo. Se pretende comprobar el impacto que tendría en el cauce, aguas abajo de la presa, el vertido del sedimento.

Por otro lado, tanto para los casos a) y b), se definirán distintas configuraciones en función del tipo de sedimento considerado en el modelo, con el fin de comparar el efecto que tendrán uno u otro tipo.

3.3 Geometría del modelo

En primer lugar, se ha definido la geometría del modelo. Se pretende llevar a cabo un análisis del transporte de sedimento y el análisis se llevará a cabo con caudales bajos (más en profundidad en el **apartado 3.4**). Se ha optado por un análisis en 1D, para el que HEC-RAS se muestra más estable en un estudio de análisis del transporte de sedimento.

Sabiendo esto, el primer paso es la obtención e implementación de un modelo del terreno de la zona de estudio. Como se ha señalado anteriormente, se estudiará un tramo del río Genil, aguas abajo de la presa de Cordobilla. Para llevar a cabo un análisis morfodinámico que presente un alcance suficiente, se estudiará un tramo de casi 35 km de cauce.

El modelo del terreno se compone de dos MDT05 y representan la zona de estudio mostrada en la siguientes figuras de vista aérea y modelo del terreno:

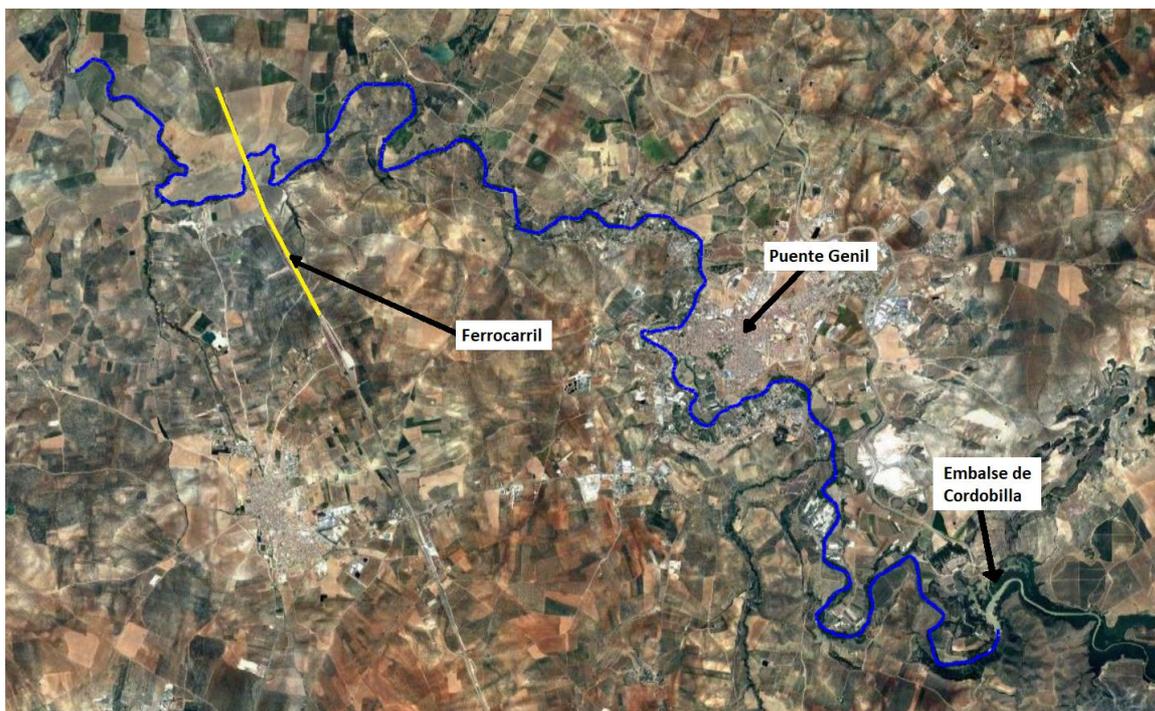


Figura 4. Vista aérea del área de estudio.

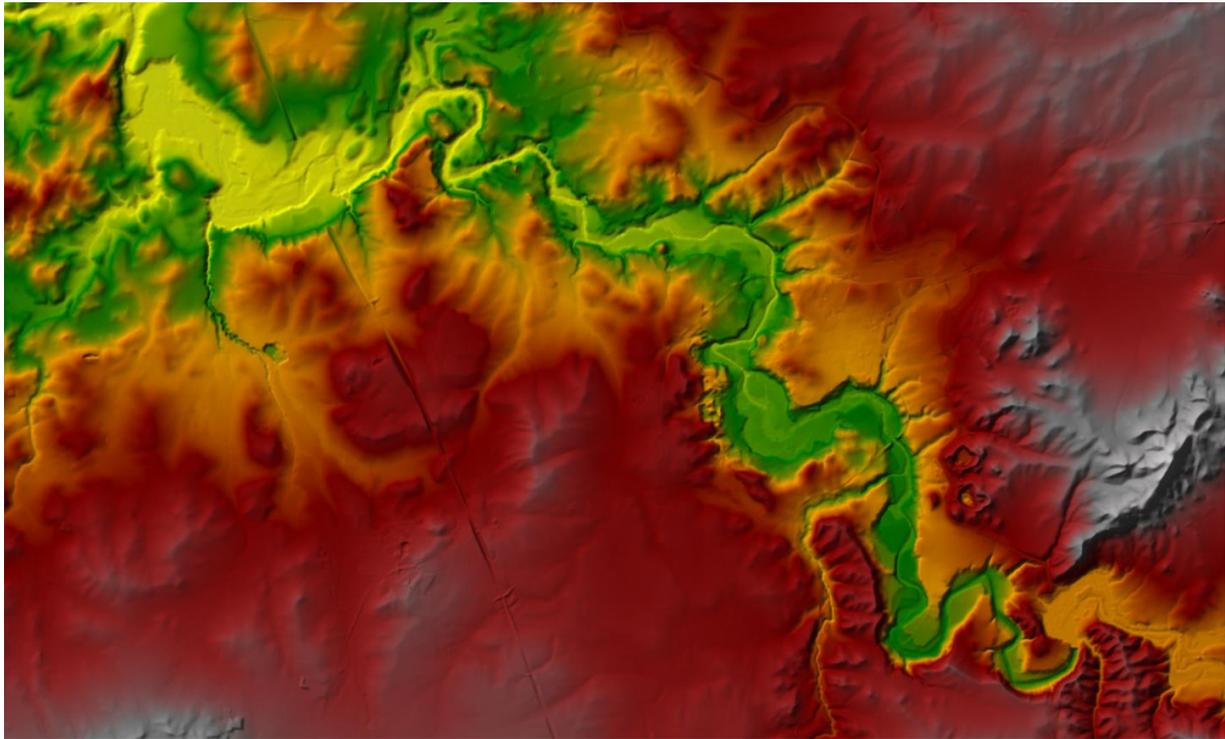


Figura 5. Modelo del terreno

Un modelo 1D de HEC-RAS se compone por 4 elementos principales:

- Eje del cauce.
- Bank Lines.
- Flow Paths.
- Secciones transversales.

El primero de estos elementos, el eje del cauce, consiste en uno o varios segmentos que deben seguir en la medida de lo posible la línea más profunda del cauce. Las Bank Lines son segmentos que, a lo largo de todo el cauce, delimitan la división entre el propio cauce y la llanura de inundación. Debe definirse una Bank Line a cada lado del Eje del cauce. Las Flow Paths delimitan la zona que se prevee que será alcanzada por el agua en caso de inundación. Debe existir una en cada lado del cauce, siempre de forma exterior a las Bank Lines. Estas líneas no deben cruzarse en ningún momento. En las siguientes figuras puede observarse el trazado de estos elementos en el modelo y en un tramo del mismo:

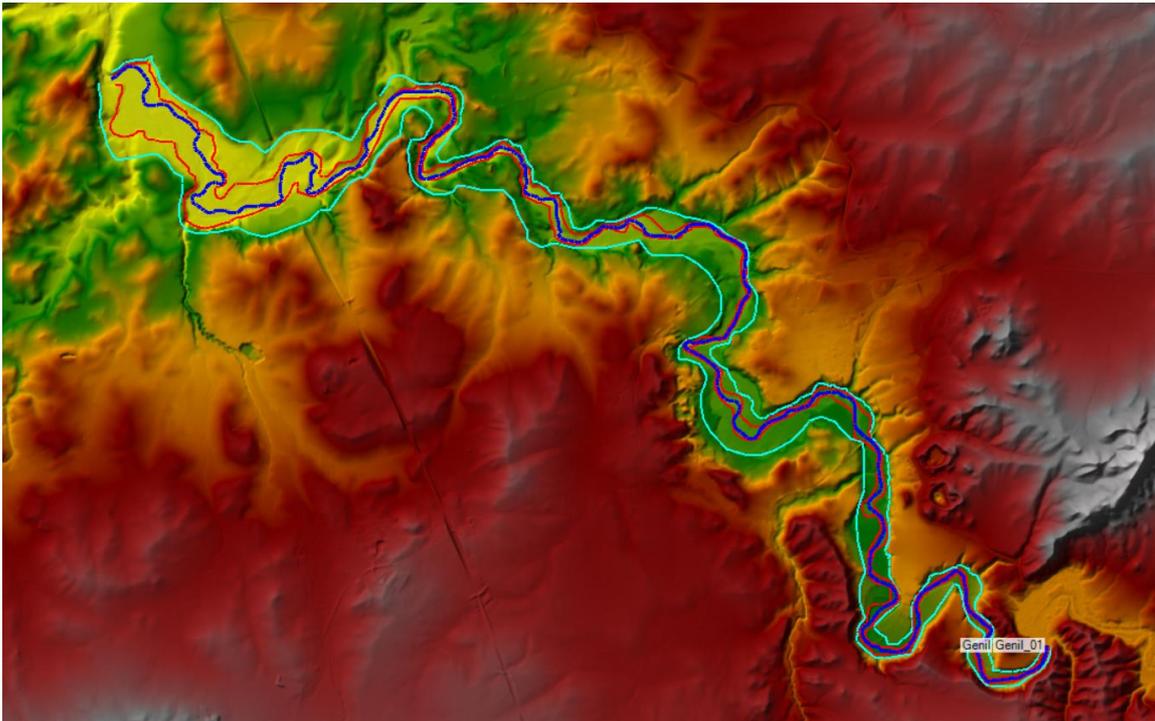


Figura 7. Trazado del Eje, Banks Lines y Flow Paths (1).



Figura 6. Trazado del Eje, Banks Lines y Flow Paths (2). Detalle.

Por otro lado, las secciones transversales son de vital importancia en el modelo 1D. HEC-RAS llevará a cabo los sucesivos cálculos en el modelo en función de estas secciones. Para ello, tomará las distancias que se definan entre sección y sección. Es importante que las secciones corten una única vez cada una de las líneas definidas en este mismo apartado y de forma perpendicular al cauc. Como norma general, se han definido secciones con una distancia entre ellas aproximadamente igual a tres veces la anchura del cauce en cada tramo. No obstante, los tramos que experimenten variaciones bruscas de anchura requieren de una mayor concentración de secciones transversales. Las siguientes figuras muestran la distribución de secciones en el modelo y el detalle de un tramo:

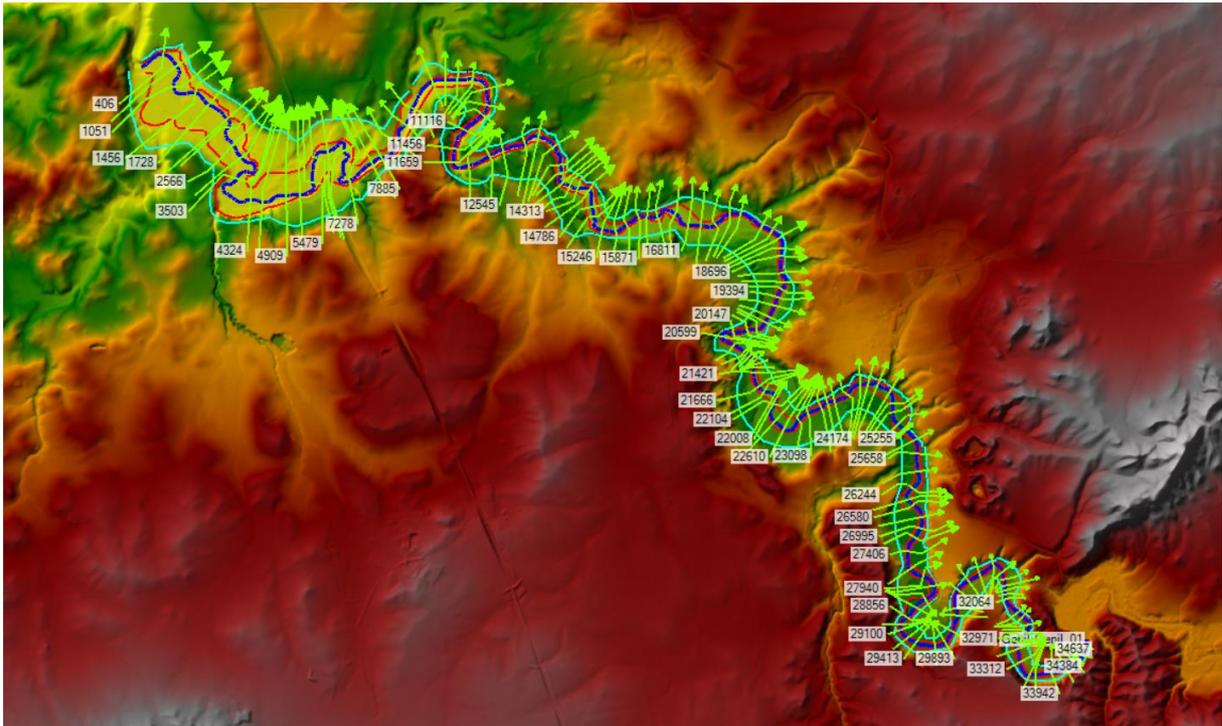


Figura 8. Secciones transversales (1).

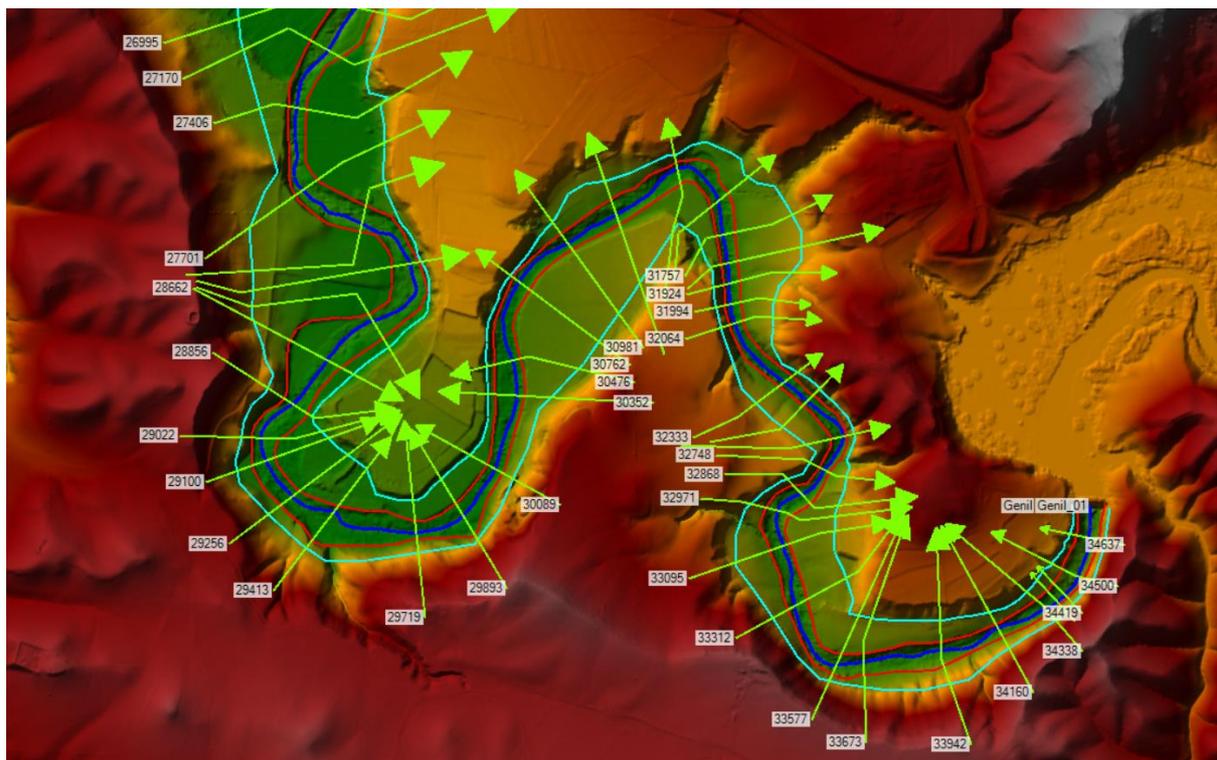


Figura 9. Secciones transversales (2). Detalle.

3.3.1 Estructuras

A lo largo del cauce, en la zona de estudio, existen diversos elementos que influyen directamente en el flujo. Por un lado, la presencia de puentes con pilas que se apoyan directamente dentro del cauce; por otro lado, existen puntos con azudes que influyen también activamente en el curso del agua. Ambos elementos deben ser considerados a la hora de realizar una simulación fiel a la realidad. En la figura 10 se puede ver la localización de estas estructuras.

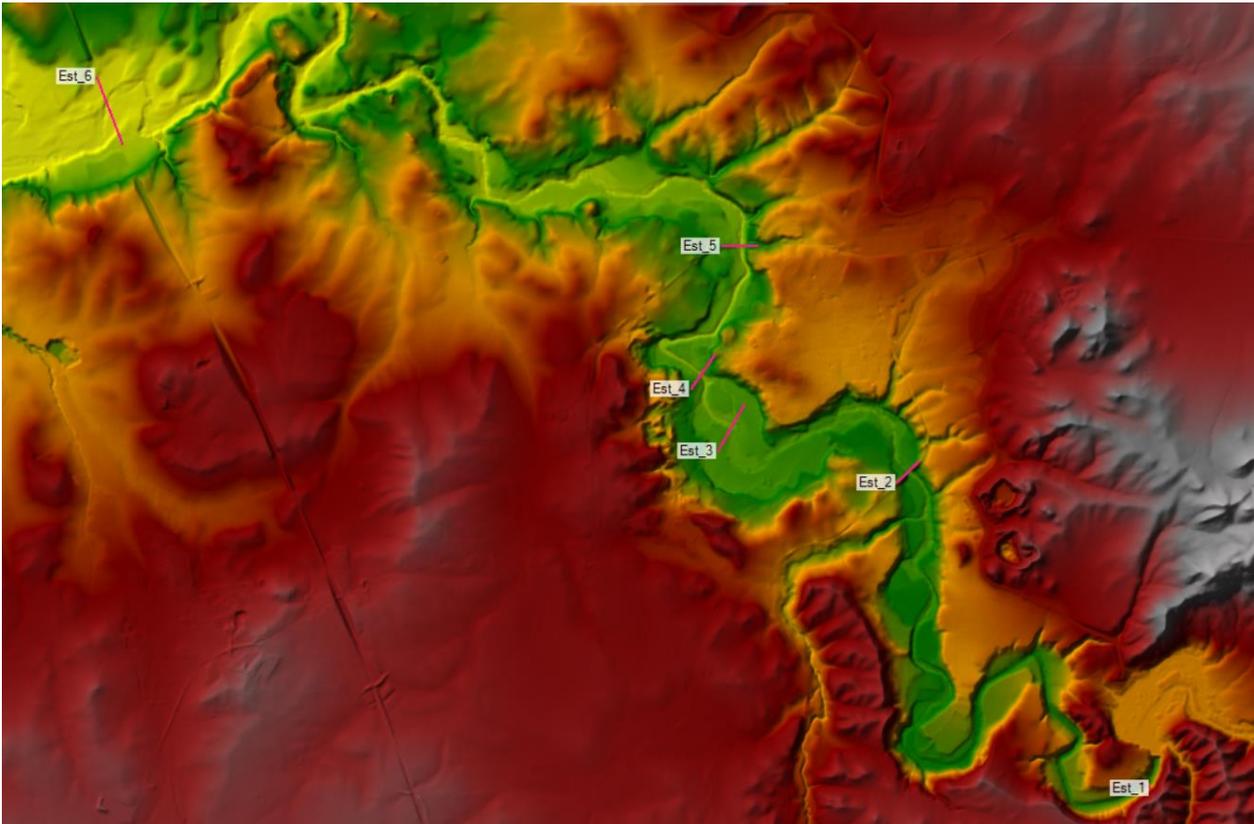


Figura 10. Estructuras.

La introducción de estos elementos en el modelo se realiza de forma particular para cada uno. Su principal diferencia radica en el tipo de estructura de que se trate en cada caso. En la zona de estudio existen dos grupos de estructuras:

- **AZUDES.** Los azudes se incluyen en el modelo mediante el trazado de una sección, a partir de la cual se definen las características geométricas del azud.
- **PUENTES.** Para incorporar los puentes en el modelo es necesario trazar cuatro secciones: dos inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la estructura y otras dos a cierta distancia de las anteriores, de modo que delimiten la distancia desde la estructura hasta el comienzo del cono de estrechamiento del flujo y la distancia entre la estructura y el final del cono de ensanchamiento del flujo.

A continuación, de forma individual, se expone cómo se ha realizado la introducción de cada una de las estructuras en el modelo:

- **Estructura 1:** Azud. Se define la sección 34.419 inmediatamente antes de la localización del azud en el cauce. Tras esto se introducen las características geométricas del azud.



Figura 11. Sección Estructura 1.

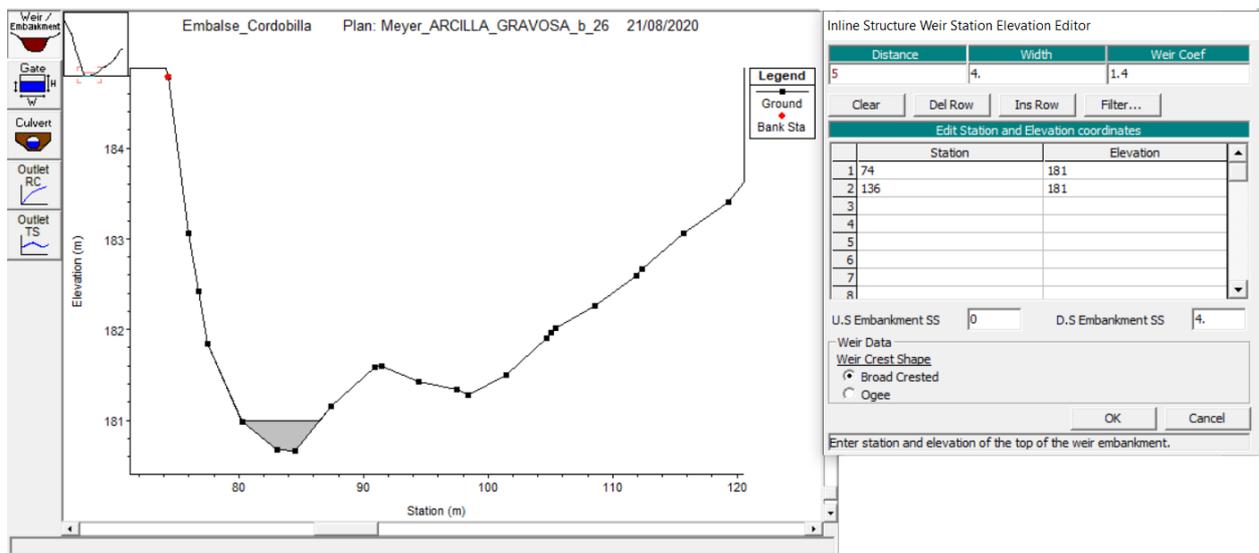


Figura 12. Modelado de la Estructura 1.

- **Estructura 2:** Puente. Para introducir un puente, es necesario definir cuatro secciones diferentes. Dos de ellas deben ser las inmediatamente anterior y posterior al mismo. Las otras dos vienen dadas por la longitud que tienen los conos de contracción y dilatación del flujo, debidos a la presencia del propio puente. El “Manual del usuario de HEC-RAS” define estas secciones:

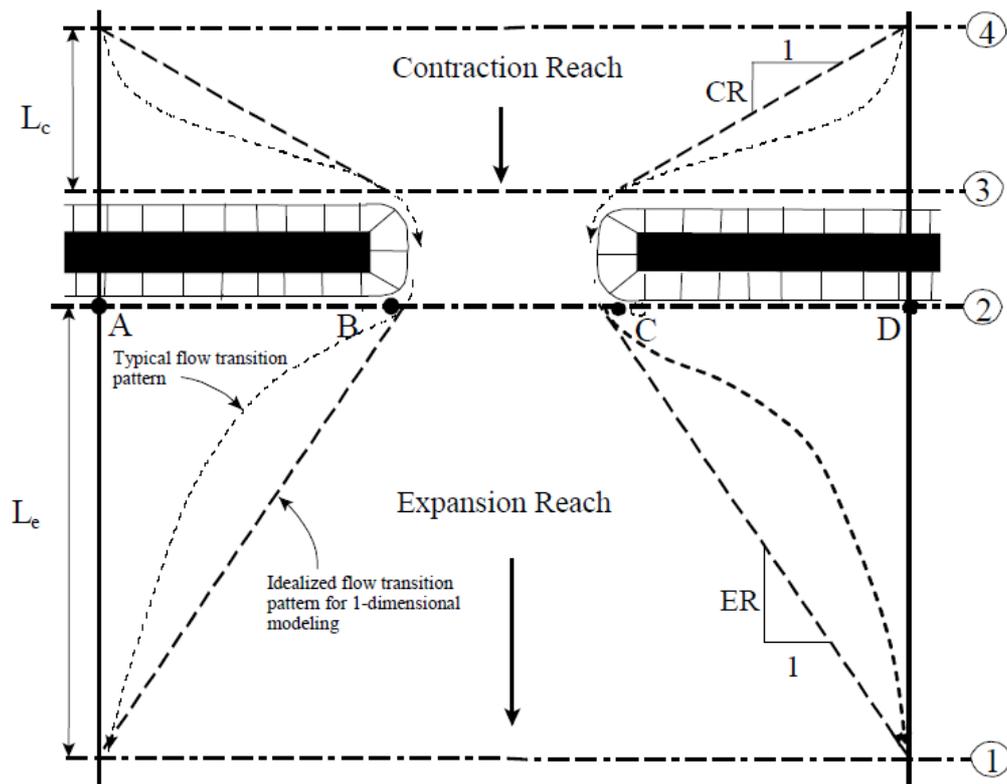


Figura 13. Secciones para puentes. Manual del usuario de HEC-RAS.

Sabiendo esto, para la estructura 2 se han definido las secciones pertinentes y se han introducido las características geométricas del puente en cuestión, de modo que el modelo sea lo más fiel posible a la realidad. El puente cuenta con altas pilas que soportan un tablero metálico.



Figura 14. Estructura 2. Puente.

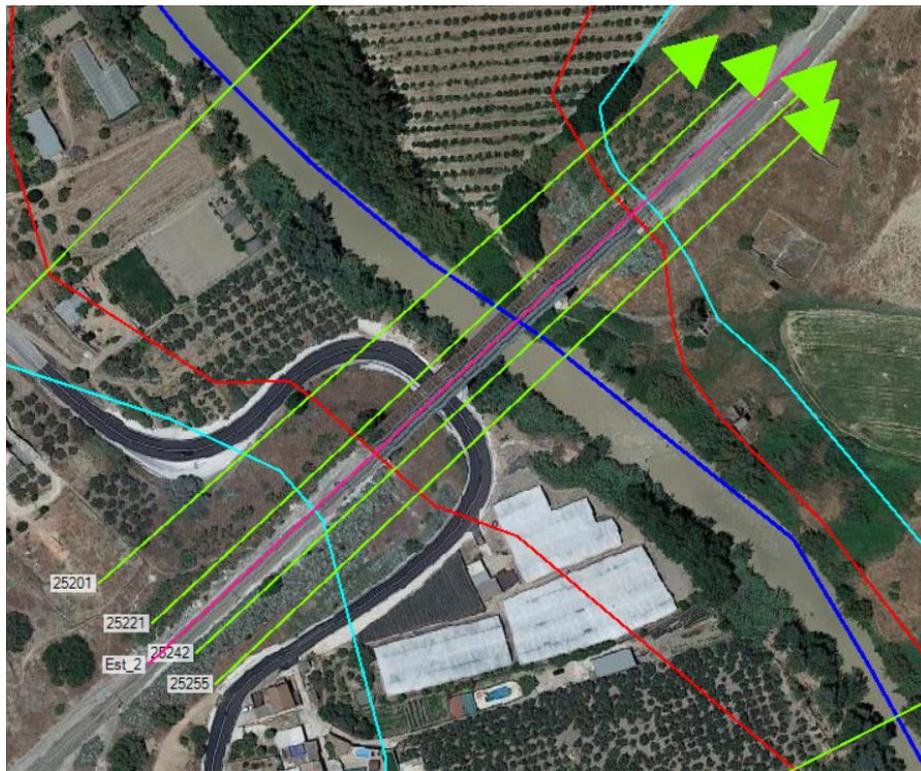


Figura 15. Secciones Estructura 2.

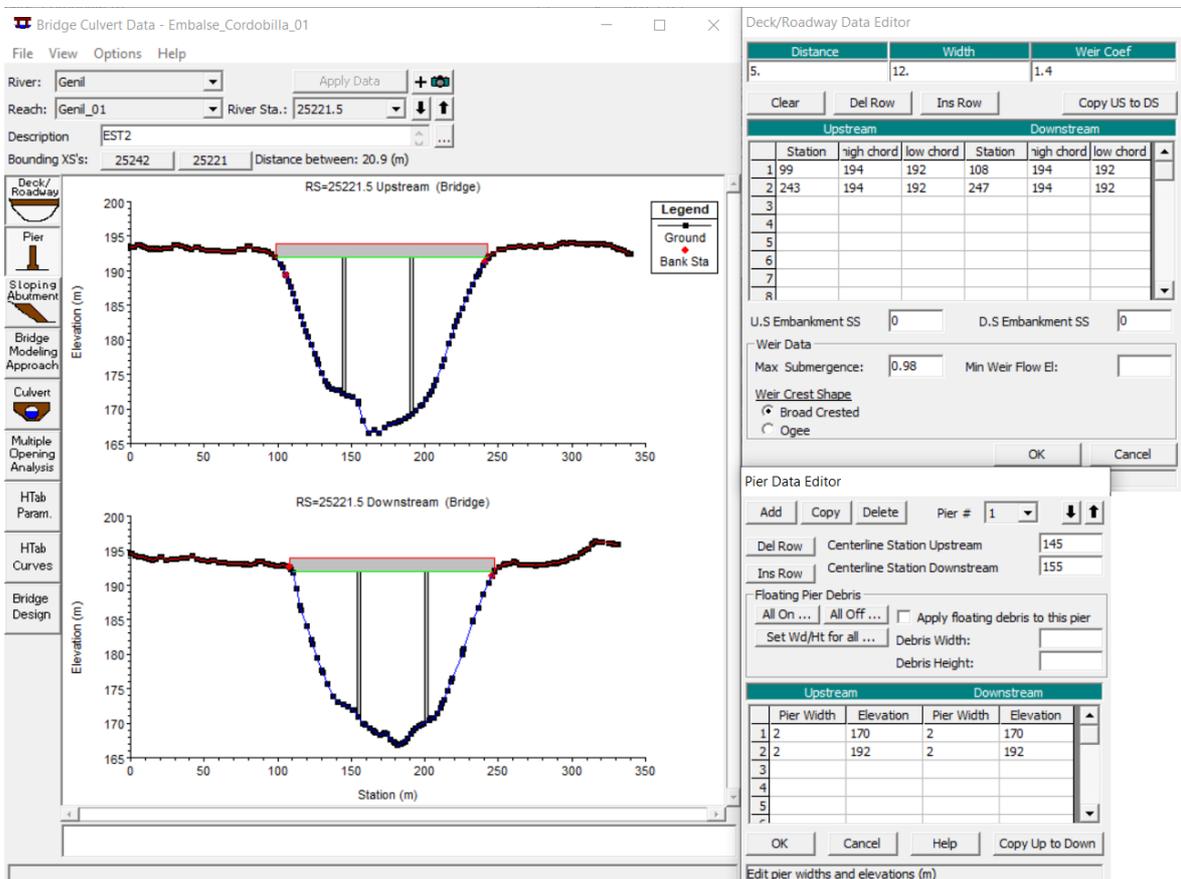


Figura 16. Modelado de la Estructura 2.

- **Estructura 3:** Azud. Este azud se encuentra en pleno meandro y dificulta la colocación de secciones (tanto las normales como las destinadas a definir esta estructura). Debido a esto, algunas secciones se cortarían entre sí. No supone un problema, aunque debe evitarse en la medida de lo posible, ya que en los puntos donde esto ocurra, los resultados se dan duplicados. Sin embargo, en los meandros puede ser complicado evitarlo.



Figura 17. Secciones Estructura 3.

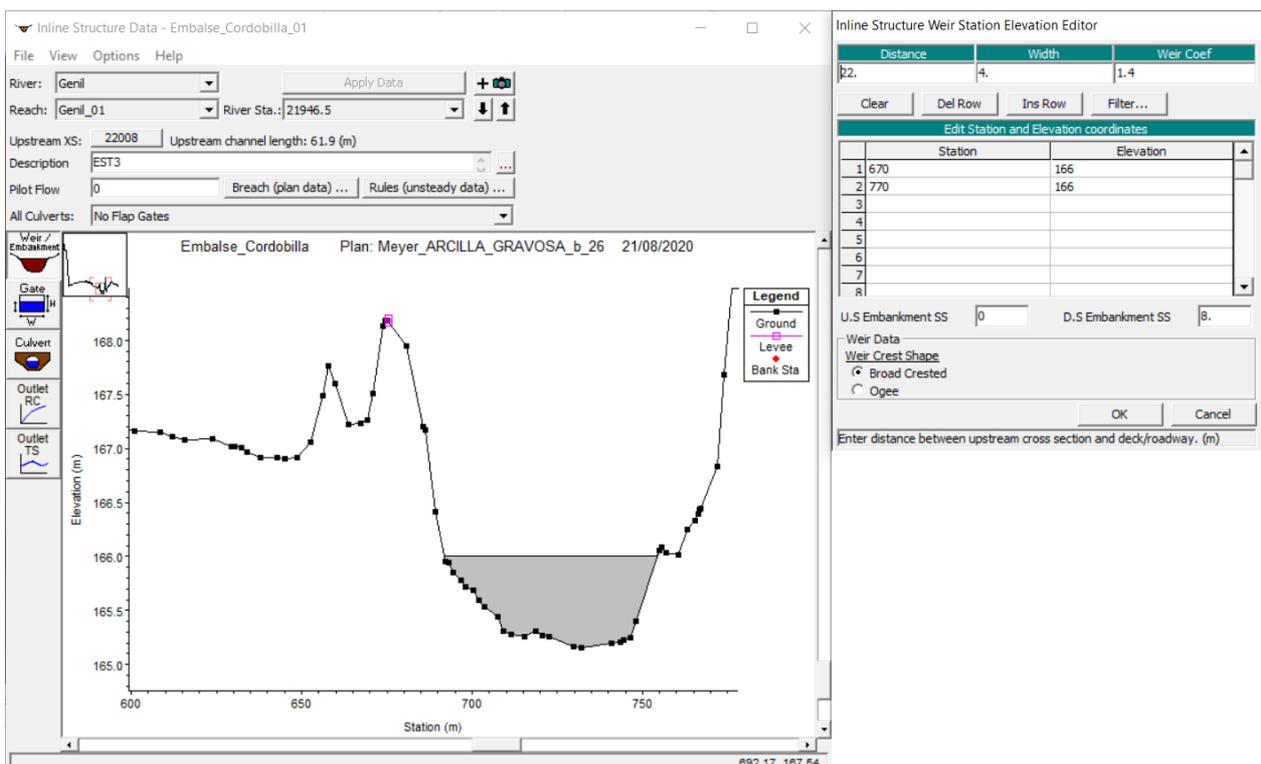


Figura 18. Modelado Estructura 3.

- **Estructura 4:** Puente. Este es el puente de Miragenil, que se encuentra al paso del municipio de Puente Genil. Este puente cuenta con dos pilas de importante grosor. La pila central es la más ancha de las dos y además se encuentra en el centro del cauce, debido a lo cual, supone un elemento de considerable influencia en el flujo.



Figura 19. Puente de Miragenil.

De forma análoga a las anteriores, se definen las secciones necesarias para modelar el puente y se introducen sus características, tal y como se observa en las **figuras 20 y 21**:

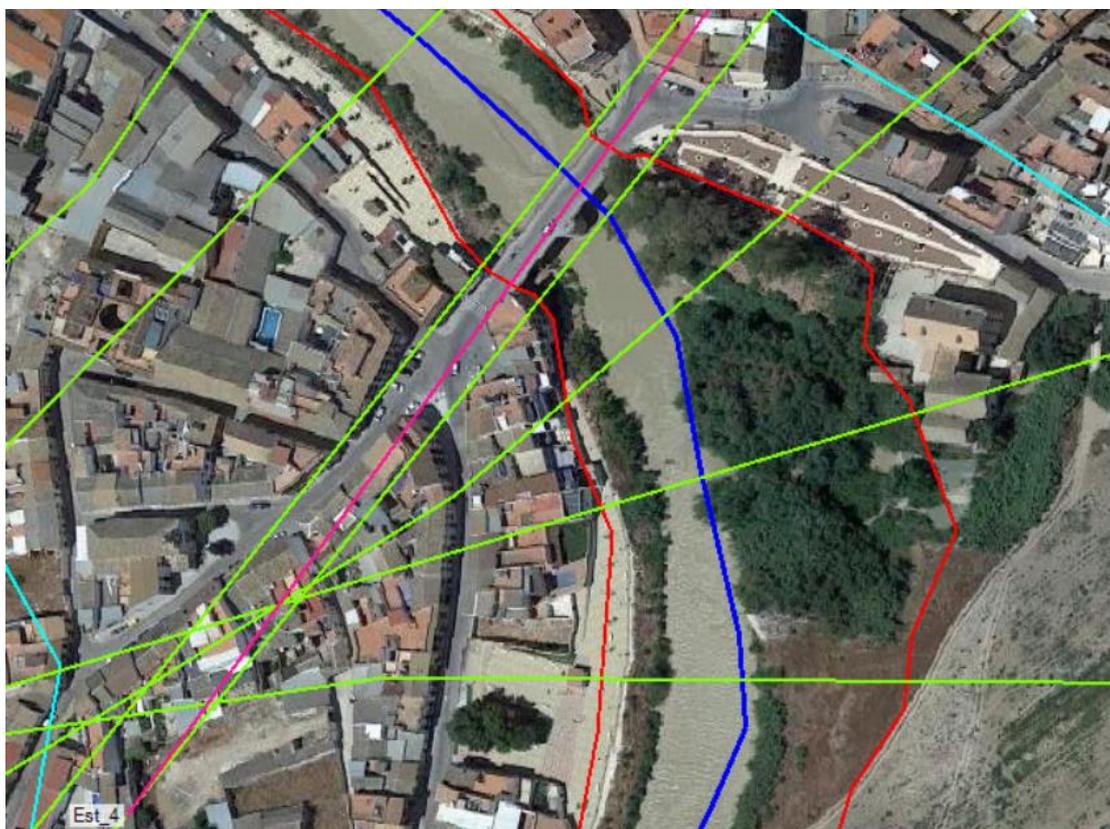


Figura 20. Secciones Estructura 4

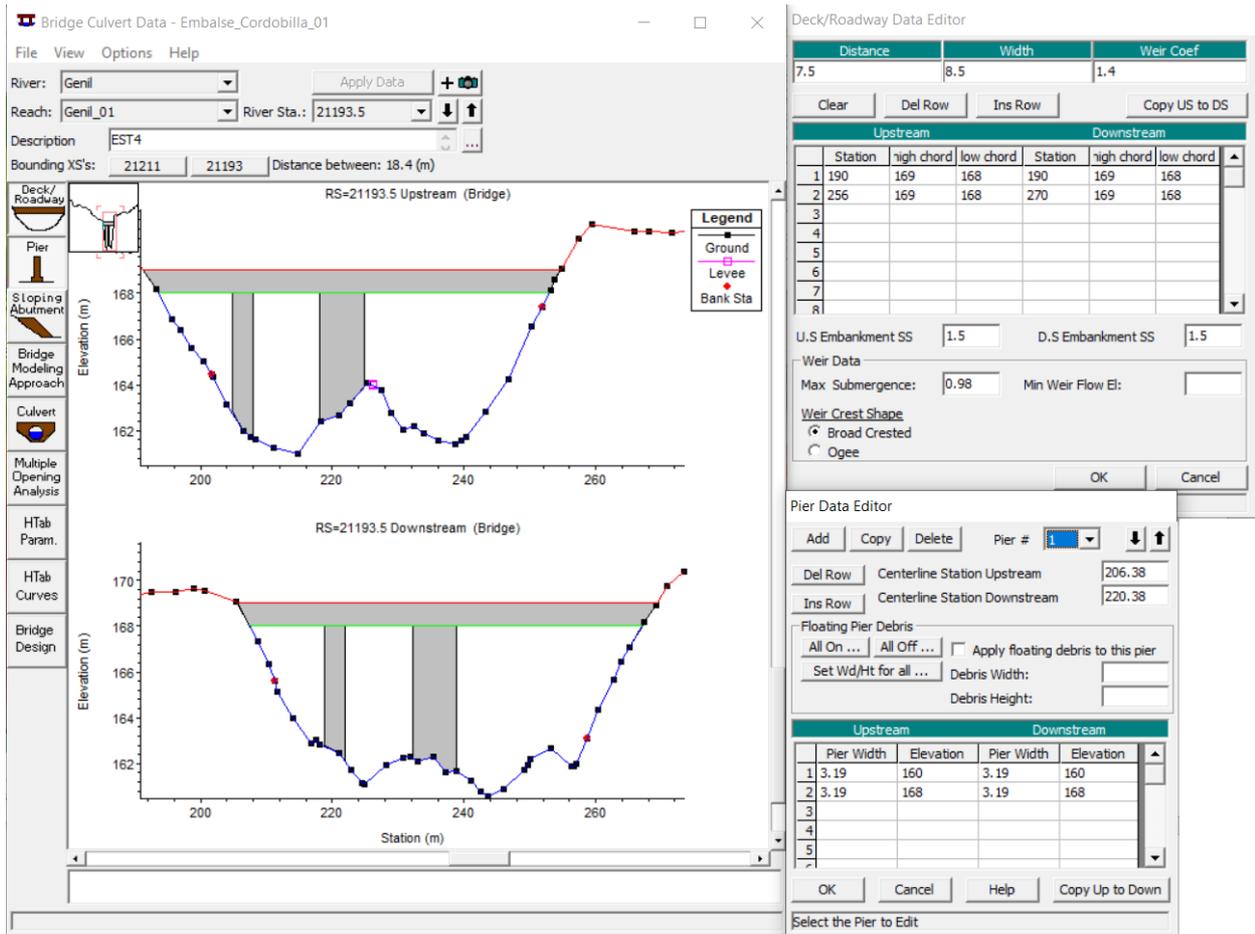


Figura 21. Modelado Estructura 4.

- **Estructura 5:** Puente. Este puente no presenta pilas que puedan interferir en el cauce y, teniendo en cuenta la poca información disponible sobre él, se ha tomado la decisión de no incluirlo en el modelo. Esta decisión viene reforzada por los escasos caudales que se preveen a la hora de definir el flujo. Para más información sobre el flujo, consultar el apartado 3.4.



Figura 22. Estructura 5.

- **Estructura 6:** Puente. Nuevamente se trata de una estructura no introducida en el modelo. Esto se debe principalmente a la dificultad de hacerlo. La estructura se encuentra en una zona de meandros pronunciados donde la definición de secciones transversales útiles es compleja. Como puede observarse en la figura 23, definir secciones que corten de forma perpendicular el cauce y cada una de las líneas correspondientes supone que las secciones confluyan en el interior de la curva del meandro

y que tengan formas irregulares. La creación de cuatro secciones, dos de las cuales deben ser rectas y paralelas al puente, daría lugar a numerosas intersecciones entre secciones. Esto sería contraproducente, arrojando resultados más erróneos que en caso de obviar la introducción del puente en el modelo. Esta decisión se ve también reforzada por los pequeños caudales que generalmente conforman el flujo.

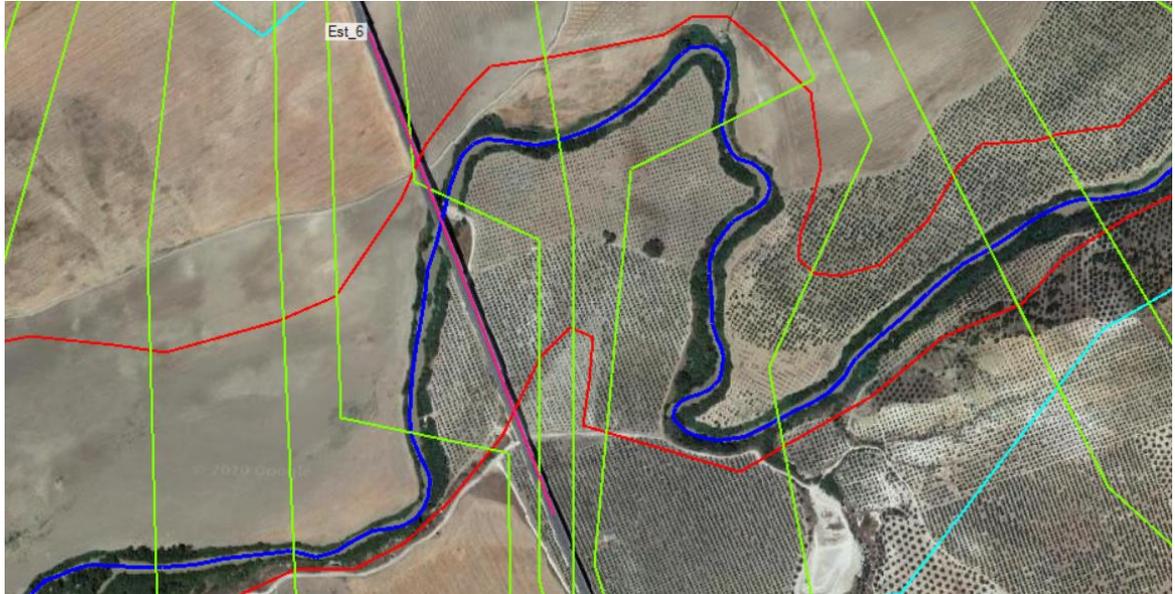


Figura 23. Secciones Estructura 6.

3.4 Flujo

Como ya se ha indicado, la simulación del modelo se llevará a cabo con un flujo casi-inestable o “*quasi-unsteady*”. Para ello, HEC-RAS requiere la introducción de un hidrograma de barras. Dicha información ha sido extraída del sitio web del *Ministerio para la Transición Ecológica*. Se obtiene, de esta forma, la información recogida por el aforador del embalse de Cordobilla. Se dispone de información de caudales medios diarios desde octubre del año 1959. Se han empleado los datos desde el 1 de octubre de 1959 hasta el 30 de julio de 2005. La simulación, por tanto, simula 16.729 días. Se establece la fecha de inicio de la simulación como el 1 de octubre del 2020 con el objetivo de estudiar el comportamiento morfodinámico del río Genil aguas abajo de la presa de Cordobilla (sin aporte de sedimento). A pesar de que los aforos no son actuales, si se consideran útiles al disponer de información correspondiente a un largo periodo de tiempo, que refleje numerosas situaciones de avenidas y sequías.

Para configurar correctamente el flujo en HEC-RAS, se debe completar las diferentes columnas que el software requiere. En primer lugar, la columna que establece la duración de cada bloque del hidrograma. Puesto que los datos son diarios, esta columna se rellenará con 24 horas para cada intervalo. La siguiente columna es la del incremento computacional. Tiene impacto directo en el tiempo computacional que conlleva la simulación del modelo. Se ha establecido este valor en 12 horas. Por último, el valor en m^3/s de cada bloque, correspondiente a los datos diarios de aforos. Esta información se incluirá como condición de contorno en la primera sección del modelo. En la siguiente figura puede observarse la configuración descrita:

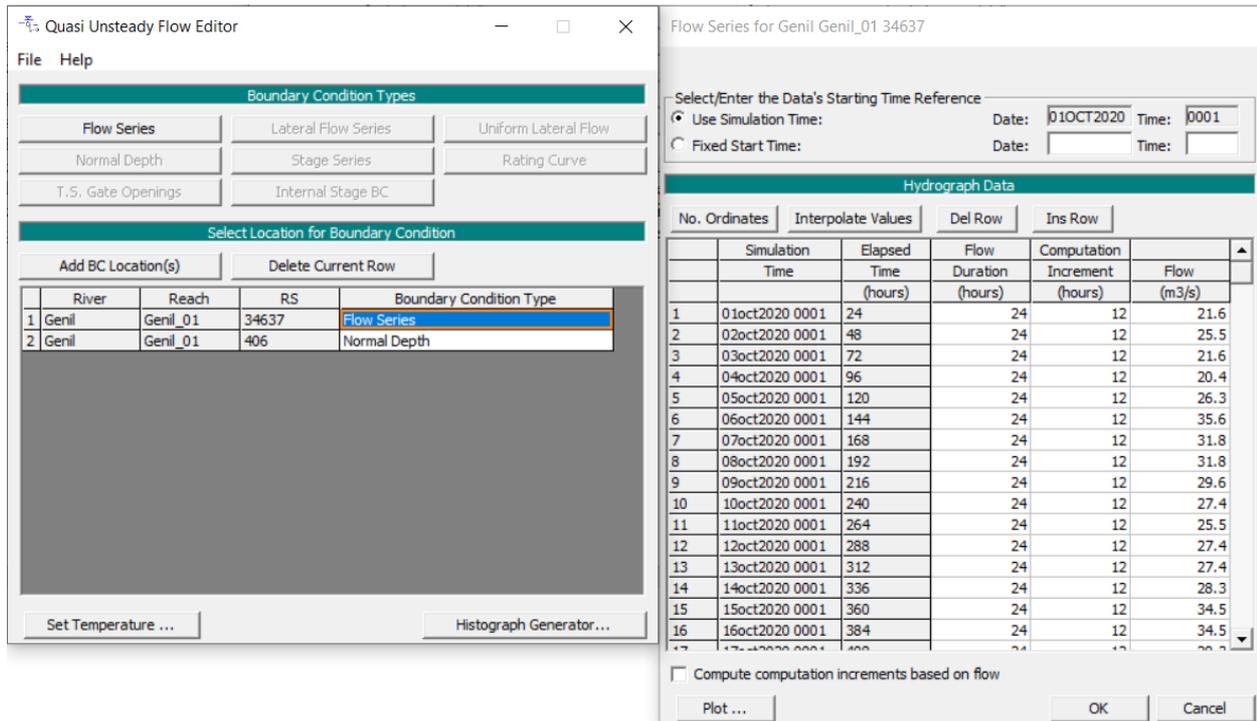


Figura 24. Introducción del hidrograma.

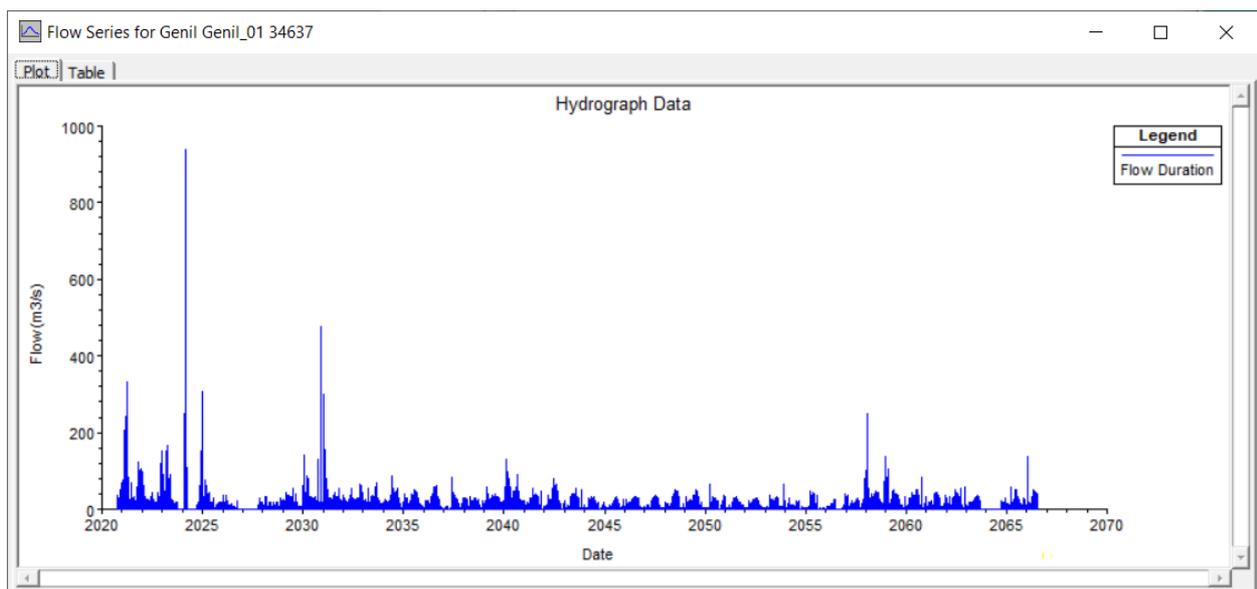


Figura 25. Hidrograma completo de la simulación.

Del mismo modo, en la última sección del modelo, la situada más aguas abajo, se establece como condición de contorno el régimen uniforme. Por último, se establecen 20° de temperatura constante durante cada día de la simulación.

3.5 Rozamiento del lecho

Para establecer el rozamiento en cada punto del lecho, se han definido distintos valores para el número de Manning. Dichos valores se han extraído del *Manual de Referencia de HEC-RAS*. Los valores empleados son los siguientes:

Tabla 1. Valores del número de Manning.

Descripción	Nº de Manning (n)
Cauce	0.06
Terreno con vegetación	0.035
Cultivo de hilera o pequeño	0.04
Cultivo de árbol o grande	0.07
Zona despejada y caminos de tierra	0.03
Zona Urbanizada	0.016

Se han considerado estos valores en función del terreno observado en la ortofoto de la zona de estudio. En la figura siguiente se puede observar la distribución del número de Manning que se ha definido:

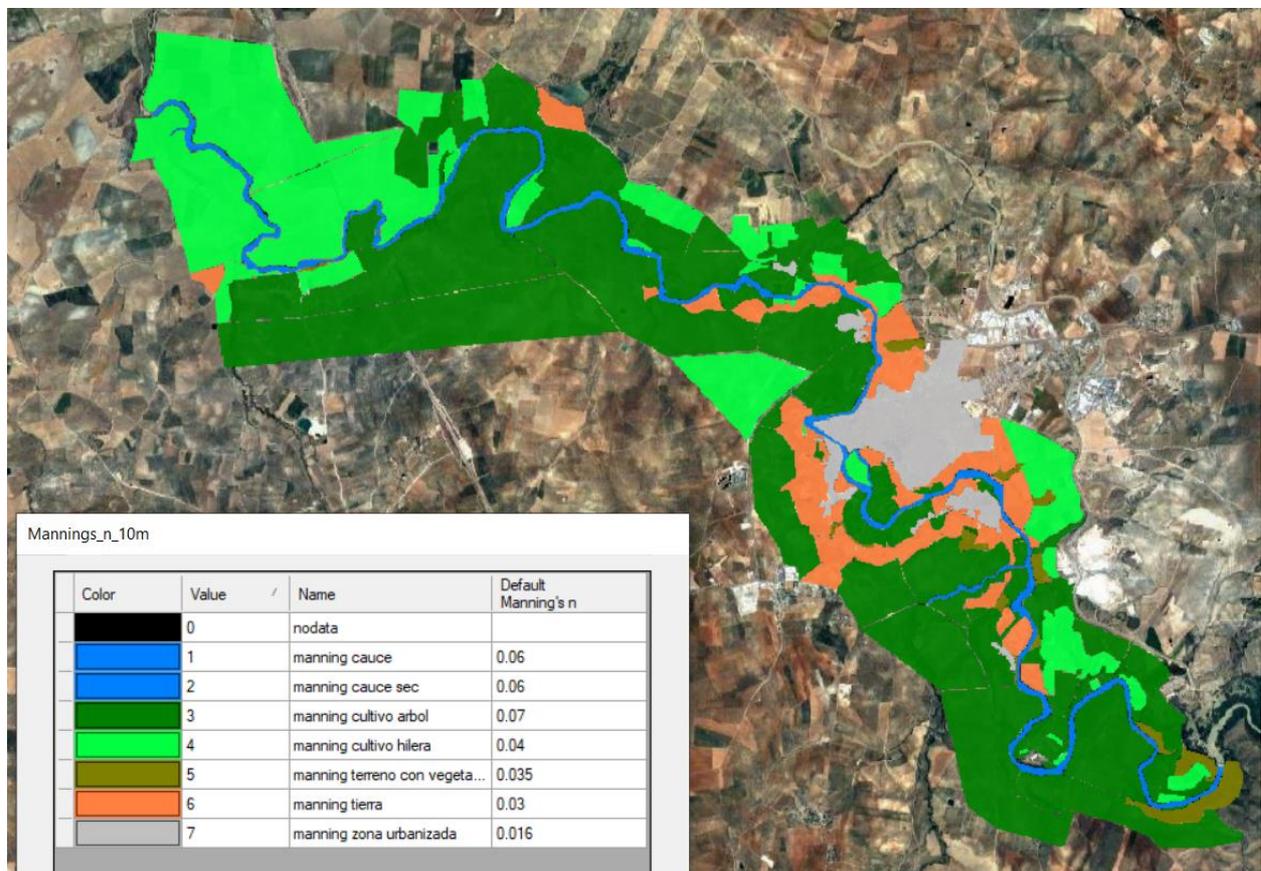


Figura 26. Distribución valores de Manning.

Sin embargo, esta forma de introducir el valor del número de Manning sólo es válida en un estudio 2D. Para un estudio 1D, se debe definir dicho valor sección por sección. HEC-RAS, solicita los valores del número de Manning en el cauce y a cada lado de este (la separación queda definida por las Bank Lines). Dichos valores se han introducido a mano, siguiendo la distribución anterior.

Edit Manning's n or k Values

River: Genil Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: Genil_01 All Regions

Selected Area Edit Options

Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ... Reduce to L Ch R ...

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	34637	n	0.035	0.06	0.035
2	34500	n	0.035	0.06	0.035
3	34419	n	0.035	0.06	0.035
4	34390.5	Inl Struct			
5	34384	n	0.07	0.06	0.035
6	34338	n	0.07	0.06	0.035
7	34160	n	0.07	0.06	0.035
8	33942	n	0.04	0.06	0.035
9	33673	n	0.04	0.06	0.035
10	33577	n	0.04	0.06	0.035
11	33312	n	0.07	0.06	0.07
12	33095	n	0.07	0.06	0.07
13	32971	n	0.07	0.06	0.07
14	32868	n	0.07	0.06	0.07
15	32748	n	0.07	0.06	0.07
16	32614	n	0.07	0.06	0.035
17	32436	n	0.07	0.06	0.035
18	32333	n	0.07	0.06	0.035
19	32064	n	0.07	0.06	0.07
20	31994	n	0.07	0.06	0.07
21	31924	n	0.07	0.06	0.04
22	31854	n	0.07	0.06	0.04
23	31757	n	0.07	0.06	0.04
24	31638	n	0.07	0.06	0.04

OK Cancel Help

Figura 27. Introducción de valores del número de Manning por sección.

3.6 Materiales del lecho

Para completar el modelo, es indispensable definir el material del que se compone el lecho. Lo más adecuado a la hora de determinar el tipo de suelo es llevar a cabo una comprobación in-situ. También puede obtenerse información procedente de otras fuentes. Sin embargo, la primera de estas posibilidades ha resultado inviable. En cuanto a la recopilación de información ya recogida, no se ha encontrado material de interés o utilidad.

A pesar de ello, se ha optado por la caracterización de diversos materiales para llevar a cabo un estudio comparativo. De este modo, mediante la definición de diferentes curvas granulométricas, se han establecido varios planes de simulación. Por tanto, se obtendrán resultados para cada tipo de material o curva granulométrica definidas:

- Caliza triturada.
- Arena de Hormigón.
- Arenisca Triturada.
- Arena Arcillosa 1.
- Arena Arcillosa 2.
- Arcilla Gravosa.

Tabla 2. Curvas granulométricas

Caliza triturada		Arena hormigón		Arenisca triturada	
mm	% pasa	mm	% pasa	mm	% pasa
0	0	0	0	0	0
0.004	0	0.004	0	0.004	0
0.008	0	0.008	0	0.008	0
0.016	0	0.016	0	0.016	0
0.032	0	0.032	0	0.032	0
0.0625	0	0.0625	0	0.0625	5
0.125	15	0.125	5	0.125	15
0.25	18	0.25	10	0.25	40
0.5	25	0.5	40	0.5	90
1	34	1	70	1	95
2	50	2	82	2	98
4	68	4	95	4	100
8	95	8	100	8	0
16	0	16	0	16	0
32	0	32	0	32	0

Arena arcillosa 2		Arena arcillosa 1		Arcilla gravosa	
mm	% pasa	mm	% pasa	mm	% pasa
0	0	0	0	0	0
0.004	0	0.004	0	0.004	27
0.008	0	0.008	0	0.008	35
0.016	0	0.016	0	0.016	50
0.032	0	0.032	38	0.032	65
0.0625	20	0.0625	45	0.0625	71
0.125	30	0.125	60	0.125	75
0.25	35	0.25	75	0.25	78
0.5	50	0.5	88	0.5	83
1	70	1	93	1	85
2	90	2	95	2	88
4	97	4	97	4	90
8	100	8	98	8	95
16		16	100	16	98
32	0	32	0	32	100

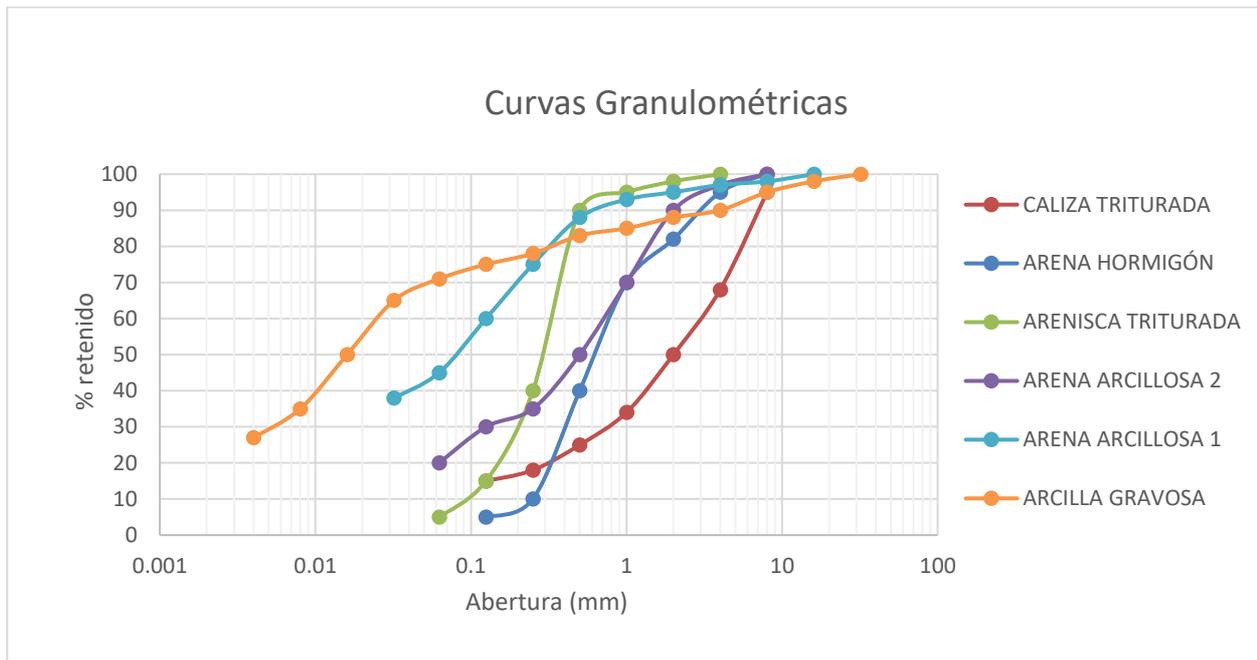


Figura 28. Curvas granulométricas

Estos materiales presentan distintos grados de uniformidad y distintos rangos de espesores de partícula, por lo que darán lugar a diferentes resultados. HEC-RAS solicita esta información en el módulo “Sediment Data”. Es necesario incluir información para cada una de las secciones del modelo.

En primer lugar, es necesario definir un material de los listados anteriormente, introduciendo su curva granulométrica. La **figura 29** muestra el caso para una “arcilla gravosa”. Es también necesario introducir un valor máximo de erosión permitido o un valor mínimo de sedimentación. Se ha fijado el valor máximo de erosión máxima en 5m. Esto se debe a que, como se comprueba en los resultados, se dan valores más significativos de sedimentación que de erosión a lo largo del tramo estudiado. Por ello, no se quiere limitar el efecto de la sedimentación. El valor de 5m se ha adoptado por considerarlo un valor suficientemente elevado. Posteriormente se comprueba que las erosiones generalmente no se acercan a los 5m. Por otro lado, se limita el alcance que el cálculo del transporte de sedimento tiene en las propias secciones, aunque tras esto se activa la opción que permite rebasar los límites establecidos. Para este estudio, se han fijado dichos límites con el valor de los “Bank Stations”, que son la intersección entre la sección transversal y las “Bank Lines”. Se han realizado pruebas comparativas aumentando el alcance de estos límites. Sin embargo, no se han obtenido resultados que difieren significativamente.

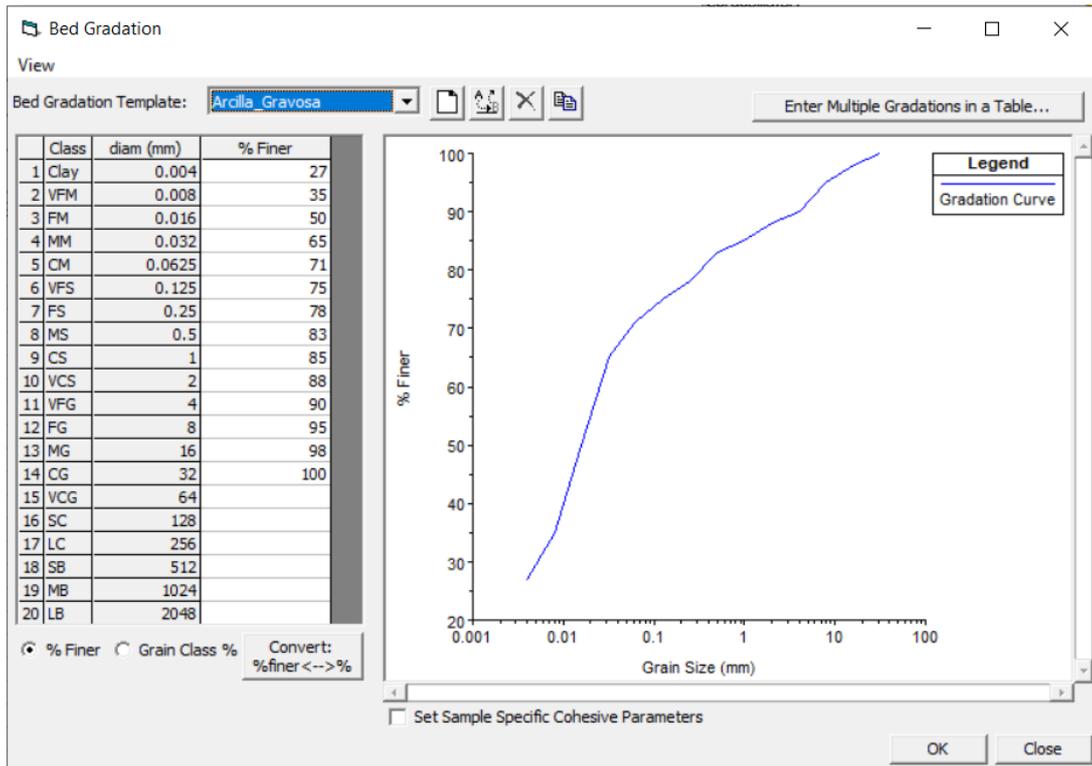


Figura 29. Curva granulométrica: Arcilla Gravosa

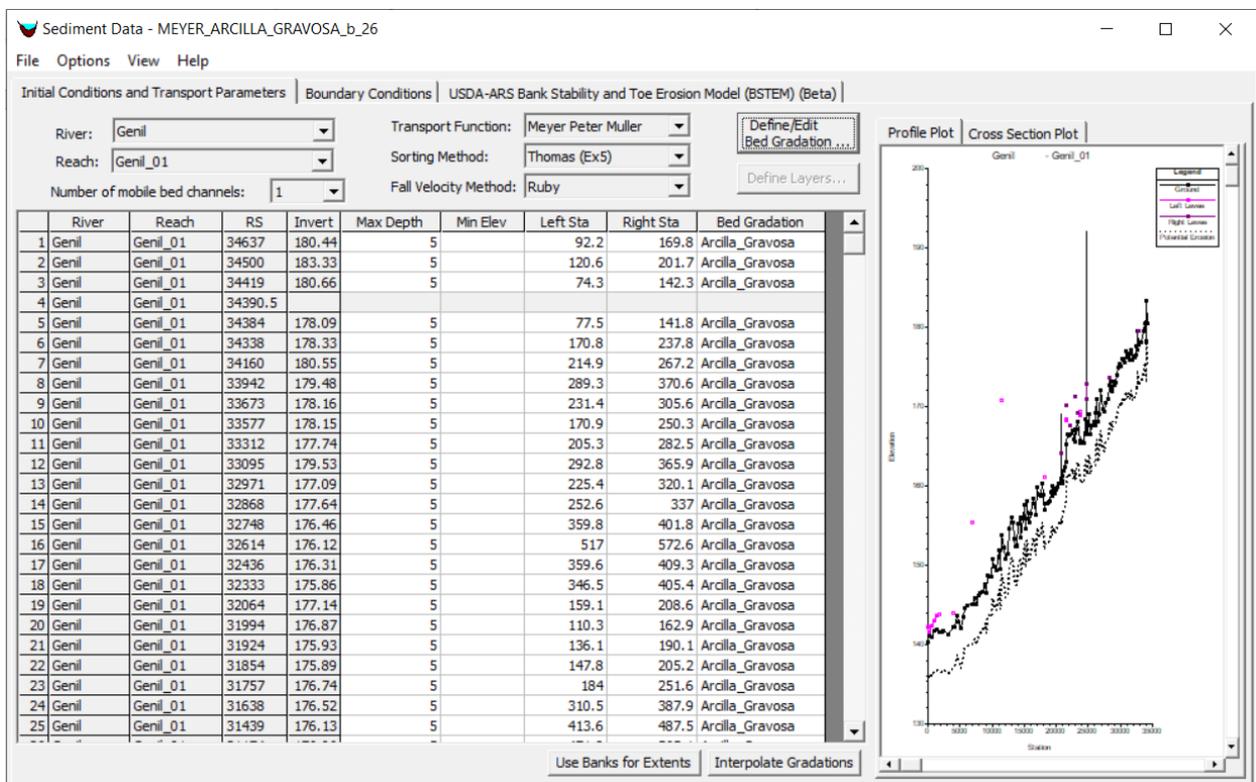


Figura 30. Introducción de los datos de sedimento.

En la pestaña de condiciones de contorno, únicamente se indicará en la primera sección transversal la opción “Equilibrium Load”. En el **apartado 3.7**, se volverá a esta pestaña.

Es importante especificar la ecuación que se desea que emplee el modelo a la hora de llevar a cabo los cálculos de transporte de sedimento. El “Manual de Referencia de HEC-RAS” define las ecuaciones disponibles e indica para que rangos de espesores son más adecuadas. Con esto, se han empleado las siguientes expresiones para cada material:

Tabla 3. Expresiones empleadas para el transporte de sedimento.

Material	Expresión
Caliza Triturada	Ackers-White
Arena de Hormigón	Ackers-White
Arenisca Triturada	Tofaletti
Arena Arcillosa 1	Meyer- Peter
Arena Arcillosa 2	Tofaletti
Arcilla Gravosa	Meyer-Peter
Caliza Triturada	Ackers-White

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u_*}{V} \right)^n} \quad \text{con} \quad G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)$$

Ecuación 4. Expresión de Ackers-White

Siendo:

- G_{gr} : Parámetro de transporte de sedimento
- s : densidad relativa del sedimento
- d_s : Diámetro medio de las partículas
- D : Profundidad efectiva
- u_* : Velocidad de corte
- V : Velocidad promedio del canal
- n : Parámetro de transición (depende del tamaño de sedimento)
- C : Coeficiente
- F_{gr} : Parámetro de movilidad del sedimento
- A : Parámetro de movilidad crítica del sedimento

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.75z}}{1+n_v-0.756z} \quad (\text{lower zone})$$

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.224z} \left[\left(\frac{R}{25} \right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24} \right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (\text{middle zone})$$

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.224z} \left(\frac{R}{25} \right)^{0.5z} \left[R^{1+n_v-1.5z} \left(\frac{R}{25} \right)^{0.5z} \right]}{1+n_v-1.5z} \quad (\text{upper zone})$$

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.75z} \quad (\text{bed zone})$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb}$$

Ecuación 5. Expresiones de Tofaletti

Siendo:

- g_{ssL} : Transporte por suspensión en la zona baja (Tn/día/ft)
- g_{ssM} : Transporte por suspensión en la zona intermedia (Tn/día/ft)
- g_{ssU} : Transporte por suspensión en la zona alta (Tn/día/ft)
- g_{sb} : Transporte de sedimento de fondo (Tn/día/ft)
- g_s : Transporte de sedimento total (Tn/día/ft)
- M: Parámetro de concentración de sedimento
- R: Radio hidráulico
- d_m : Diámetro medio de partícula
- z: Exponente que describe la relación entre el sedimento y las características hidráulicas
- n_v : Parámetro que depende de la temperatura

$$\left(\frac{K_r}{K'_r}\right)^{3/2} \gamma RS = 0.047(\gamma_s - \gamma)d_m + 0.25\left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma}\right)^{2/3} g_s^{2/3}$$

Ecuación 6. Expresión de Meyer-Peter

Siendo:

- g_s : Ratio de transporte de sedimento unitario
- K_r : Coeficiente de rugosidad
- K'_r : Coeficiente de rugosidad basado en la partícula
- γ : Peso específico del agua
- γ_s : Peso específico del sedimento
- g : Aceleración de la gravedad
- d_m : Diámetro medio de la partícula
- R: Radio hidráulico
- S: Gradiente de energía

3.7 Aporte de sedimento

La configuración explicada hasta el momento, permite llevar a cabo simulaciones correctas que respondan al primer objetivo de este estudio: predecir el comportamiento del lecho aguas abajo de la presa de Cordobilla en medio-largo plazo, bajo la situación actual de retención de sólidos.

El Segundo objetivo es, como ya se ha definido, considerar la situación en la que el embalse sea dragado para recuperar su capacidad total o parcialmente. Se pretende estudiar la posibilidad de verter el mismo sedimento dragado aguas abajo de la presa, con el objetivo de ahorrar su transporte a vertedero.

Para esto, se parte del modelo creado en los puntos anteriores. Es necesario añadir condiciones de contorno para el transporte de sedimento. Estas condiciones de contorno pueden introducirse en más de una sección.

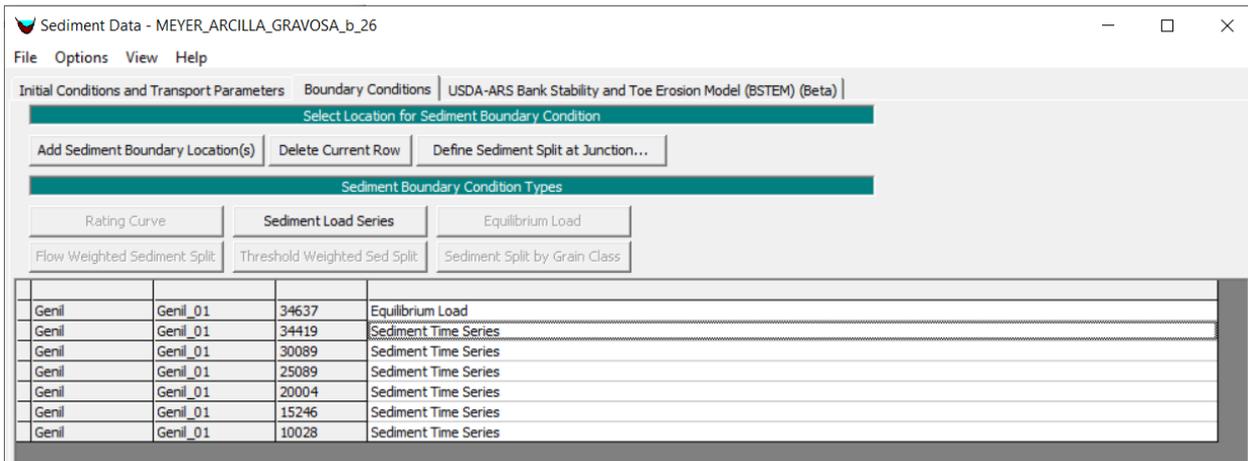


Figura 31. Transporte de sedimento. Condiciones de contorno

Para configurar cada una de las condiciones de contorno como una entrada de sedimento, se elige el tipo “Sediment Load Series”. De esta forma, HEC-RAS permite asignar para una sección determinada una serie temporal de entrada de sedimento, coincidente en número de bloques con la serie temporal definida en el paratado 3.4 Flujo. En esta serie, se define un rendimiento de entrada de sedimento por la sección, además de caracterizar el sedimento de entrada. Para esto último, HEC-RAS solicita que se especifique la distribución del tamaño del sedimento, en base a una serie de rangos de tamaños de particulas. Puede observarse en la figura 31 el caso para la entrada de sedimento en 6 puntos distintos del cauce. Cada una de estas condiciones de contorno se caracterizarán como se muestra en la figura 32:

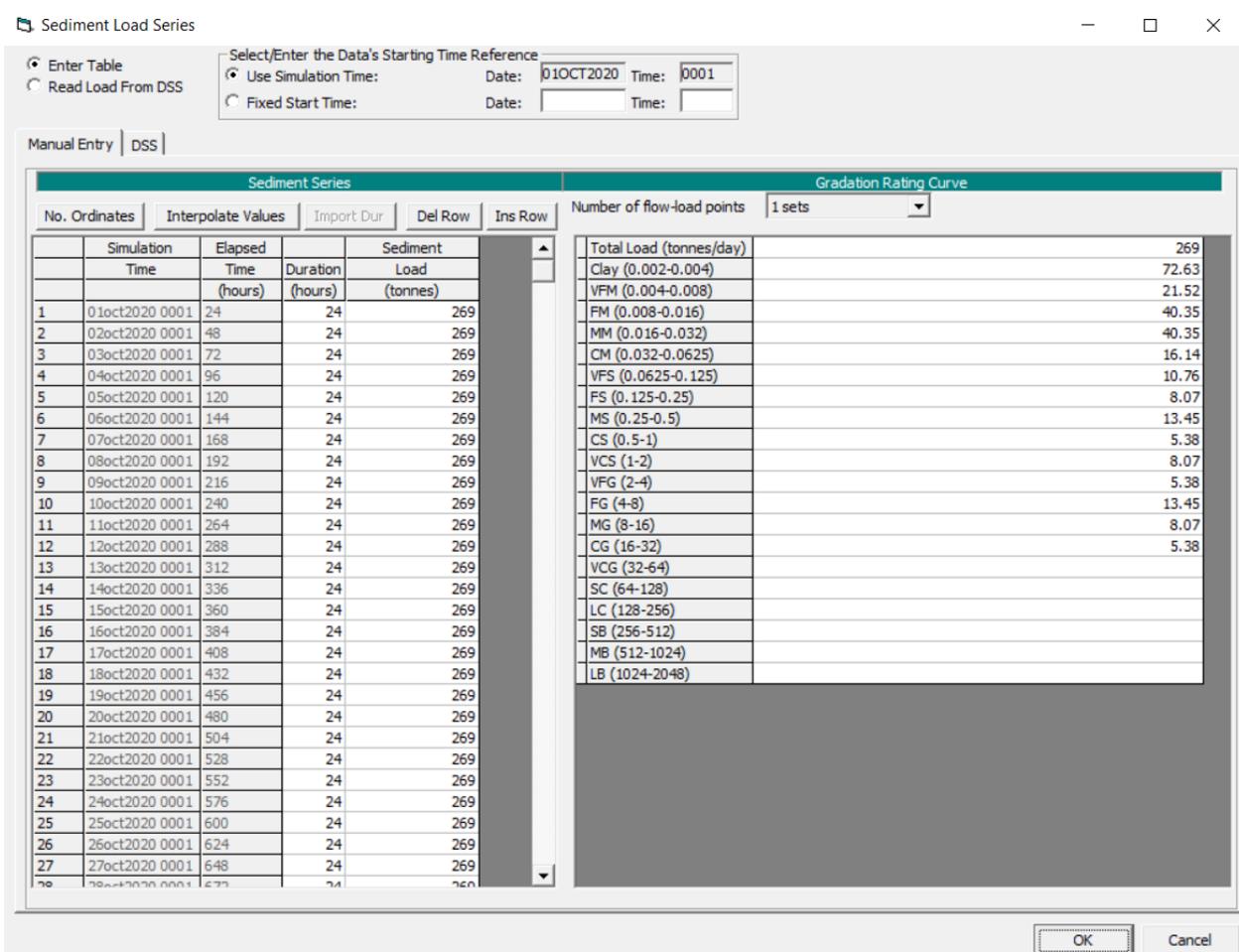


Figura 32. Configuración de una condición de contorno de entrada de sedimento.

Para el caso de la **figura 32**, por la sección que representa, entran 269 Tn diarias, con la distribución de tamaños que se especifica en el cuadro de la derecha.

Se han llevado a cabo numerosas pruebas para determinar la viabilidad del objetivo de verter el sedimento dragado en el cauce. Los resultados de dichas pruebas se presentan en el **apartado 4**.

Las distintas pruebas difieren en 3 características principales:

- **Material aportado.** Para reducir el número de simulaciones a llevar a cabo, se ha optado por escoger un material grueso (Caliza Triturada) y uno fino (Arcilla Gravosa), con el fin de comparar el impacto sobre el modelo entre sedimentos de distinto tamaño.
- **Rendimiento de aporte de sedimento.** En función de rendimientos teóricos de dragas y de la cantidad de sedimento acumulado en el embalse que se pretende retirar, se estudian distintas situaciones. Se aporta más información en el **apartado 3.7.1**.
- **Número de puntos de aporte de sedimento.** No tiene las mismas consecuencias para el cauce el aporte concentrado en un único punto o en varios puntos de entrada distintos a lo largo del cauce.

3.7.1 Rendimientos de aporte de sedimento

En primer lugar, se ha definido una densidad media para el sedimento de 2.69 Tn/m³.

Suponiendo que se emplea una draga de cuchara, éstas pueden alcanzar rendimientos comprendidos entre 2.000 y 20.000 m³ a la semana. Con estos rendimientos, el tiempo para vaciar el embalse por completo sería excesivo. Por ejemplo, considerando 33Hm³ de embalse colmatado, para un rendimiento de 1.000 m³ al día, se requerirían más de 90 años:

$$\frac{33.000.000m_3}{1.000m_3/día} * \frac{1año}{365día} = 90.41 años$$

Por ello, se ha decidido dragar aproximadamente la mitad de la capacidad del embalse, 15Hm³. Con esto, el tiempo para llevar a cabo el dragado se reduce a 41.1 años. Este tiempo podría reducirse con un rendimiento mayor, pero tal y como se podrá ver en el **apartado 4**, 1000m³/día ya supone un rendimiento demasiado elevado que, de hecho, habrá que reducir.

El análisis de resultados, que se presenta en el **apartado 4**, nos lleva a buscar alternativas a este rendimiento, como el caso de no reducirlo, pero aplicarlo en 6 puntos distintos del cauce, de modo que en cada uno se aporten 448.33 Tn al día de sedimento.

Otra alternativa estudiada será la de verter al cauce una cantidad de sedimento independiente y menor que la total extraída diariamente. De todos los camiones que transportarían el sólido dragado, unos irían a vertedero y otros al propio cauce. De este modo, puede aumentarse el rendimiento de dragado con independencia del que se aporte al cauce.

En este caso, considerando un rendimiento elevado de 8.000 m³ al día (por ejemplo, empleando más de una draga), los 33 Hm³ que retirarían en 4.125 días hábiles. Por otro lado, solo una parte de esos 8.000 m³ al día llegarían al cauce.

Para definir un rendimiento adecuado de aporte al cauce, se ha partido de la utilización de camiones de una capacidad teórica de 10 m³. Se han estudiado tres escenarios distintos:

- **A.** Al día se vierten 10 camiones de sedimento en cada uno de 6 puntos distintos del río. Esto se traduce en la entrada de 269 Tn al día por cada punto. Supone, a su vez, un ahorro de 247.500 viajes a vertedero.
- **B.** Al día se vierten 10 camiones de sedimento en un único punto (en el tramo inicial del río). Se aportan 269 Tn al día por un único punto, lo que supone un ahorro de 41.250 viajes a vertedero.
- **C.** Al día se vierten 5 camiones de sedimento en un único punto (en el tramo inicial del río). Esto supone la entrada de 135.5 Tn al día por un único punto. En este caso se consigue un ahorro de 20.610 viajes a vertedero.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Legados a este punto, se han propuesto los dos casos bien diferenciables que se pretenden estudiar. En apartados anteriores se ha expuesto cómo crear y configurar el modelo para ello. En este apartado, se mostrarán los resultados obtenidos por dichos modelos, además de comentar sus aspectos destacables, consecuencias en la realidad que pretenden representar y otras conclusiones derivadas de la comparación entre unos y otros resultados.

Como ya se ha comentado, este estudio contiene dos grandes bloques de estudio:

- a) Situación actual, sin aporte de sedimento aguas abajo de la presa de Cordobilla. Esta situación parece ser la que existirá en un futuro cercano, ya que no hay planeada ninguna actuación que permita el paso de sedimento a través de la presa. En el **apartado 5**, se comentarán las posibles actuaciones para que esto ocurra.
- b) Hasta ahora sólo se ha actuado mediante el dragado del embalse de Cordobilla en escasas ocasiones y con cuestionables resultados. Se propone la situación teórica en la cual se drague una cantidad considerable del embalse con la particularidad de verter el mismo sedimento acumulado.

4.1 Caso a)

Como se ha explicado en el **apartado 3.6**, la simulación se llevará a cabo para distintos materiales del lecho. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos. En la **figura 34** se puede observar la forma del lecho en la situación actual. Tras esto, siguen figuras para cada tipo de material de forma que se tenga una visión general del lecho en los distintos casos. En ellas, la línea negra delimita el estado actual del lecho y, el borde inferior de la superficie azul, delimita el estado final del lecho. De este modo, si la superficie azul queda por encima de la línea negra, se ha producido sedimentación. En caso contrario, se produce erosión.

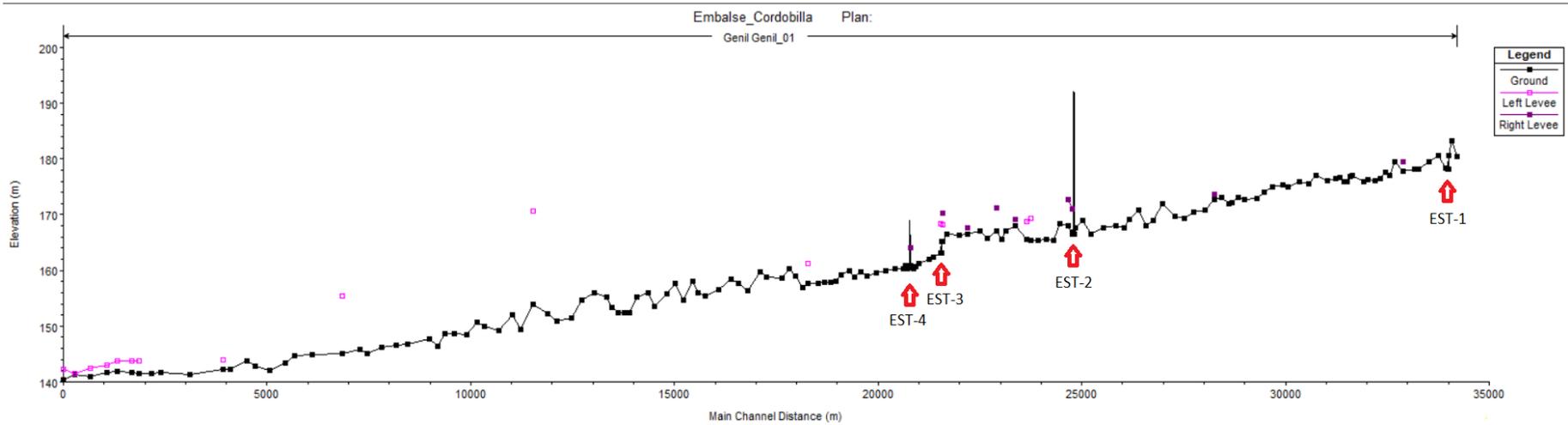


Figura 33. Lecho actual.

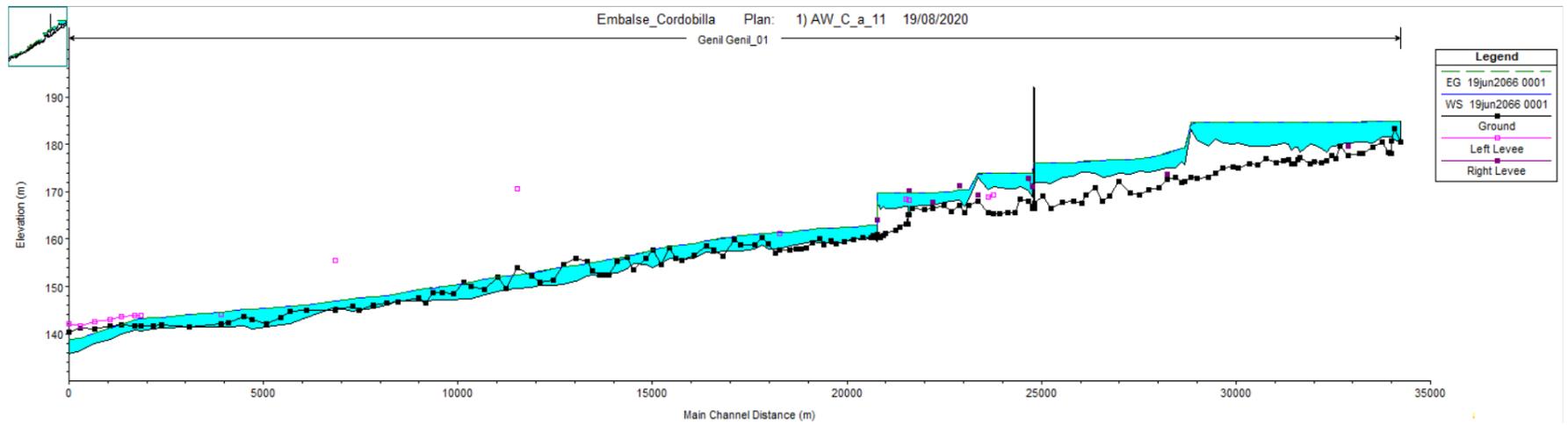


Figura 34. Lecho final. Caliza triturada.

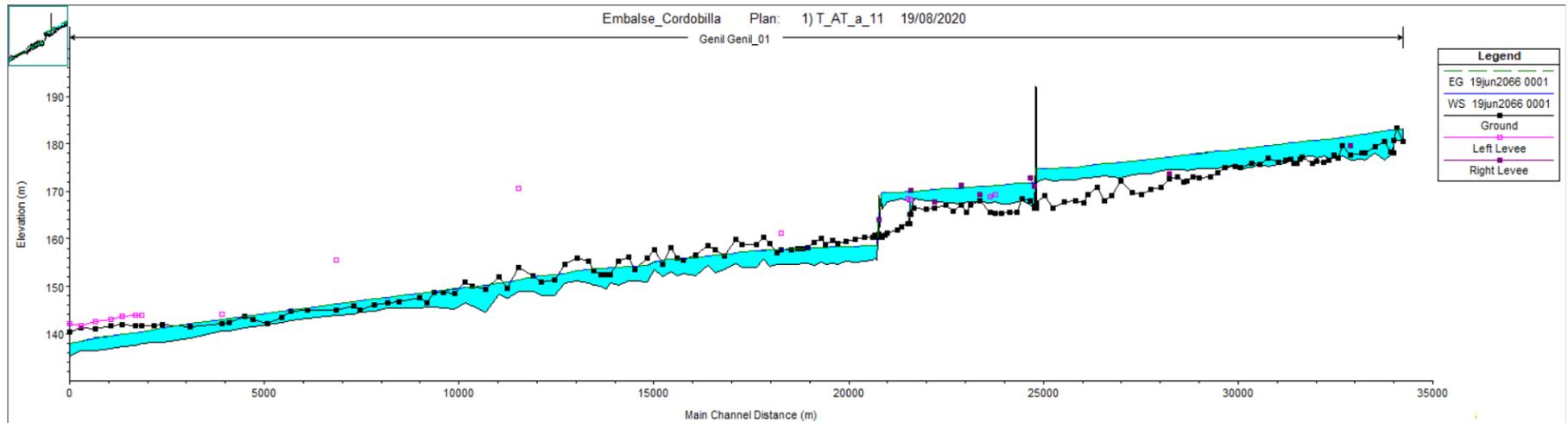


Figura 35- Lecho final. Arenisca Triturada

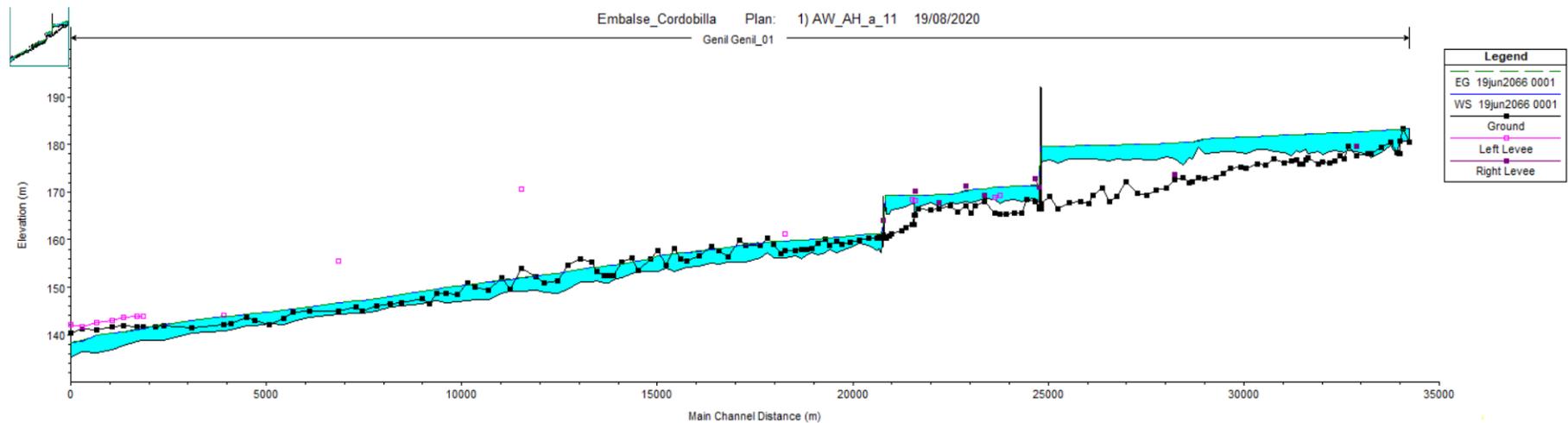


Figura 36. Lecho final. Arena Hormigón.

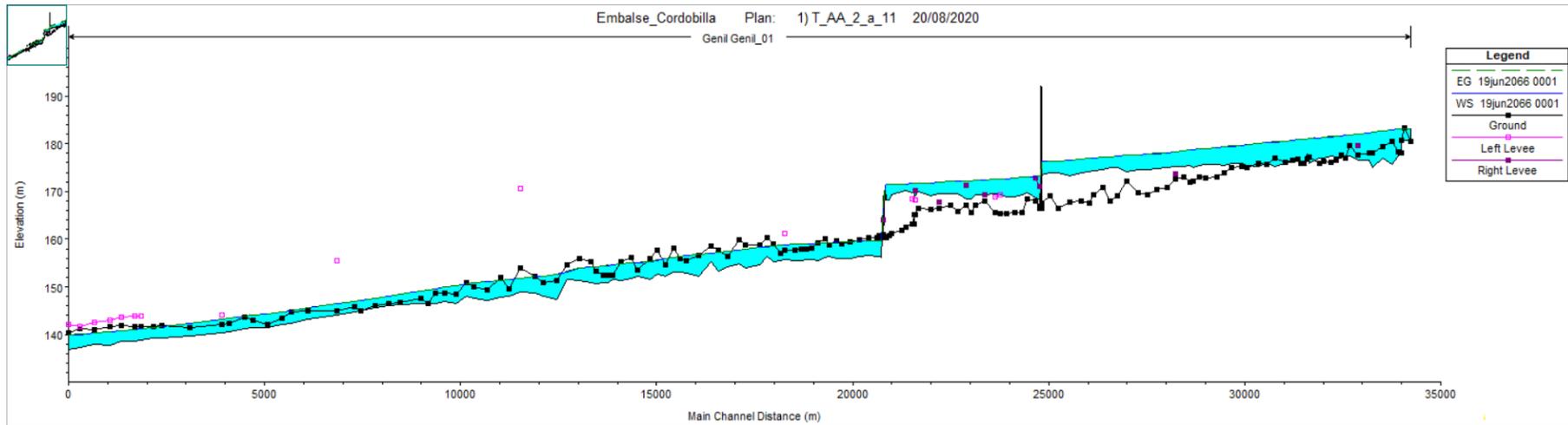


Figura 37. Lecho final. Arena arcillosa 2.

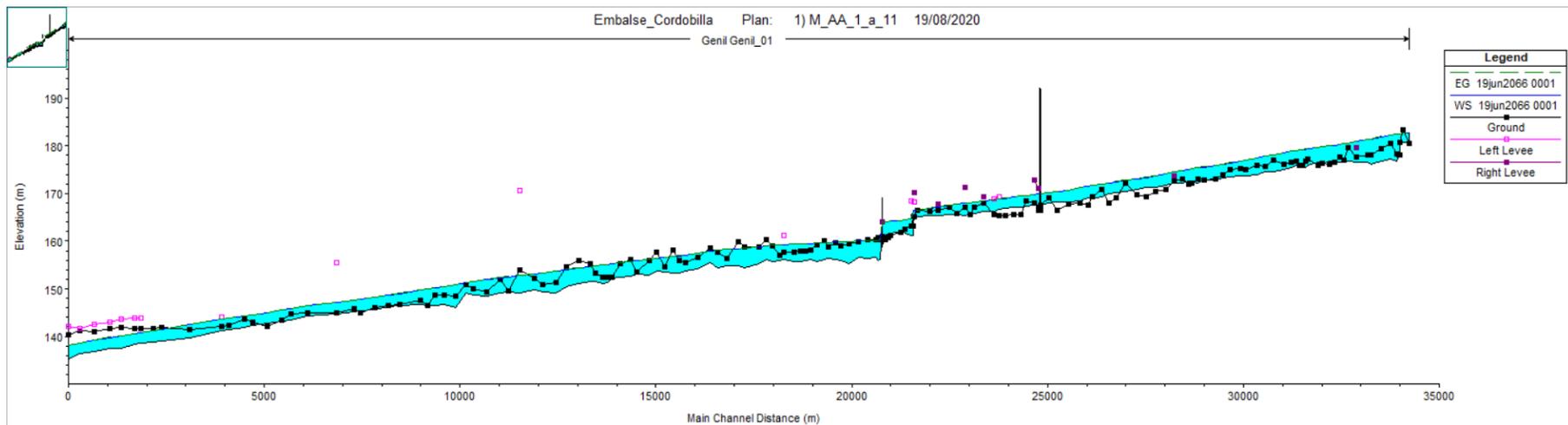


Figura 38. Lecho final. Arena arcillosa 1.

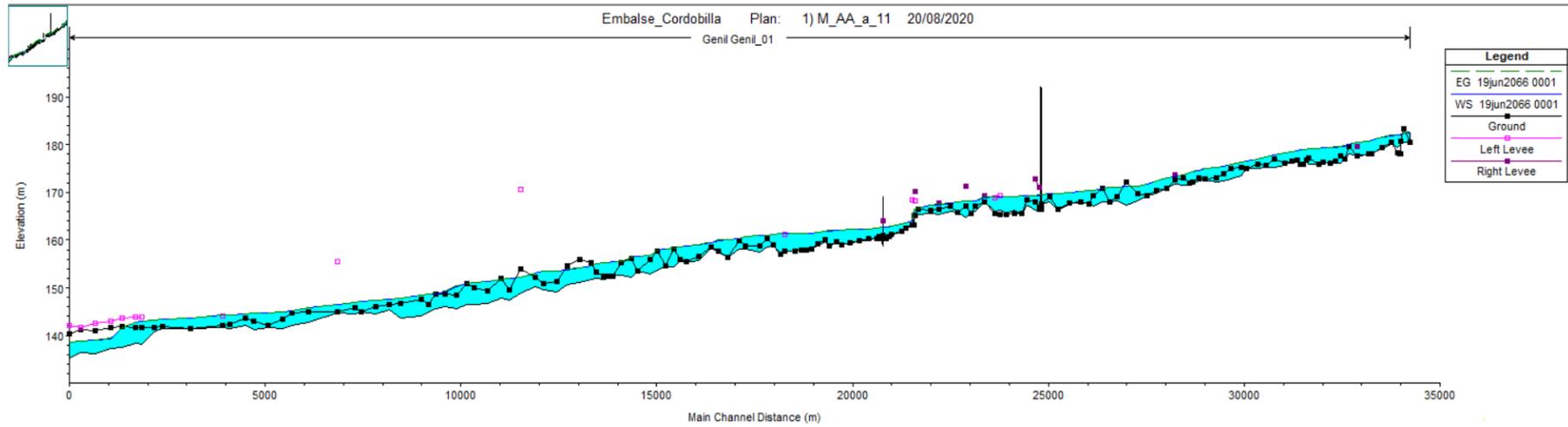


Figura 39. Lecho final. Arcilla Gravosa.

De estos resultados, se sacan dos conclusiones inmediatas:

- El mayor impacto se da en las estructuras, donde las acciones de la erosión y sedimentación modifican el lecho con más intensidad.
- Se observa una tendencia de menor impacto en el lecho cuanto más fino es el material con el que se realiza la simulación.

Para apreciar mayor el impacto en estructuras, se han obtenido resultados locales en las mismas:

- **Estructura 1. Azud.**

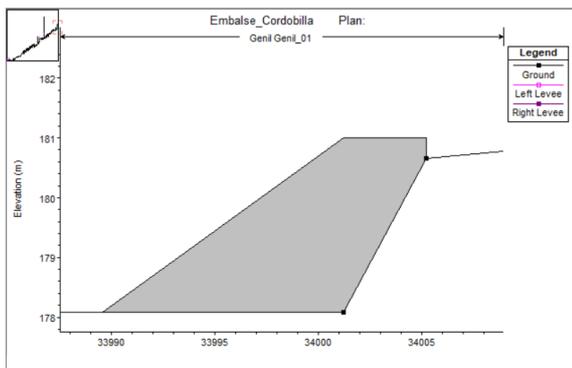


Figura 45. Estructura 1. Situación inicial.

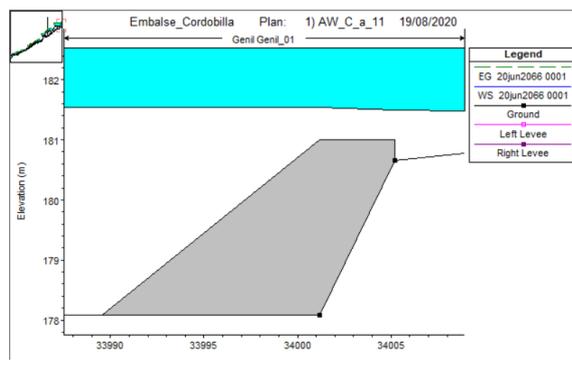


Figura 44. Estructura 1. Caliza Triturada.

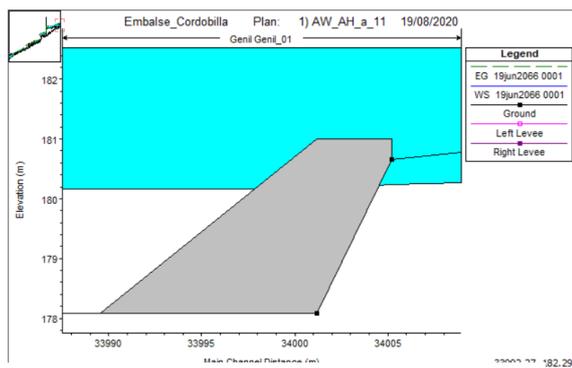


Figura 43. Estructura 1. Arena Hormigón.

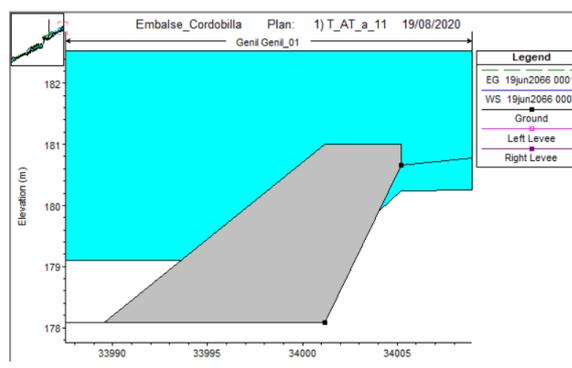


Figura 42. Estructura 1. Arenisca Triturada.

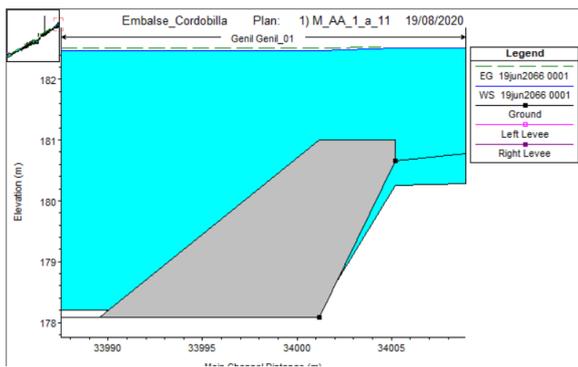


Figura 41. Estructura 1. Arena Arcillosa 1.

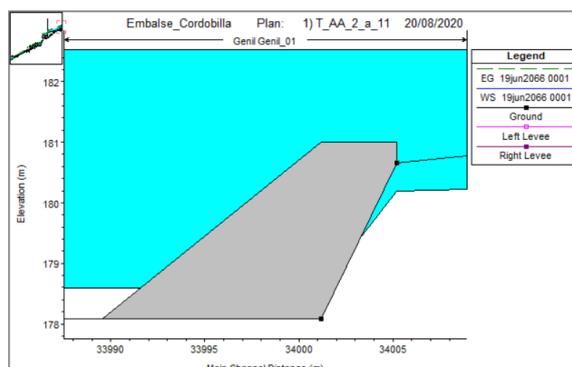


Figura 40. Estructura 1. Arena Arcillosa 2.

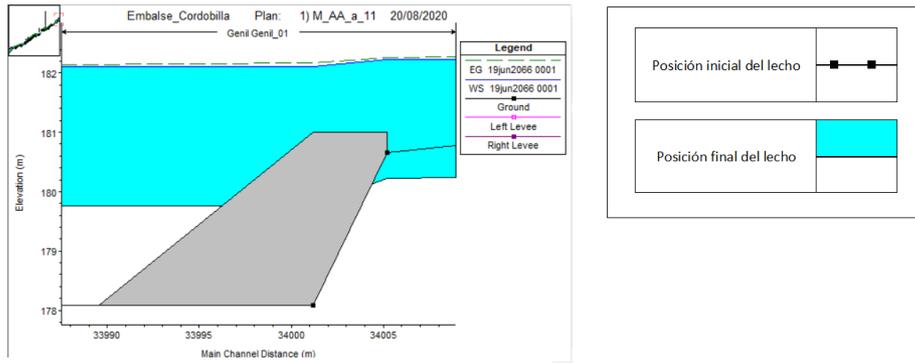


Figura 46. Estructura 1. Arcilla Gravosa.

En las figuras, la superficie gris representa el azud, mientras que la línea negra con vértices de cuadros representa la altura del lecho inicial. En cada caso, la divisoria entre azul y blanco representa la latura del lecho en situación final para cada material.

Puede observarse una tendencia general: se produce un menor impacto morfológico cuanto más fino sea el material. En el caso de la caliza triturada, el azud se ve completamente enterrado. En menor medida, ocurre lo mismo en el caso de la arena de hormigón. La arenisca triturada y la arcilla gravosa presentan bastante sedimentación aguas abajo del azud y algo de erosión aguas arriba. Podría solucionarse con mantenimiento a lo largo de los años. El caso de las arenas arcillosas, si bien presentan erosión aguas arriba del azud, a penas sufren sedimentación.

- Estructura 2. Puente.

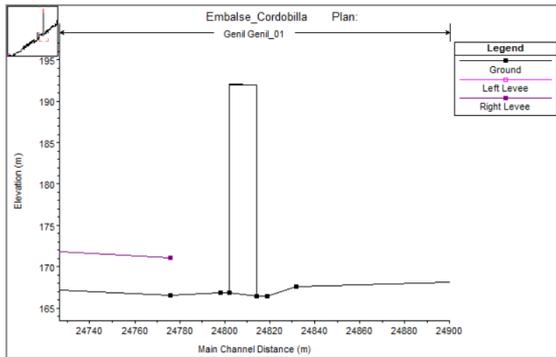


Figura 47. Estructura 2. Situación inicial.

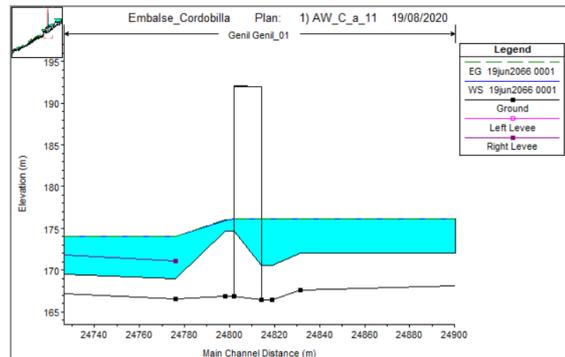


Figura 48. Estructura 2. Caliza Triturada.

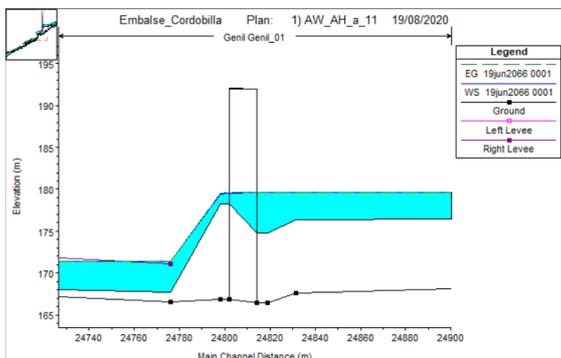


Figura 50. Estructura 2. Arena Hormigón.

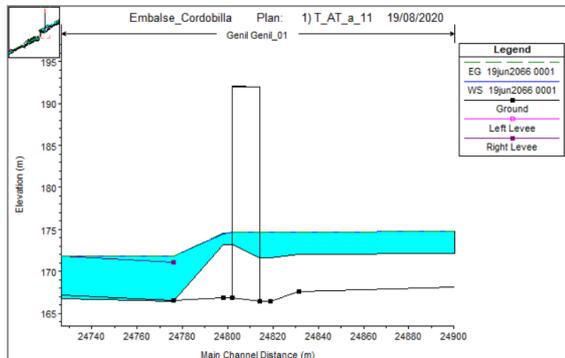


Figura 49. Estructura 2. Arenisca Triturada.

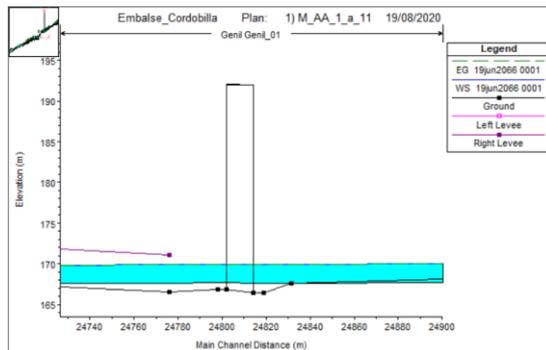


Figura 51. Estructura 2. Arena Arcillosa 1.

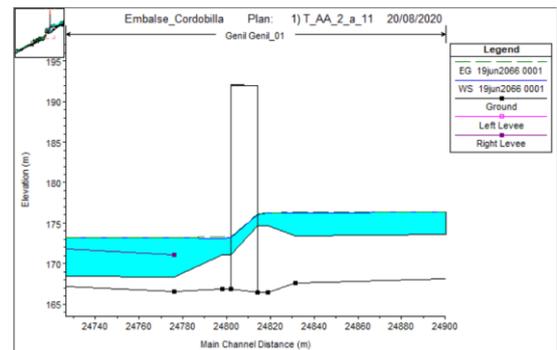


Figura 52. Estructura 2. Arena Arcillosa 2.

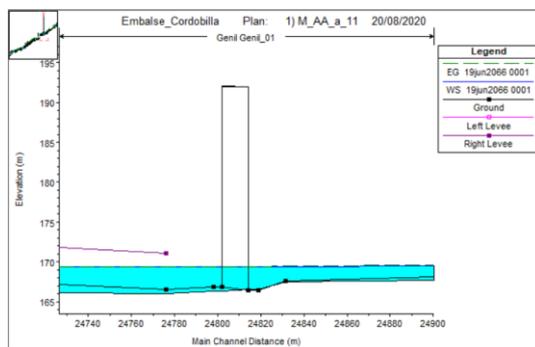
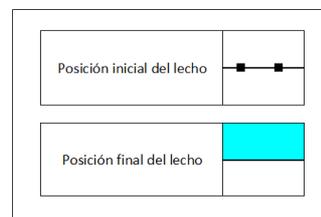


Figura 53. Estructura 2. Arcilla Gravosa.



En las figuras, las líneas verticales delimitan la estructura. Nuevamente, la línea negra con vértices de cuadros representa la altura del lecho inicial. En cada caso, la divisoria entre azul y blanco representa la latura del lecho en situación final para cada material.

En el puente de este caso, los materiales más gruesos presentan una gran retención de sedimento aguas arriba de las pilas de la estructura. Sin embargo, esta altura ganada por sedimentación se ve altamente reducida aguas abajo de la estructura, incluso llegando al nivel original del lecho en el caso de la arena de hormigón. Por otro lado, la Arena Arcillosa 1 y la Arcilla Gravosa a penas muestran cambios en el lecho.

- **Estructuras 3 y 4.** Azud y puente. Estas estructuras presentan una gran interacción como obstáculos del transporte del sedimento. Por ello se estudian juntas:

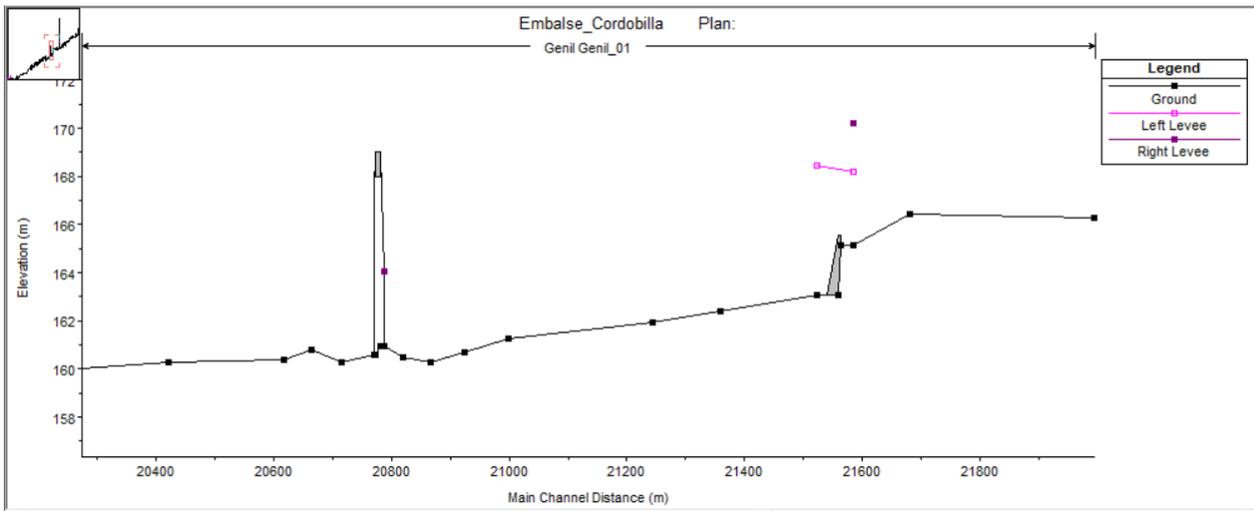


Figura 54. Estructuras 3 y 4. Situación inicial.

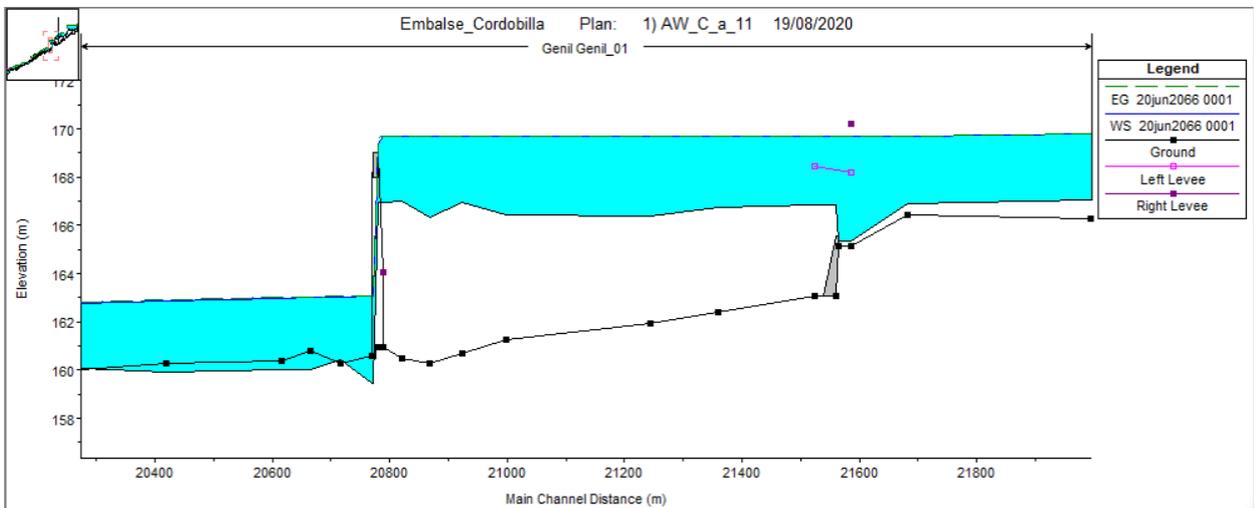


Figura 55. Estructuras 3 y 4. Caliza Triturada.

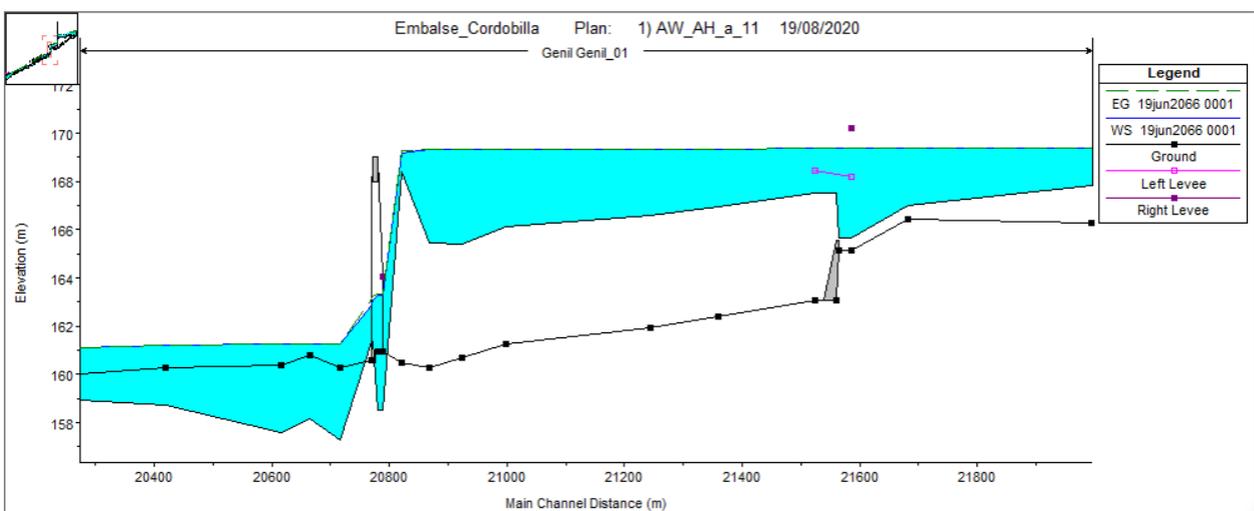


Figura 56. Estructuras 3 y 4. Arena Hormigón.

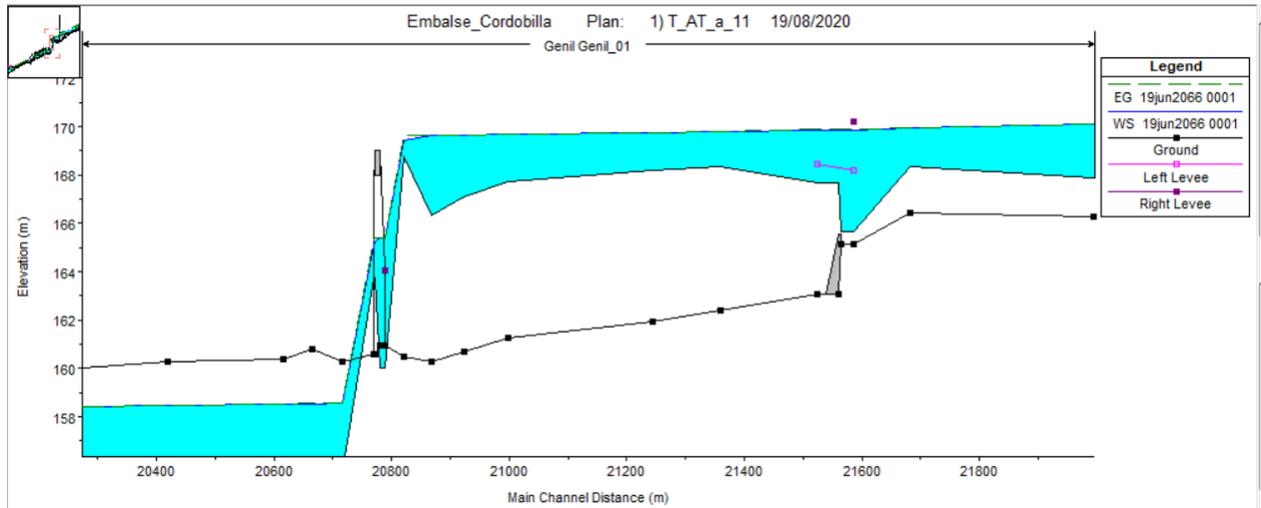


Figura 57. Estructuras 3 y 4. Arena Triturada.

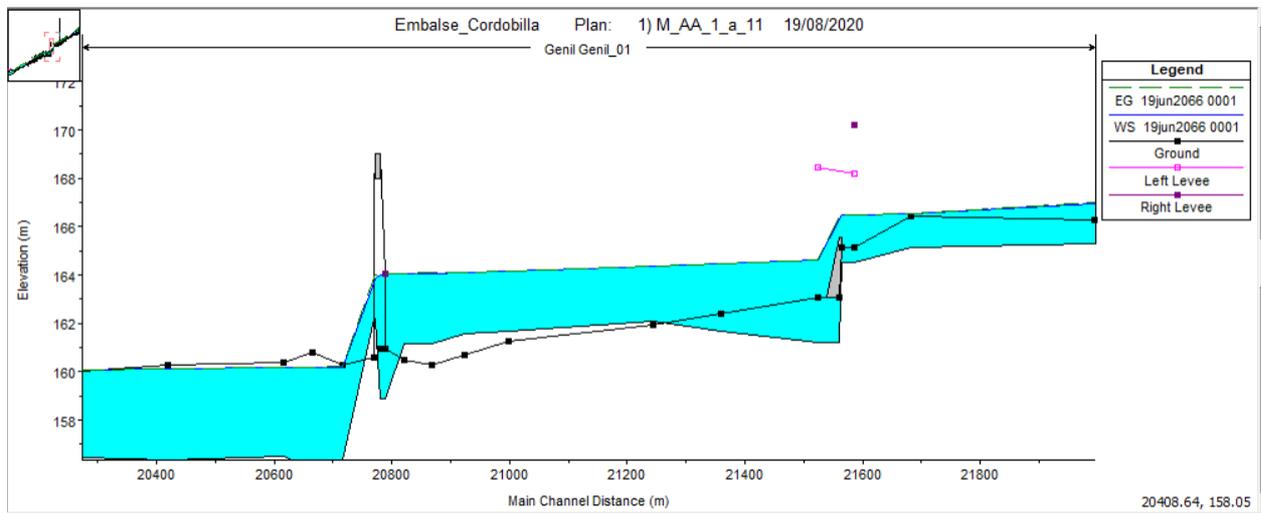


Figura 58. Estructuras 3 y 4. Arena Arcillosa 1.

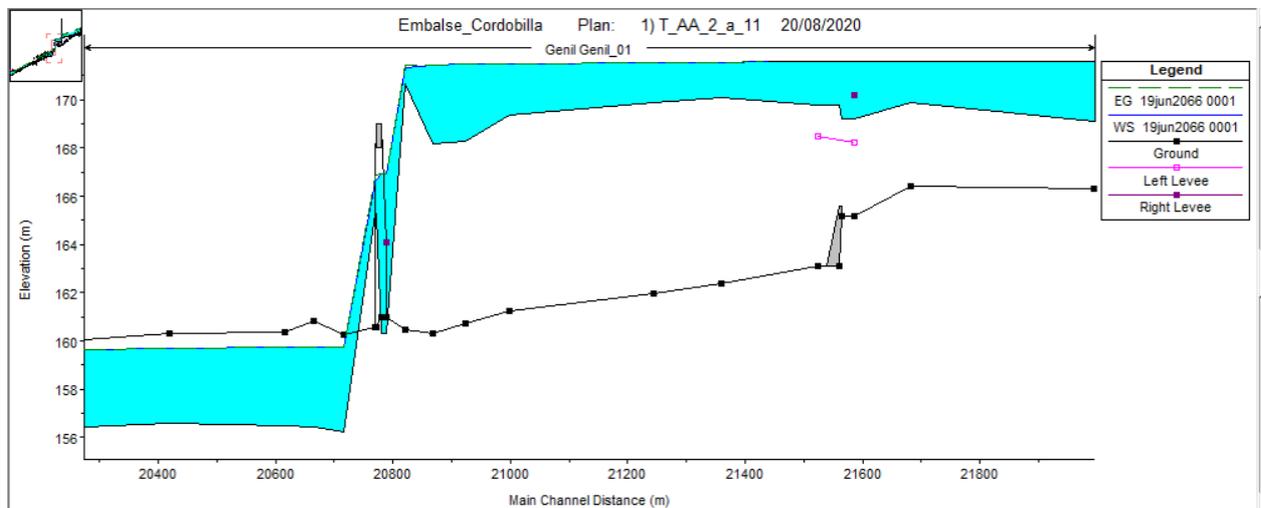


Figura 59. Estructuras 3 y 4. Arena Arcillosa 2.

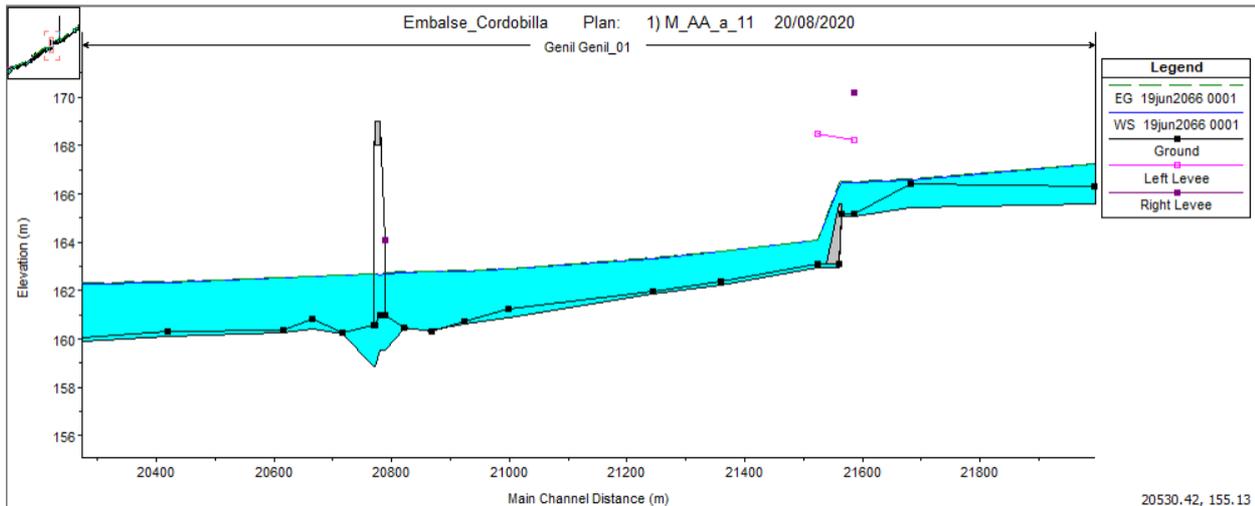


Figura 60. Estructuras 3 y 4. Arcilla Gravosa.

En las figuras, las superficies grises representan el azud (estructura 3) y tablero de la estructura 4. La línea negra con vértices de cuadros representa la altura del lecho inicial. En cada caso, la divisoria entre azul y blanco representa la altura del lecho en situación final para cada material.

En este tramo el modelo se presenta bastante inestable. La arena arcillosa 2 y los materiales más gruesos presentan sedimentación aguas arriba del azud, pero es más llamativa la sedimentación que se origina aguas arriba del puente y que alcanza al propio azud. Estos modelos presentan una gran acumulación de material en el puente, acompañada de una gran erosión. Esta situación origina erosión aguas abajo del puente, seguramente debido a la gran altura de la que cae el agua, provocado por la acumulación de sedimento aguas arriba. Por el contrario, la arena arcillosa 1 y la arcilla gravosa muestran resultados más estables (nuevamente materiales más finos), si bien muestran erosión en el puente. La arena arcillosa 1 presenta erosión también en el azud.

Si bien estos resultados son llamativos y su veracidad cuestionable, sí son útiles para establecer ciertas conclusiones. Es claro el hecho de que los puentes sufrirán erosión general y que esto podrá originar diversos problemas: además de los observados en el modelo, inestabilidad del puente. Este problema es muy común en pilas de puentes y, si no se actúa correctamente, muy importante. En un caso real, no se alcanzaría la situación simulada, evitando así gran parte de las consecuencias mencionadas.

4.2 Caso b)

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos para las distintas simulaciones propuestas, cuyo objetivo es determinar el impacto del aporte de sedimento procedente del dragado del embalse de Cordobilla. Como ya se expuso, las simulaciones se han llevado a cabo con dos materiales distintos: Caliza triturada y arcilla gravosa. En el **apartado 4.1**, se ha evidenciado su distinto comportamiento en el modelo. Para cada material, se han simulado distintos casos de aporte de sedimento:

4.2.1 Caso b.1

Se considera un dragado de 15 Hm^3 , la mitad de la capacidad total del embalse, y un aporte de 2.690 Tn/día durante 15000 días (≈ 41 años). El aporte se lleva a cabo aguas abajo de la presa, en el metro 34.419 del eje del modelo. En las figuras mostradas a continuación se presentan los resultados en dos instantes de tiempo distintos y para ambos materiales (tras 10 años de simulación y tras 30 años de simulación):

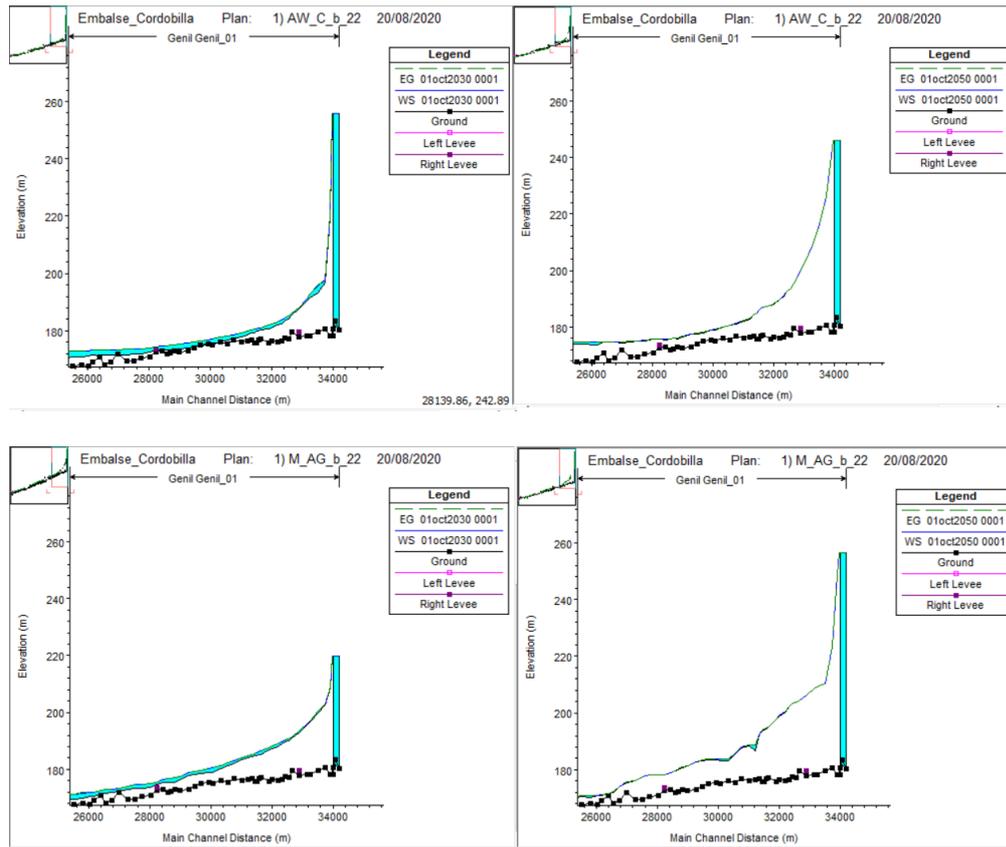


Figura 61. Caso b.1.
Arriba: Caliza Triturada.
/Debajo: Arcilla Gravosa.

La superficie blanca sobre la línea de puntos muestra en cada caso la acumulación de sedimento en el lecho.

Puede observarse la evidente acumulación de material en el punto de vertido. Esta posibilidad queda descartada al alcanzarse cotas de sedimentación demasiado elevadas. Tras esto, se realiza la prueba de repartir el mismo aporte en distintos puntos de vertido (apartado 4.2.2).

4.2.2 Caso b.2

En base a los resultados obtenidos en el apartado anterior, surge la idea de repartir la carga de sedimento definida en distintos puntos. Los puntos de vertido nuevos serán, en coordenadas del eje del río: 34.419 m, 30.089 m, 25.089 m, 20.004 m, 15.246 m y 10.028 m. De este modo, por cada punto entrarán 448.33 Tn/día durante 15000 días. En las figuras siguientes se muestra la situación al final, al terminar la simulación, para ambos materiales:

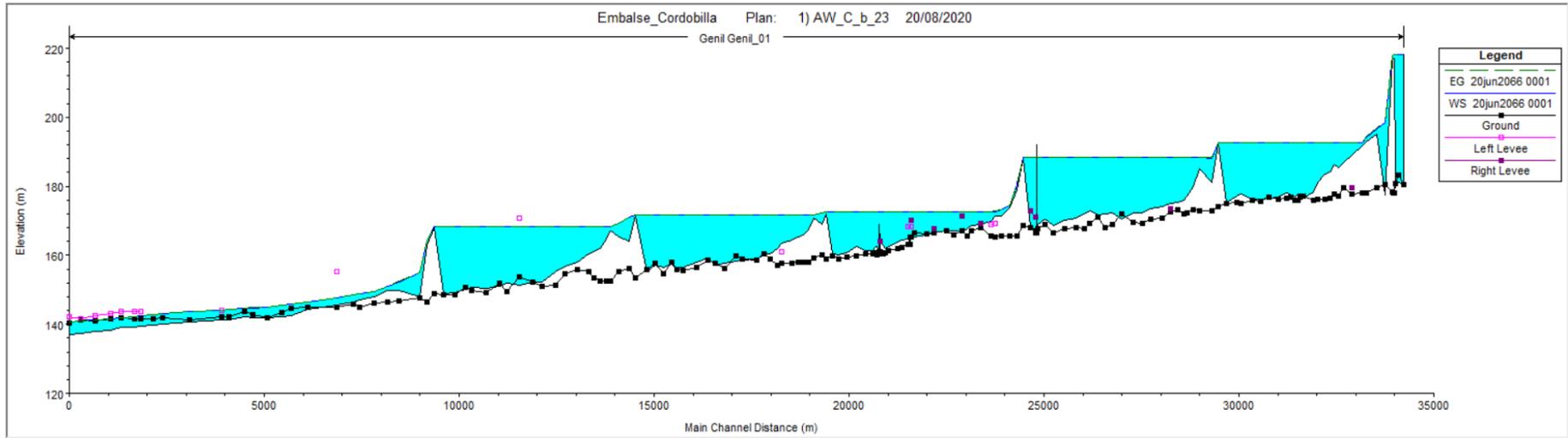


Figura 62. Caso b.2. Caliza Triturada.

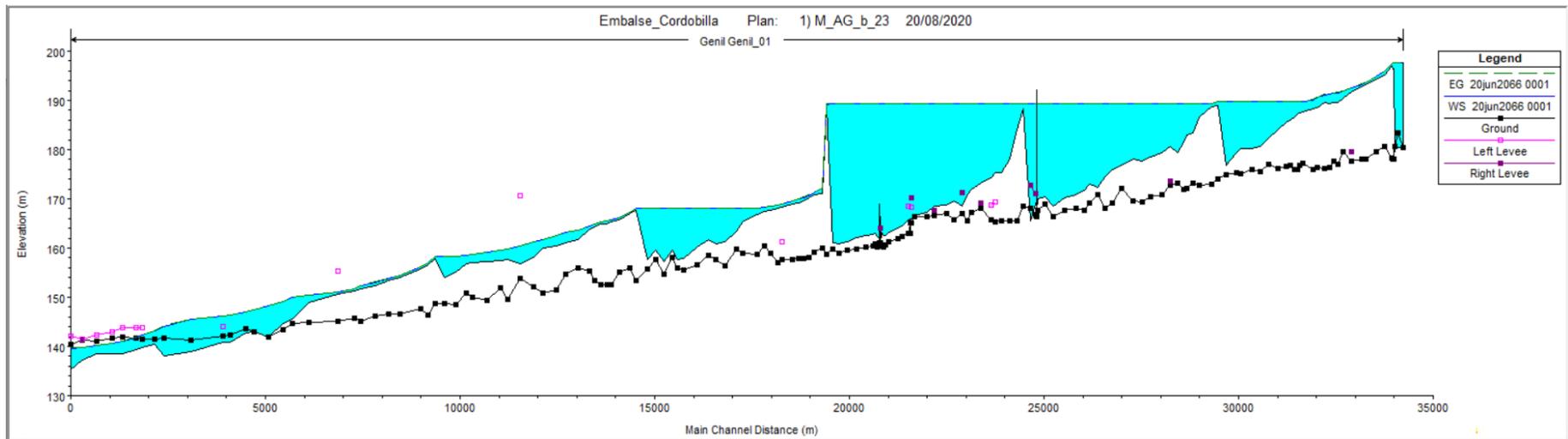


Figura 63. Caso b.2. Arcilla Gravosa

Puede observarse cómo, aun teniendo una sexta parte de entrada de material en cada punto, respecto al apartado anterior, el rendimiento de aporte del material sigue siendo demasiado elevado y se acumula en los distintos puntos de entrada.

Resulta interesante que las arcillas gravosas, que en el **apartado 4.1 a)** y en situación sin aporte de sedimento, tenían un comportamiento más estable que las calizas trituradas. Sin embargo, en esta nueva situación, su comportamiento resulta menos favorable.

Estos resultados llevan a simular nuevas situaciones con el objetivo de encontrar un resultado más satisfactorio.

4.2.3 Caso b.3

Para este caso, se reducirá la carga que entra por cada uno de los 6 puntos definidos en el **apartado 4.2.2**. Por cada entrada se aportan 269 Tn/día o, lo que es lo mismo, 10 camiones de 10 m³. Sin embargo, este rendimiento no tiene por qué ser el de dragado.

A partir de este apartado y para los siguientes, el rendimiento de dragado se desliga del rendimiento de aporte de sedimento al cauce (simplemente el primero ha de ser mayor que el segundo). Por ello se ha establecido un rendimiento de dragado elevado, de 8.000 m³/día, de modo que las actuaciones duren 4.125 días (dragando de este modo el embalse por completo), tiempo durante el cual se aportará sedimento al cauce diariamente.

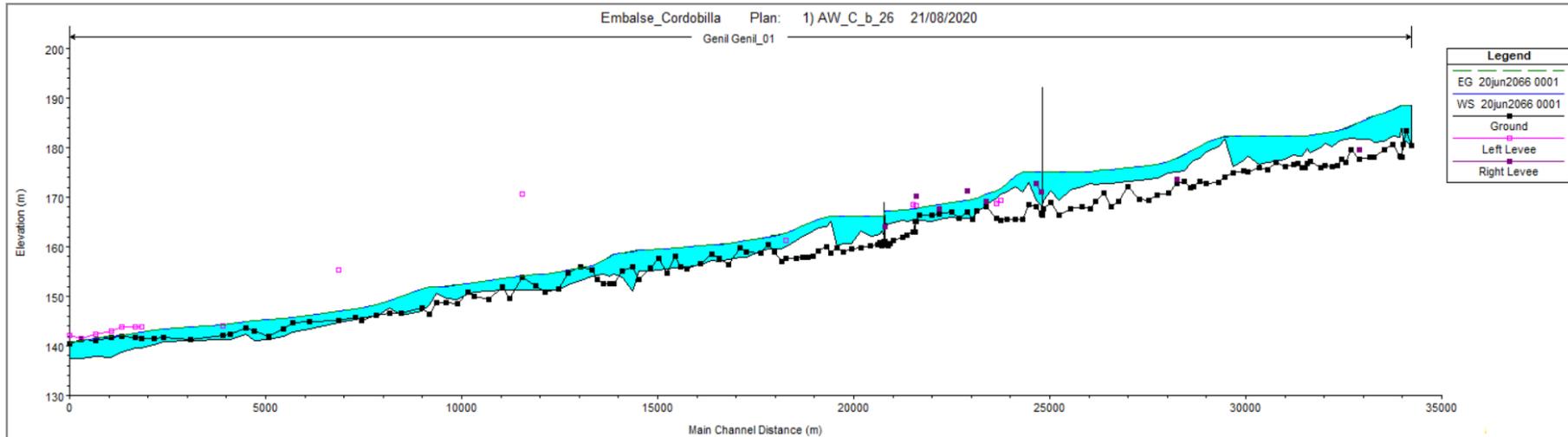


Figura 64. Caso b.3. Caliza Triturada.

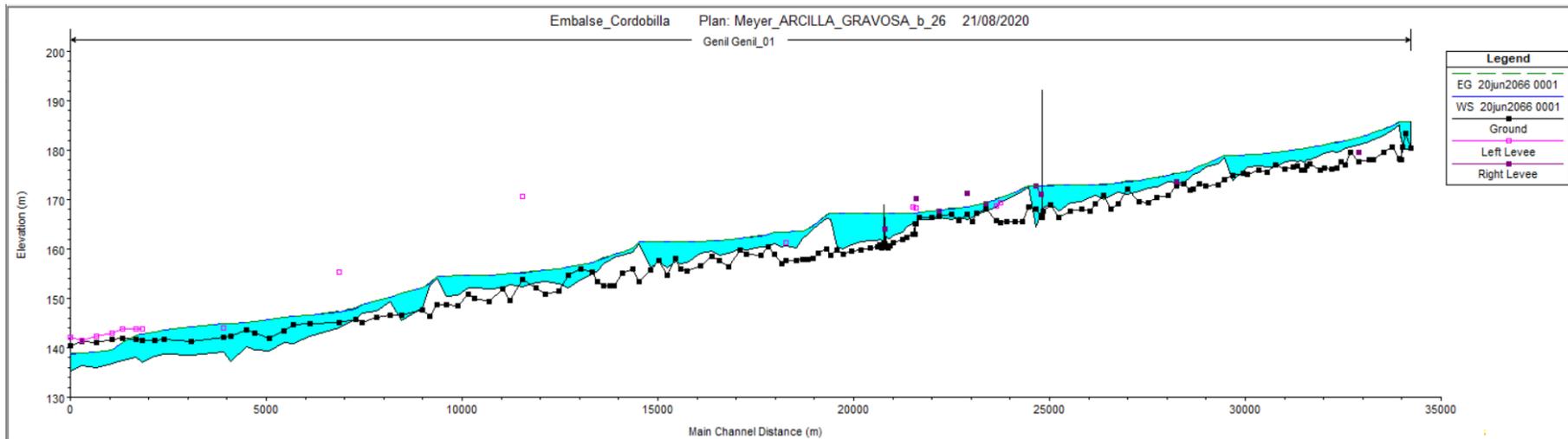


Figura 65. Caso b.4. Arcilla Gravosa.

En este caso, se ha reducido enormemente la cantidad de sedimento acumulado. Esto concuerda con el hecho de aportar menor sedimento. Sin embargo, aun se obtienen alturas de sedimento demasiado elevadas en los puntos de aporte.

Vuelve a ocurrir, como en todos los casos anteriores con aporte de sedimento, que la arcilla gravosa da lugar a mayores acumulaciones de sedimento que la caliza triturada. Se observan también para la arcilla considerables erosiones en la parte final del tramo.

Pese a que los resultados han mejorado, aún pueden hacerlo más si se reduce la carga de sedimento aportada.

4.2.4 Caso b.4

En base a los resultados anteriores, se pretende reducir el impacto del aporte de sedimento, manteniendo el mismo rendimiento que en el **apartado 4.2.3 b.3**, aunque lo vierte en un único punto de entrada. Se mantiene la duración de las actuaciones de 4.125 días.

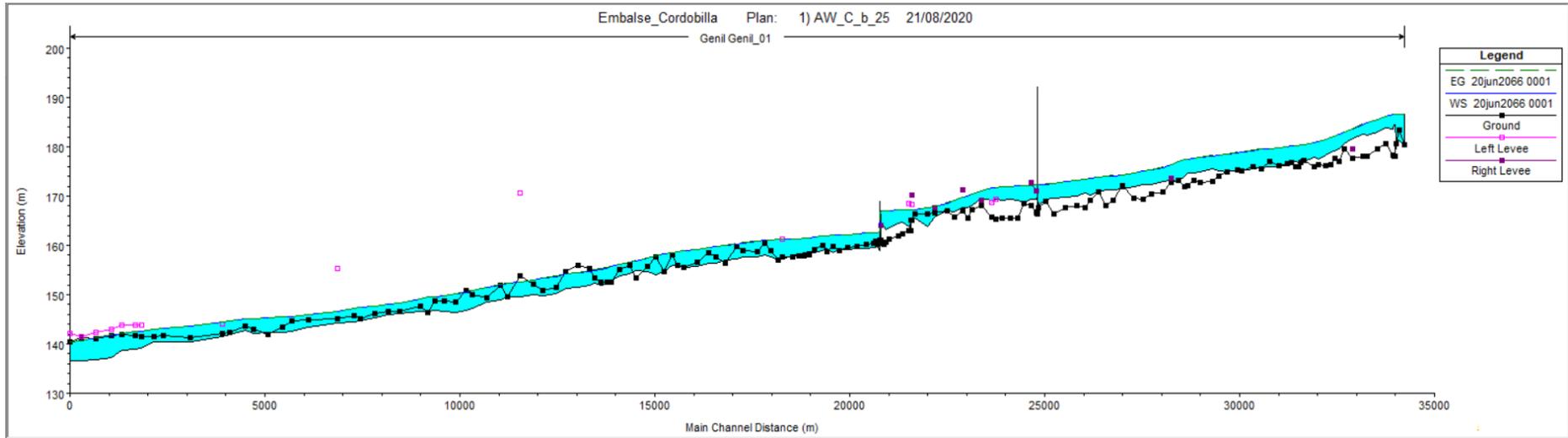


Figura 66. Caso b.4. Caliza Triturada.

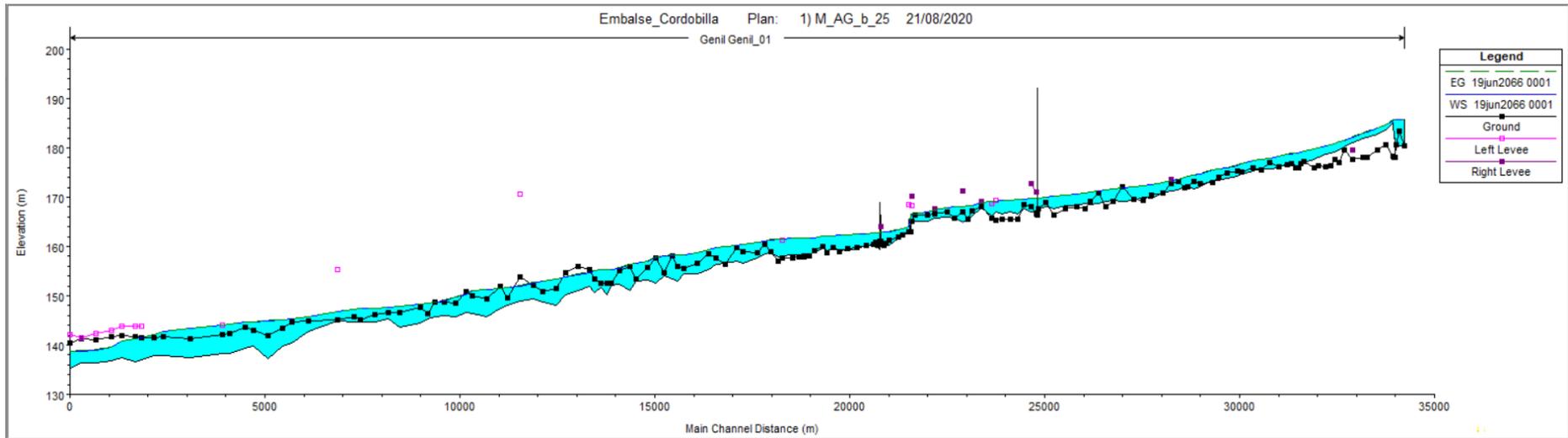


Figura 67. Caso b.4. Arcilla Gravosa.

En este caso, el impacto de aporte de sedimento se reduce mucho en la mayor parte del cauce. Los resultados son muy semejantes al comportamiento que tiene cada material en el **apartado 4.1**, a excepción del primer tramo, donde sí se aprecia la acción del aporte de sedimento.

Resulta interesante, en el caso de las calizas, que se aprecia menor deposición en las estructuras. Por lo general, el lecho varía poco respecto a la situación inicial.

Por último, en el siguiente apartado, se ha comprobado el efecto que tiene en el modelo un aporte menor, para intentar reducir la altura que alcanza el sedimento en el punto de vertido.

4.2.5 Caso b.5

En este caso, las condiciones de la simulación serán las mismas que en el **caso b.4**, salvo el rendimiento de entrada, que será de 135.5 Tn/día (el resultado de aportar la capacidad de 5 camiones de 10 m³ cada uno).

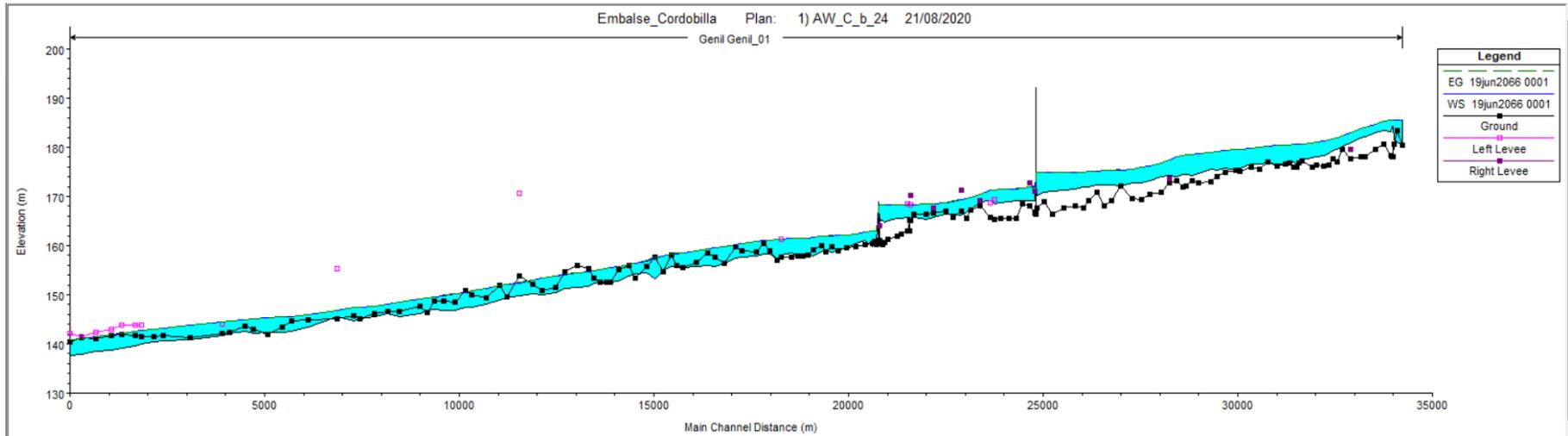


Figura 68. Caso b.5. Caliza Triturada.

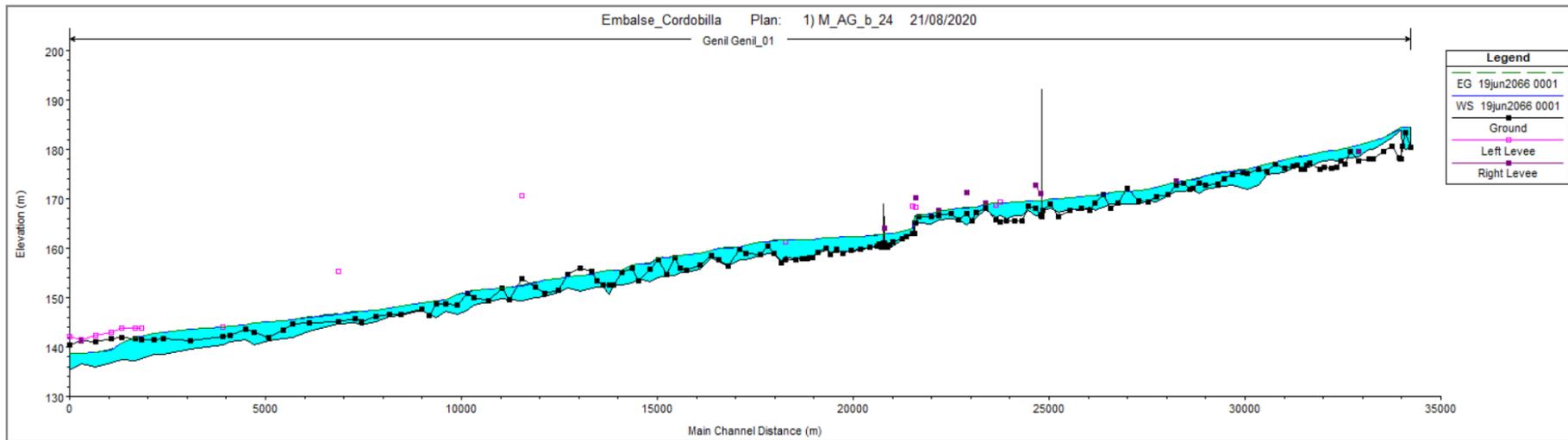


Figura 69. Caso b.5. Arcilla Gravosa.

Salvo la presencia de cierta altura ganada de sedimento en el punto de aporte de sedimento, el impacto de esta actuación parece escaso en el resto del cauce. Aun así, los resultados son muy similares a los anteriores y, por tanto, a la situación inicial. Parece que esta solución puede ser adoptada a la hora de reducir el número de camiones que tienen que viajar a vertedero. Sin embargo, ahorrando el doble de viajes a vertedero (caso anterior), los efectos en el cauce no empeorarían mucho.

Podría reducirse la carga aportada en el modelo, pero ello supondría transportar más camiones a vertedero (más coste) cuando, aparentemente, los resultados no variarían mucho (basándose en la tendencia en los dos últimos casos).

El número de camiones que verterán directamente al río en este caso será: 20.625, en algo más de 11 años que duraría el dragado del embalse de Cordobilla.

5 SOLUCIÓN TEÓRICA PARA EL PROBLEMA DE LA COLMATACIÓN EN EL EMBALSE DE CORDOBILLA

El estado colmatado del embalse de Cordobilla ya ha sido introducido en este trabajo. En los años 50, cuando este embalse fue construido, el problema de la interrupción del transporte de sedimento no era considerado al diseñar la presa. Hoy en día es un aspecto más presente a la hora de diseñar nuevos embalses y presas y, de hecho, existen numerosas soluciones para afrontarlo. Como se verá más adelante, es más sencillo plantear una solución durante el diseño de un embalse que cuando este ya está creado, como es el caso del embalse de Cordobilla.

Se busca, además de una solución al problema de la colmatación, una actuación que permita el paso de la forma más natural posible del sedimento aguas abajo del embalse. Se intenta de esta forma, que el cauce recupere un estado similar al original, previo a la construcción de la presa.

5.1 Diferentes soluciones contra la colmatación de embalses

En cuanto a las técnicas que existen para combatir la colmatación excesiva en embalses, éstas se agrupan en las siguientes categorías: Reducción de la erosión aguas arriba del embalse, minimizar la deposición en el embalse y permitir la sedimentación.

La primera categoría consiste en reducir la carga de sedimento que recibe el embalse. Esto entra en conflicto directo con el objetivo descrito anteriormente: permitir el paso de sedimento aguas abajo de la presa y recuperar un estado más natural del río Genil.

Parecen más adecuadas, para el objetivo de este trabajo, las técnicas dedicadas a permitir el paso de sedimento a través de la presa o las que permiten su acumulación para después retirarlo y, de ser posible, devolverlo al cauce aguas abajo.

5.1.1 Técnicas que minimizan la deposición de sedimento

- a) *Offstream Reservoir*. Técnica consistente en la construcción de un canal elevado a modo de by pass, colocado de modo que sólo el agua limpia (libre de la mayor parte de carga de sedimento) entre en él. Esta agua es la que pasa a acumularse en el embalse, mientras que la que fluye más cerca del fondo permanece en el cauce principal. Esto supone que el embalse no está situado en el cauce, sino que se forma por derivación de agua desde otro punto que sí pertenece al cauce. Debido a esto, parece improbable la implementación de esta técnica en un embalse ya existente. Debe disponer de un desarenador en la entrada y requiere del dragado periódico del material más fino. Aun así, supone una técnica muy eficiente de reducción de la sedimentación en embalse.

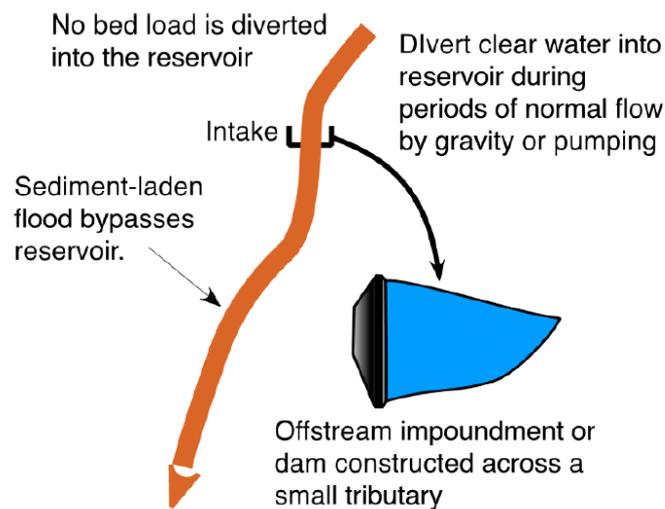


Figura 70. Esquema Offstream Reservoir.

- b) *Flood By pass*. Esta técnica, al igual que la anterior consiste en la implementación de un by pass. A diferencia del *Offstream Reservoir*, se deriva el sedimento y se deja pasar el agua limpia. La derivación se lleva a cabo mediante un vertedero que retendrá el sedimento que fluye por la parte inferior del calado. La carga de sedimento derivada se transporta por canal o por túnel al cauce aguas abajo de la presa, manteniendo de este modo el transporte de sedimento natural del cauce.

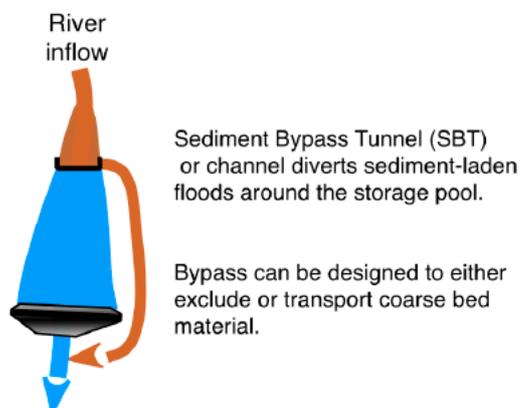


Figura 71. Esquema Flood by pass (1).

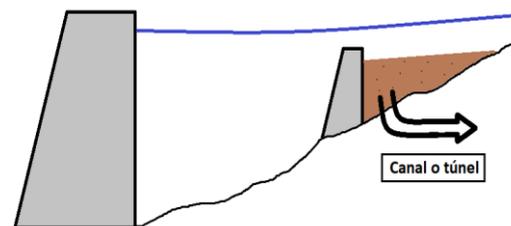


Figura 72. Esquema Flood by pass (2).

Una ventaja de este by pass respecto al anterior es que es posible implementarlo en embalses ya existentes. Además, ofrece la posibilidad de derivar sedimento suspendido y carga de lecho o solamente sedimento suspendido.

Como inconveniente, el canal o túnel está expuesto a fenómenos de abrasión provocado por el material más grueso.

- c) *Vent Turbid Density Current*. La carga de sedimento se sumerge y fluye bajo el agua limpia debido a la diferencia de densidad. Esta "corriente turbia" puede viajar grandes distancias por el talweg (línea de máxima profundidad del cauce), hasta acumularse en la presa formando un lago de lodo. La solución consiste en diseñar una salida para esta corriente en la parte inferior de la presa. Esto sin

embargo es costoso. Por otro lado, se presenta como una solución complicada para una presa ya construida. Una alternativa a esto es la instalación de un túnel aspirador que extraiga esta corriente.

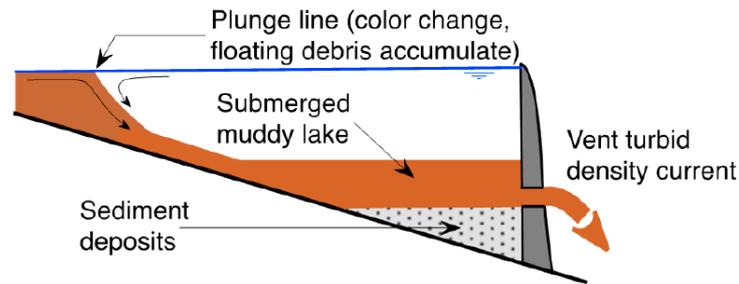


Figura 73. Esquema Vent Turbid Density Current.

- d) *Sediment Sluicing*. Esta técnica consiste en maximizar el paso de sedimento a través del embalse, disminuyendo el nivel de agua durante una crecida. De este modo aumenta la velocidad del flujo, manteniendo el sedimento en movimiento sin que decante. La principal diferencia con el by pass es que, en este caso, la salida de sedimento se produce en la presa. Se ha comprobado que la técnica es efectiva en embalses pequeños y alargados y que permite la salida de casi todo el sedimento que entra en el embalse, lo que reduce su impacto medioambiental. Es necesario aceptar un volumen importante de sedimento permanente, lo que supone menor capacidad del embalse. Es capaz de eliminar sedimento acumulado previamente, pero no todo. Resulta una alternativa más barata a realizar un dragado periódico.

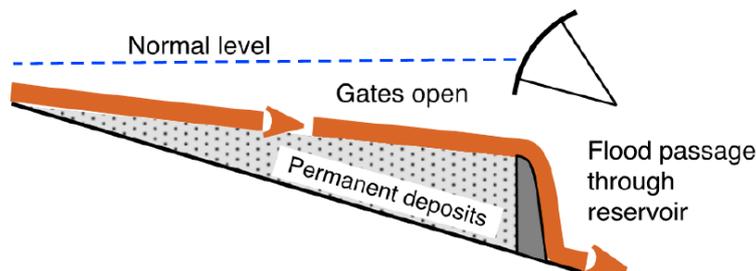


Figura 74. Esquema Sediment Sluicing.

5.1.2 Técnicas que permiten la sedimentación en el embalse

- a) Lavado a presión. Se conoce como *flushing* a la retirada del sedimento depositado mediante un “fregado” hidráulico. En concreto, el *pressure flushing* o lavado a presión consiste en la abertura de salida a bajo nivel que permita la salida de material cuando el embalse cuenta con un nivel del agua elevado. Se crea un “cono de fregado” alrededor de dicha salida. Por desgracia, no tiene demasiado efecto más allá del cono. No es muy efectivo para mantener la capacidad de un embalse.
- b) *Flushing o Empty Flushing*. Esta técnica consiste en el vaciado casi completo del embalse para permitir al río fluir y erosionar. El proceso puede requerir desde un día hasta más de un mes (depende del tamaño del embalse y el volumen de sedimento a desplazar) durante los cuales el embalse ha de permanecer vacío. Requiere de una salida en la parte inferior de la presa.

Llegados a este punto, es conveniente destacar una diferencia importante entre los métodos Flushing y Sluicing. Ambos requieren de una crecida que origine la energía necesaria para la extracción del sedimento. Sin embargo, mientras que el primero da lugar a elevados picos de concentración de sedimento (debido a que permite la acumulación previa de este), Sluicing no presenta estos picos al permitir un paso gradual del sedimento.

- c) Excavación Mecánica. Se diferencian dos técnicas distintas:
- Excavación seca. Requiere de un nivel bajo en el embalse. Puede quitar el sedimento grueso, pero le resulta más difícil extraer el sedimento más fino.
 - Dragado. Consiste en una excavación bajo el agua. Supone un alto costo. Mantener un régimen natural del transporte de sedimento requiere un dragado continuo. Supone una opción costosa.

5.2 Valoración de alternativas

Para el caso concreto del embalse de Cordobilla, conviene encontrar una solución que no requiera un cambio estructural en la presa. Esas soluciones pueden ser más interesantes en proyectos de presas aún por construir. Según este criterio, parece apropiado descartar:

- *Offstream Reservoirir*. Requiere situar la presa fuera del cauce.
- *Vent Turbid Density Current*. Es necesario situar una salida en la zona inferior de la presa. La presa de Cordobilla dispone de Compuertas en la parte superior.
- *Empty Flushing*. Razones similares a *Vent Turbid Density Current* para ser descartada.

La técnica *Sediment Sluicing* puede aplicarse en presas ya construidas, pero supone aceptar que el sedimento se acumule de forma permanente a la altura de las compuertas. Siendo uno de los problemas a solucionar la pérdida de capacidad del embalse de cordobilla, esta opción no parece la más adecuada.

En cuanto a la técnica *Cono de Lavado*, presenta el problema de su baja efectividad para mantener la capacidad de un embalse. Esta razón nuevamente hace descartar la opción de llevarla a cabo.

Las técnicas de *Excavación Mecánica* tienen efectividad en tanto que son capaces de recuperar la capacidad del embalse, pero no de mantenerla. Requieren de su realización periódica, lo que las hace caras en un largo periodo de tiempo. Por otro lado, no aseguran el transporte de sedimentos aguas abajo de la presa.

La opción más adecuada parece la realización de un *Flood By pass*. Requiere de una obra exterior y alejada de la presa ya existente y permite el transporte continuo de sedimento aguas abajo de la presa.

5.3 Flood by-pass para en embalse de Cordobilla

Para el caso concreto del embalse de Cordobilla, a continuación se propondrá un pre-diseño teórico. En primer lugar, se han de definir los puntos de toma del canal o túnel y el punto de vertido al río, aguas abajo del embalse. Como se observa en la **figura 75**, la forma del embalse invita a que el canal o túnel se diseñe por la margen izquierda del embalse. Esta idea se refuerza por el hecho de que las tomas para aprovechamientos del embalse y otras infraestructuras se encuentran en la margen derecha.

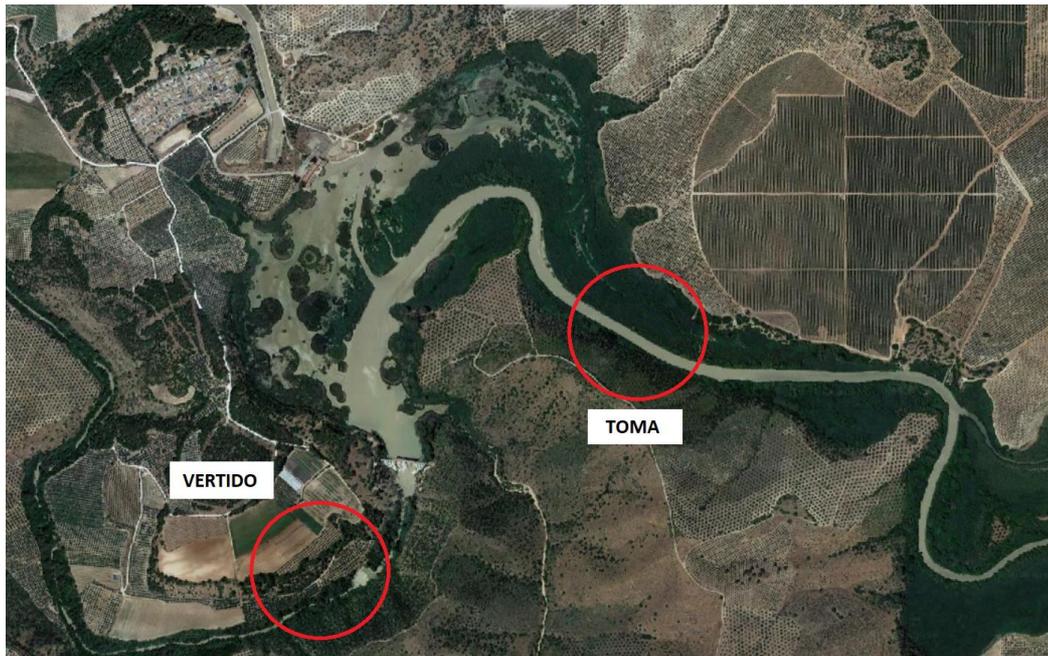


Figura 75. Zonas de toma y vertido.

Se ha propuesto un pre-diseño para un trazado en planta del canal o túnel. Se muestra en la siguiente figura:

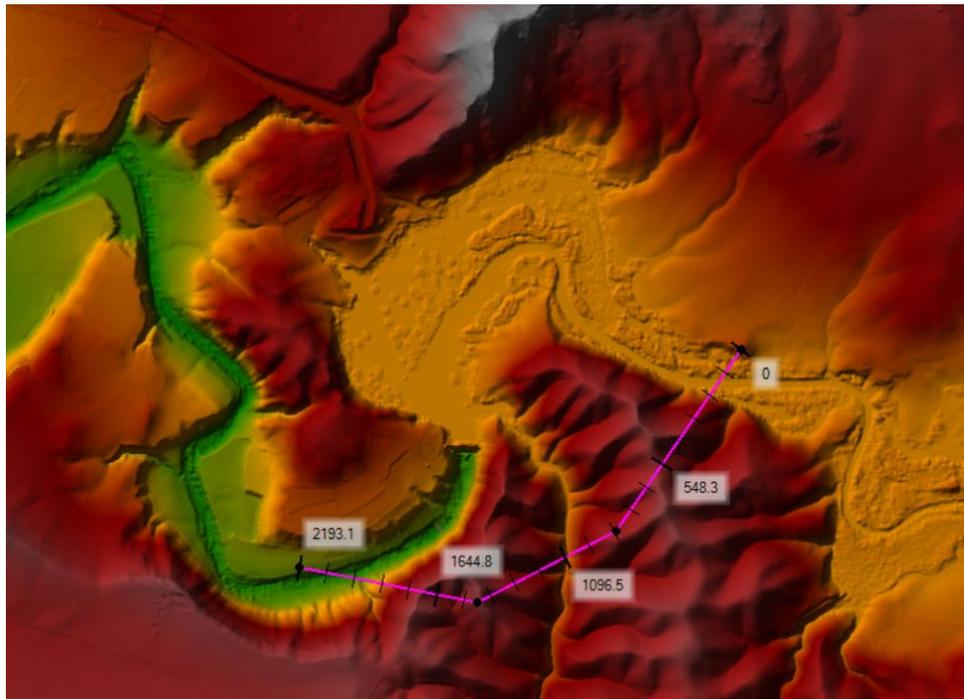


Figura 76. Trazado en planta del by-pass.

De este trazado se ha extraído un perfil longitudinal del terreno (**figura 77**). Puede observarse en él que la opción más adecuada es la de un túnel ya que, a pendiente descendente, ningún tramo del túnel discurriría sobre la cota del terreno.

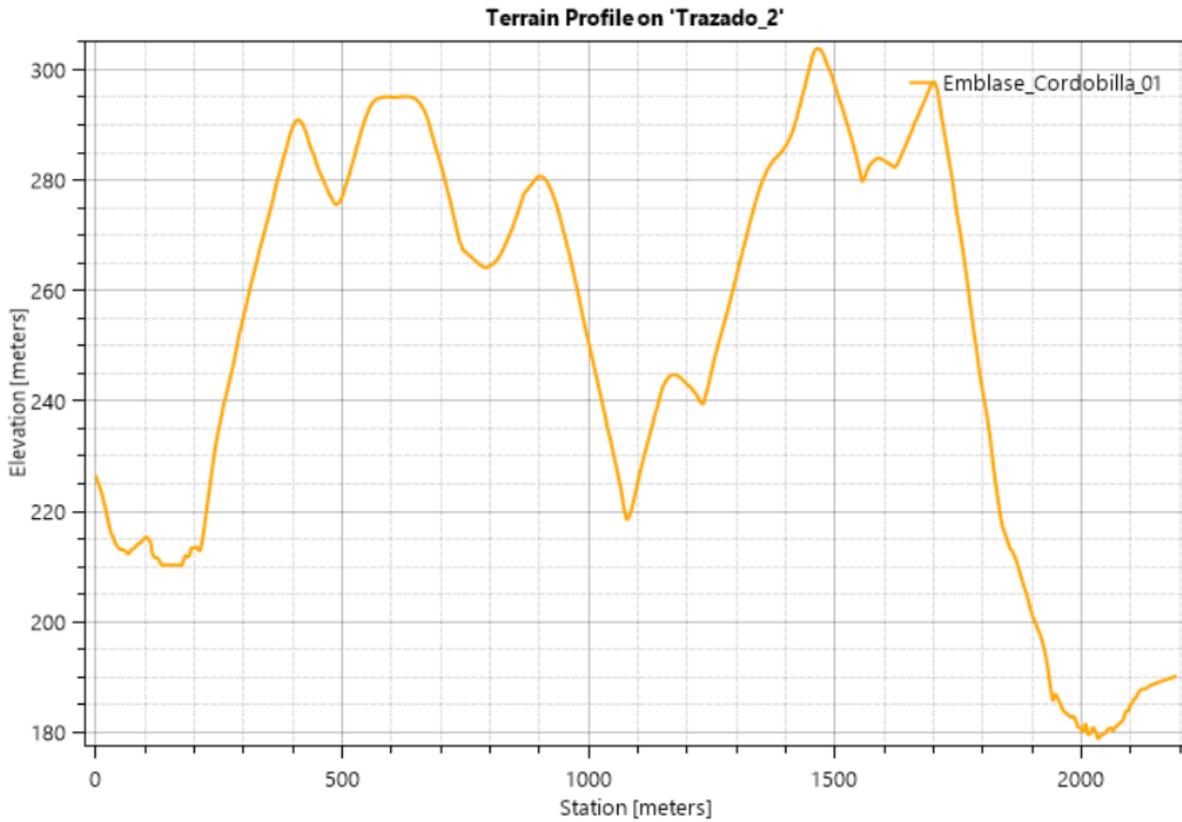


Figura 77. Perfil del terreno para el trazado propuesto.

En los laterales de la figura, se aprecian los cauces de toma (izquierda) y vertido (derecha). El trazado tiene una longitud aproximada de 1.800 m y un desnivel de unos 30 m. Esto supone una pendiente media de 0.01667.

6 CONCLUSIONES

Haber realizado este estudio con el software HEC-RAS ha permitido extraer ciertas conclusiones sobre su funcionamiento en el caso de estudios que contengan transporte de sedimento. Por otro lado, una parte fundamental de cualquier modelo son los datos empleados para confeccionarlo y, por supuesto, han tenido enorme influencia en este estudio. Esto es así, principalmente, por la poca información disponible sobre el tipo de material presente en el lecho para el tramo de estudio del río Genil.

El no disponer de información sobre el tamaño de sedimento ha sido la razón de realizar distintas simulaciones considerando distintos tipos de materiales tipo. Esto supone no conocer el comportamiento real del lecho ante las situaciones simuladas, aunque si disponer de un abanico de situaciones posibles y, por ende, conocer distintas situaciones límites en la simulación.

Por otro lado, el empleo de distintos materiales permite realizar una comparación teórica de la influencia de cada material ante cierta condición de flujo o ante la caracterización geométrica modelada. Partiendo de este punto, se ha comprobado cómo los materiales finos se muestran más estables generalmente que los más gruesos ante la presencia de estructuras en el cauce. Para el caso en el que no existe aporte de sedimento, los materiales granulares han mostrado mayor erosión puentes, además de originar retenciones que afectan tanto aguas arriba como aguas abajo de los puentes.

Respecto a estos resultados, a causa de la poca información sobre ciertas estructuras y materiales del lecho y teniendo en cuenta que el modelo puede predecir un comportamiento real con mayor o menor efectividad, conviene no adoptar los resultados obtenidos como reales, sino como indicativos: quedan evidenciados ciertos problemas en estructuras, pero las magnitudes de estos deben tomarse como una estimación antes que como un valor real.

Resulta útil también hacer una comparación de los resultados con la “Analogía de la Balanza de Lane”. Según la misma, el aumento de sedimentación en un tramo supone un aumento de pendiente aguas abajo del mismo. Como se puede observar en los resultados aportados, los tramos con gran acopio de sedimento se traducen en descensos bruscos de pendiente por erosión en pilas. La propia analogía considera la relación entre la erosión y una disminución de la pendiente. Cuando se da la erosión en puentes, aguas abajo de las estructuras, se produce un gran descenso de pendiente buscando llegar a un punto de equilibrio. Resulta satisfactorio comprobar que los resultados aportados por HEC-RAS reflejan las consideraciones de Lane.

En cuanto al modelo con aporte de sedimento, el objetivo de este trabajo es comprobar la viabilidad de verter en el propio cauce todo el material dragado del embalse. Ha quedado demostrado que no es posible llevar esto a cabo, debido a los elevados rendimientos de aporte de sedimento que serían necesarios, para evitar una actuación demasiado prolongada en el tiempo. Queda la puerta abierta a administrar la cantidad de sedimento dragado, de modo que parte se vierta al cauce (ahorrando de este modo viajes a vertedero).

Esto último es aplicable en caso de buscar una recuperación a corto plazo de la capacidad del embalse. Sin embargo, tras la recuperación total o parcial, debería considerarse una solución a largo plazo para el problema de la colmatación. La valoración de estas posibilidades deja patente que la situación ideal (y cada vez más actual) es considerar este problema en la concepción y diseño de un embalse. Resulta más complicado solucionar el problema en embalses ya construidos. Sin embargo, existen soluciones como el dragado continuado (solución cara a largo plazo) o la construcción de un by-pass, solución escogida como la más adecuada.

El transporte de sedimento es un aspecto natural de la morfodinámica de un río y, más allá de los problemas que puede originar para cualquier obra civil, es conveniente procurar evitar que estas actuaciones dificulten, en la medida de lo posible, en transcurso y comportamiento natural de un río. La obra civil se encuentra en un proceso de conversión en el cual busca realizar actuaciones más “verdes” y permitir el paso natural de

sedimentos a través de las presas es un paso más en esta dirección.

En el contexto histórico, se habla sobre la actuación aprobada recientemente para solucionar el problema de colmatación en el embalse. La misma consiste en la construcción de un canal que discurra por la margen derecha de este. No considero que esta sea la mejor opción, aunque sí puede ser la más económica. Esto se debe a que esta solución no cumple con ninguno de los dos objetivos planteados en este estudio. Por un lado, no recupera la capacidad original del embalse (o parte de ella). Por otro lado, no permite el paso de sedimento aguas abajo de la presa, de modo que la colmatación continuará a largo plazo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- G. MATHIAS KONDOLF, RAFAEL J. SCHMITT. Dams, sediment discontinuity, and management responses. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation*. no. 3/2018, pp. 69-71
- GEORGE W. ANNADALE, TIMOTHY J. RANDLE, EDDY J. LANGENDOEN, ROLLIN H. HOTCHKISS, AND THE UNITED STATES NATIONAL RESERVOIR SEDIMENTATION AND SUSTAINABILITY TEAM (NRSST). Reservoir sedimentation management: a sustainable development change. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation*. no. 3/2018, pp. 72-75
- MARTIN J. TEAL. What is the international commission on large dams (ICOLD) doing about reservoir sedimentation? En: *hydrolink. Reservoir sedimentation*. no. 3/2018, p. 76
- NIKOLAIS P. EFTHYMIU, SEBASTIAN PALT, GEORGE W. ANNADALE AND PRAVIN KARKI. RESCON 2: a tool for rapid assessment of alternative options for managing sedimentation in reservoirs. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation*. no. 3/2018, pp. 78-79
- SANJAY GIRI, PRAMOD NARAYAN. On sediment-induced problems under the dam rehabilitation and improvement Project in India. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation*. no. 3/2018, p. 83-86
- TETSUYA SUMI, SAMEH A. KANTOUSH. Innovative strategies for managing reservoir sedimentation in Japan. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation. Part 2*. no. 4/2018, p. 100-104
- WENHONG CAO, CHUNJING LIU, LEILEI GU. Reservoir sedimentation management in China. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation. Part 3*. no. 2/2019, p. 36-39
- FÉLIX FRANCÉS. Improved estimation of long term sediment input to reservoirs. En: *hydrolink. Reservoir sedimentation. Part 3*. no. 2/2019, p. 40-41
- RAFAEL COBO. Los sedimentos en los embalses españoles. En: *Ingeniería del Agua*. Diciembre 2008, Vol. 15, no. 4
- G. MATHIAS KONDOLF. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. En: *AGU. Publications, Earth's Future*. 23 MAY 2014, no. 2, pp. 258-280
- GREGORY L. MORRIS. Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation. En: *MDPI, water*. 19 March 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/journal/water>
- RAUL S. ESCALANTE. *Ingeniería de dragado*. Escuela de graduados en ingeniería portuaria. Abril 2014, pp. 151-174
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. *User's Manual*. HEC-RAS River Analysis System. Version 5.0, February 2016. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. *Hydraulic Reference Manual*. HEC-RAS River Analysis System. Version 5.0, February 2016. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>

