

INSTITUTO EUROMEDITERRÁNEO DEL AGUA

**ANÁLISIS DE CAUDALES
ECOLÓGICOS EN CABECERA
DEL TAJO MEDIANTE MÉTODOS
HIDRÁULICOS**

ANÁLISIS DE PERÍMETRO MOJADO

Francisco Cabezas

Francisco Gomariz

Diciembre 2021

ÍNDICE

1. Introducción.....	9
2. Régimen de caudales ambientales. Aspectos metodológicos.....	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Métodos hidráulicos	11
3. La cabecera del Tajo.....	14
3.1. Especificaciones técnicas	14
3.1.1. Modelación hidráulica	14
3.1.2. Identificación y selección de tramos.....	14
3.1.3. Construcción del modelo geométrico	17
3.1.4. Rugosidades del cauce y la llanura de inundación.....	23
3.1.5. Condiciones iniciales y de contorno	25
4. Análisis de los tramos.....	26
4.1.1. Tramo 1. Estremera.....	27
4.1.2. Tramo 2. Villamanrique de Tajo.....	30
4.1.3. Tramo 3. Aranjuez	32
4.2. Síntesis de los análisis realizados	35
5. Resultados obtenidos	37
5.1. Introducción.....	37
5.2. Perímetros mojados	37
5.3. Impacto paisajístico. Perfiles de la lámina de agua.....	38
6. Conclusiones	44
7. ANEXO. Geometría de las secciones.....	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las ARPSIs presentes en el sistema de explotación de Cabecera.....	15
Figura 2. Ejemplo del problema de altura de la lámina de agua detectado en el análisis previo de la información. Detalle de la ARSPI ES030-02-01-03 (Zorita de los Canes).....	16
Figura 3. Ejemplo del problema de cotas detectado en la ARSPI ES030-04-01-01).	20
Figura 4. Ejemplo del problema de cotas. Secciones transversales representando las diferencias de altura de la lámina de agua.....	21
Figura 5. Geometrías de los modelos acoplados 1D-2D en las zonas finalmente estudiadas.....	22
Figura 6. Obtención de la rugosidad de Manning a partir de los usos del suelo del SIOSE, revisada a partir de la Ortofotografía del PNOA (IGN, 2021). ARSPI ES030-03-01-02.	24
Figura 7. Esquema de azudes y puntos singulares de Bolarque-Aranjuez.....	26
Figura 8. Situación de las áreas de análisis	27
Figura 9. Tramo 1. Estremera	28
Figura 10. Tramo 1. Estremera. Segmento de las inmediaciones de Fuentidueña.....	29
Figura 11. Tramo 1. Estremera. Perfil del terreno	30
Figura 12. Tramo 1. Estremera. Secciones representativas elegidas.....	30
Figura 13. Tramo 2. Villamanrique de Tajo.....	31
Figura 14. Tramo 2. Villamanrique. Perfil del terreno	31
Figura 15. Tramo 2. Villamanrique. Secciones representativas elegidas.....	32
Figura 16. Tramo 3. Aranjuez.....	32
Figura 17. Tramo 3. Aranjuez (detalle).....	33
Figura 18. Tramo 3. Aranjuez. Perfil del terreno y lámina de agua	34
Figura 19. Tramo 3. Aranjuez. Secciones representativas elegidas	35
Figura 20. Tramo 3. Aranjuez. Perfiles de la lámina de agua para diferentes caudales.....	38
Figura 21. Tramo 3. Aranjuez. Perfiles de la lámina de agua para caudales mínimos	39
Figura 22. Tramo 3. Aranjuez. . Distribución de la diferencia de alturas de caudales mínimos 6-8.5.	40
Figura 23. Tramo 3. Aranjuez. Histograma de la diferencia de alturas de caudales mínimos 6-8.5	40
Figura 24. Tramo 3. Aranjuez. Diferencia de alturas de la lámina de agua para caudales mínimos 6-8.5	41
Figura 25. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5	41
Figura 26. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5 (detalle).....	42
Figura 27. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5 (detalle).....	43

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonas seleccionadas para el análisis	17
Tabla 2. Fuentes de información utilizadas para la generación de las geometrías.....	18
Tabla 3. Principales características de las geometrías generadas	21

1.INTRODUCCIÓN

La reciente publicación de los borradores de planes hidrológicos de las demarcaciones ha dado lugar a diferentes revisiones de sus determinaciones en relación con los regímenes de caudales ecológicos.

En España, y en el caso concreto de la planificación hidrológica del Tajo, en su parte española, un problema de especial importancia es el relativo a la fijación de caudales ambientales en el tramo de cabecera del río Tajo situado aguas abajo de los embalses de Entrepeñas y Buendía, hasta Aranjuez.

Aguas arriba de los grandes embalses reguladores los flujos circulantes por los cauces son en general muy poco alterados, y la circulación es sensiblemente la correspondiente al régimen natural. Aguas abajo de Aranjuez el régimen es ya muy alterado y se produce la incorporación de las aguas del río Jarama, con caudales superiores a los del propio Tajo, que pasan a ser los dominantes hacia aguas abajo. El tramo señalado, de Bolarque a Aranjuez, presenta por tanto un interés singular desde el punto de vista de sus requerimientos ambientales, requerimientos que tienen además importantes consecuencias socioeconómicas por su impacto sobre la disponibilidad de recursos con destino al acueducto Tajo-Segura.

Como una contribución más al estudio de esta cuestión, y en el contexto de los estudios técnicos de apoyo al proceso de planificación hidrológica, en el presente Informe se lleva a cabo un análisis de caudales ambientales en el área de cabecera del Tajo, empleando la metodología del análisis hidráulico.

Así como son numerosos los estudios sobre caudales ambientales realizados en la zona en los que se han aplicado tanto los métodos hidrológicos como los hidrobiológicos o basados en hábitats, no tenemos noticia de que se hayan empleado otros métodos como los hidráulicos, con los correspondientes análisis de sensibilidad de los flujos circulantes frente a descriptores geométricos de los cauces.

La importancia del tramo considerado justifica la realización de análisis y contrastes mediante todas estas metodologías, a las que debieran añadirse los métodos de carácter holístico, a partir de una rigurosa caracterización de las diversas funciones ambientales del tramo y los requerimientos hídricos para la satisfacción de esas funciones ambientales. La consideración de los cambios en los sistemas hídricos y la no estacionariedad asociada a estos cambios, tanto por la evolución de los sistemas de usos como por la evolución de las condiciones naturales, alteradas por cambios climáticos, debiera también ser considerada de forma explícita y sistemática.

Este es el paso siguiente que debiera abordarse ya en la planificación hidrológica, para una más rigurosa caracterización de los regímenes de caudales ambientales en casos como el de la cabecera del Tajo, donde adoptar valores mayores o menores de esos caudales puede acarrear importantes consecuencias socioeconómicas.

Para proceder a estos análisis se describirán en primer lugar estos métodos hidráulicos y sus especificidades en el contexto general de los procedimientos para la determinación de caudales ambientales, para proceder a su aplicación al caso de la cabecera del Tajo, en diferentes tramos fluviales, tal y como se describe en los capítulos que siguen.

2. RÉGIMEN DE CAUDALES AMBIENTALES. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Con antecedentes vinculados a las leyes de pesca, en los años 40 del pasado siglo, la primera identificación generalizada de caudales mínimos en España se llevó a cabo en los primeros planes hidrológicos de cuenca, aprobados en 1998, que pueden considerarse como el ciclo 0 de planificación hidrológica, anterior a la Directiva Marco del Agua.

Posteriormente, en la parte normativa de los Planes Hidrológicos posteriores a la DMA (ciclos de planificación 2009-2015 y 2015-2021) se aprobaron los regímenes de caudales ecológicos -en principio asimilados únicamente a los mínimos- para distintas masas de agua de tipo río en las diferentes demarcaciones, y desde hace décadas se ha venido desarrollando tanto la normativa reguladora para su desarrollo e implantación como los avances científico-técnicos para su mejor conocimiento y caracterización.

Es importante entender que la evaluación del régimen de caudales ambientales en un tramo fluvial es un problema complejo, con importantes implicaciones jurídicas y socioeconómicas, y para el que, en contra de lo que a veces parece entenderse, no existen aún criterios científico-técnicos comunes consolidados, ni una propuesta metodológica unificada operativa, robusta y universalmente aceptada.

En relación con las metodologías, y atendiendo a su diferente alcance, una primera distinción es la relativa a los métodos *locales*, que son aquellos que analizan el problema para un punto o tramo específico de la red fluvial, y los métodos *globales*, que evalúan los requerimientos ambientales a gran escala, en cualquier punto del territorio. Los primeros se asocian a estudios locales de tramos concretos, junto con modelos hidrológicos de cuencas agregados o distribuidos, mientras que los segundos se asocian a cualquier punto en estudios globales, junto con modelos hidrológicos distribuidos a escala continental o mundial.

Cabe asimismo diferenciar entre los métodos basados en estándares prescriptivos sobre los flujos que han de preservarse en los cauces, y que serían idóneos para su empleo por defecto en la planificación hidrológica regional con carácter general, y los estudios específicos de casos concretos, de especial relevancia o impacto, donde pueden realizarse determinaciones singulares más costosas y de mayor detalle.

En general suele admitirse que hay cuatro grupos de métodos de evaluación local o regional: los hidrológicos, los hidráulicos, los de simulación de hábitat y los holísticos. La literatura al respecto es muy amplia y diversa, y a ella nos remitimos. A los efectos del presente Informe centraremos la atención en los métodos hidráulicos que, hasta donde sabemos, aún no han sido aplicados de forma sistemática en la zona estudiada.

En los siguientes epígrafes se introducen brevemente estos métodos, procediendo a continuación a esa aplicación.

2.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS

Los métodos hidráulicos se basan en las relaciones existentes entre parámetros de la hidráulica fluvial en los tramos considerados y los caudales ambientales mínimos en esos tramos, entendiendo que ha de existir una relación entre los flujos mínimos circulantes por un cauce y su geomorfología.

Las relaciones entre los caudales de los ríos y la geomorfología fluvial son conocidas desde antiguo y se han verificado en numerosos lugares y muy diversas circunstancias. Son clásicas las que, para una sección dada del río, relacionan la velocidad, la anchura y la profundidad del agua en cada momento como funciones potenciales del caudal circulante en ese momento. Existen también relaciones potenciales entre estas variables cuando las características del cauce se miden a lo largo de diferentes secciones del río, bajo la condición de que el caudal en todos los puntos corresponda al mismo periodo de retorno.

Se han desarrollado diferentes metodologías basadas en esta hipótesis, entre las que destacan la del tirante de agua de las riberas, para los caudales de mantenimiento de cauces, o el perímetro mojado, para los caudales mínimos ambientales.

En general, estos métodos buscan identificar valores críticos o ambientalmente relevantes en los tramos fluviales, indicativos de situaciones disruptivas en cuanto a la caracterización de flujos, pero también pueden utilizarse, en sentido contrario, para contrastar la no existencia de ninguna singularidad, disrupción o diferencia apreciable de indicadores morfológicos en un intervalo de caudales dado, lo que revelaría la relativa indiferencia de los valores de caudal, dentro este intervalo, en relación con el indicador analizado.

2.2.1. Método de las riberas

El proceso de formación de un cauce, y su relación con la formación del correspondiente hábitat fluvial, viene determinado por los periodos de tiempo durante los que se produce la mayor erosión.

Numerosas evidencias empíricas sugieren que el trabajo de erosión y sedimentación que se realiza en los cauces perennes se produce fundamentalmente por caudales cercanos o ligeramente inferiores al nivel de cauce lleno, lo que se viene asimilando a caudales con periodos de retorno en general entre 1 y 2 años, o de 2'3 si se supone que la distribución subyacente es la de Gumbel. Tal circunstancia erosiva hace que estos valores de puntas ordinarias, que definen los cauces en la normativa española, sean valores relevantes desde un punto de vista ecológico. En términos de hidráulica fluvial estos valores relevantes son por tanto aquellos en los que el nivel del agua en el cauce se aproxima al tirante de agua en las riberas.

Hay que advertir que esta condición usual de periodo de retorno de 1'5-2 años puede no ser correcta con no carácter general, y según la hidrología del área -en concreto, de la distribución estadística de los caudales- puede llegar a valores de 5, 7 o hasta 10 años.

2.2.2. Método del perímetro mojado

El método del perímetro mojado supone que existe una relación entre el caudal y el perímetro mojado del cauce en las zonas de interés, asumiendo a su vez que existe una relación entre el perímetro mojado y la disponibilidad de hábitat. El caudal mínimo crítico correspondería al punto en el que se produce un cambio de pendientes en la curva q - pm . Bajo este punto el perímetro mojado decrece rápidamente con el caudal, por lo que no debiera ser sobrepasado.

Desde el planteamiento inicial del método, en los años 70 del pasado siglo, era común determinar este punto crítico de la curva por inspección visual, pero esta inspección se ve condicionada por las escalas relativas empleadas para los ejes del gráfico, de las que depende

su aspecto, por lo que debe emplearse algún procedimiento automático que elimine la subjetividad en la apreciación de los cambios de pendiente.

Así, para las curvas es común emplear valores escalados adimensionales, resultantes de dividir tanto q como pm por sus valores máximos, de forma que la curva reescalada $q_{max-pm_{max}}$ va del punto (0,0) al (1,1). Además de dividir por el máximo se han sugerido otras técnicas de escalado como la estandarización (restar la media y dividir por la desviación típica), o el escalado lineal 0-1 (restar el mínimo y dividir por la amplitud).

Ha de advertirse sobre la posibilidad de que el escalado introduzca distorsiones en los resultados del método del perímetro mojado, recomendando cautela en su aplicación y la posibilidad, en algunas circunstancias, de obtener mejores resultados con las variables originales, sin escalar. De igual modo, se ha sugerido emplear la media de caudales en lugar del máximo como cociente para el escalado.

Siguiendo el criterio del máximo, se ha sugerido que el punto de transición es aquel para el que la pendiente de la curva reescalada es 1, o aquel en el que se produce la máxima curvatura. Ambos criterios de curvatura y pendiente conducen a resultados similares y pueden ser evaluados analíticamente o implementados numéricamente con facilidad.

Por lo común el procedimiento se ha aplicado ajustando una función analítica, usualmente de tipo potencial, y obteniendo de forma analítica la curvatura -y su máximo- a partir de las derivadas analíticas de la función ajustada. De modo alternativo, cabe una aproximación no paramétrica, en la que se prescinde del ajuste de una función a la relación $q-pm$, y el cálculo de derivadas se realiza de forma directa a partir de los pares de datos observados empleando diferencias finitas. De una u otra forma, el resultado final es la identificación de una zona de disrupción geomorfológica, o de la ausencia de tal disrupción, según los rangos de caudales considerados.

Algunos análisis han mostrado en las relaciones $q-pm$ puntos críticos perceptibles, en los que caudales del 10% del valor medio anual protegen cerca de la mitad del perímetro mojado crítico, y caudales mayores del 30% protegen casi todo el perímetro.

Las relaciones entre caudal y perímetro mojado suelen establecerse en aquellas secciones fluviales de aguas someras donde la velocidad es mayor, preferiblemente a otras secciones con pozas y aguas más remansadas, con menores velocidades de flujo. La razón es que en las secciones rápidas la producción de macroinvertebrados es mayor, y son las primeras en secarse.

Desde el punto de vista operativo, el procedimiento de aplicación del método que seguiremos en este Informe es:

1. Reconocimiento del área y la información topográfico-batimétrica disponible.
2. Identificación de los tramos de análisis y construcción de modelos hidráulicos. Dentro del área total estudiada han de seleccionarse los tramos concretos de análisis, donde se van a determinar los perímetros mojados. Para ello se analizan los resultados del análisis hidráulico con dos criterios indicativos:
 - a. Tramos en los que la observación del perfil del terreno y la lámina de agua permita apreciar mayores pendientes y ausencia de efectos de remanso.
 - b. Tramos en los que las velocidades de flujo sean mayores y sus profundidades menores.
 - c. Si se dispone de información de especies y preferencias, tramos en los que la velocidad y profundidad satisfacen esos requerimientos (en general, velocidad inferior a un valor dado y calado mayor que otro).

3. Para cada tramo elegido, selección de varios transectos o secciones próximas representativas, aplicación del método descrito para cada una de ellas, y posible obtención de un valor agregado medio representativo.
4. Contraste de resultados y propuesta de valores de caudal mínimo recomendado en cada tramo, así como de márgenes o intervalos de indiferencia.

Un concepto estrechamente relacionado pero que puede tener un mayor sentido ecológico en algunas circunstancias es el de *perímetro mojado fluyente*, que se define de igual forma que el perímetro mojado convencional pero excluyendo aquellas partes de la sección del cauce donde las aguas están estancadas, entendiendo por tales aquellas con velocidad inferior a 0.01 m/s. Si se estimase oportuno, todos los análisis descritos se realizarían de idéntica forma pero empleando este concepto en lugar del convencional.

Asimismo, puede ser de interés realizar un análisis similar al de perímetro mojado pero empleando otra variable morfológica como el tirante de agua, ya apuntado en relación con las riberas.

3.LA CABECERA DEL TAJO

3.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

3.1.1. MODELACIÓN HIDRÁULICA

Un requisito esencial para el desarrollo de relaciones hidráulicas en los tramos fluviales es la realización de campañas de observación de datos de campo, junto con la disponibilidad de un modelo numérico que reproduzca el comportamiento hidráulico del cauce ante distintas situaciones de caudal, cambios geométricos, obstáculos, retenciones, derivaciones, rugosidades, etc.

Para el presente análisis se ha elegido el muy ampliamente conocido HEC-RAS como modelo de hidráulica fluvial internacionalmente admitido como estándar para este tipo de análisis. En sus versiones actuales RAS permite utilidades como flujos híbridos unidimensionales y bidimensionales, 1D-2D, acoplados, o transporte de sedimentos. En nuestro caso de cabecera del Tajo, los flujos son predominantemente unidimensionales y la diferencia 1D-2D no es realmente determinante, sobre todo para caudales medios y bajos como los que se analizan. El empleo de ambas técnicas se ha hecho fundamentalmente a efectos de investigación comparativa.

En el caso de los esquemas 1D, HEC-RAS trabaja generando geometrías mediante cortes o secciones transversales, utilizando la técnica de iteración de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones de Saint Venant 1D. En el caso de los modelos con esquemas en dos dimensiones (2D), se construyen las geometrías a partir de mallas irregulares no estructuradas, resolviendo las ecuaciones 2D mediante la aproximación de onda cinemática o las ecuaciones dinámicas de Saint Venant 2D, empleando la técnica numérica de los volúmenes finitos.

3.1.2. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TRAMOS

Empleando como criterio inicial básico para la selección de tramos el de la disponibilidad inmediata de cartografía digital de alta resolución, se ha recurrido al empleo del inventario de Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) desarrollado por el MITECO en el marco de los trabajos sobre inundabilidad en las diferentes cuencas hidrográficas. En la zona de cabecera del Tajo se han identificado un total de 23 áreas. La inspección de estas áreas mostró que en su mayor parte se carecía de la información batimétrica completa de los cauces, de manera que en el modelo digital del terreno las áreas sumergidas del cauce se asimilaban a la lámina de agua, previsiblemente en la fecha y hora en la que se hizo el correspondiente reconocimiento. Esta deficiencia invalida estos modelos del terreno como fuente de datos para los análisis hidráulicos en los cauces.

La figura adjunta muestra un mapa de las 23 zonas ARPSIs en el denominado sistema de explotación de Cabecera del Tajo, representadas en color magenta sobre la red fluvial con la codificación Pfafstetter, y señalando también en trazo grueso anaranjado las que, como se verá, resultaron finalmente elegidas para el estudio.

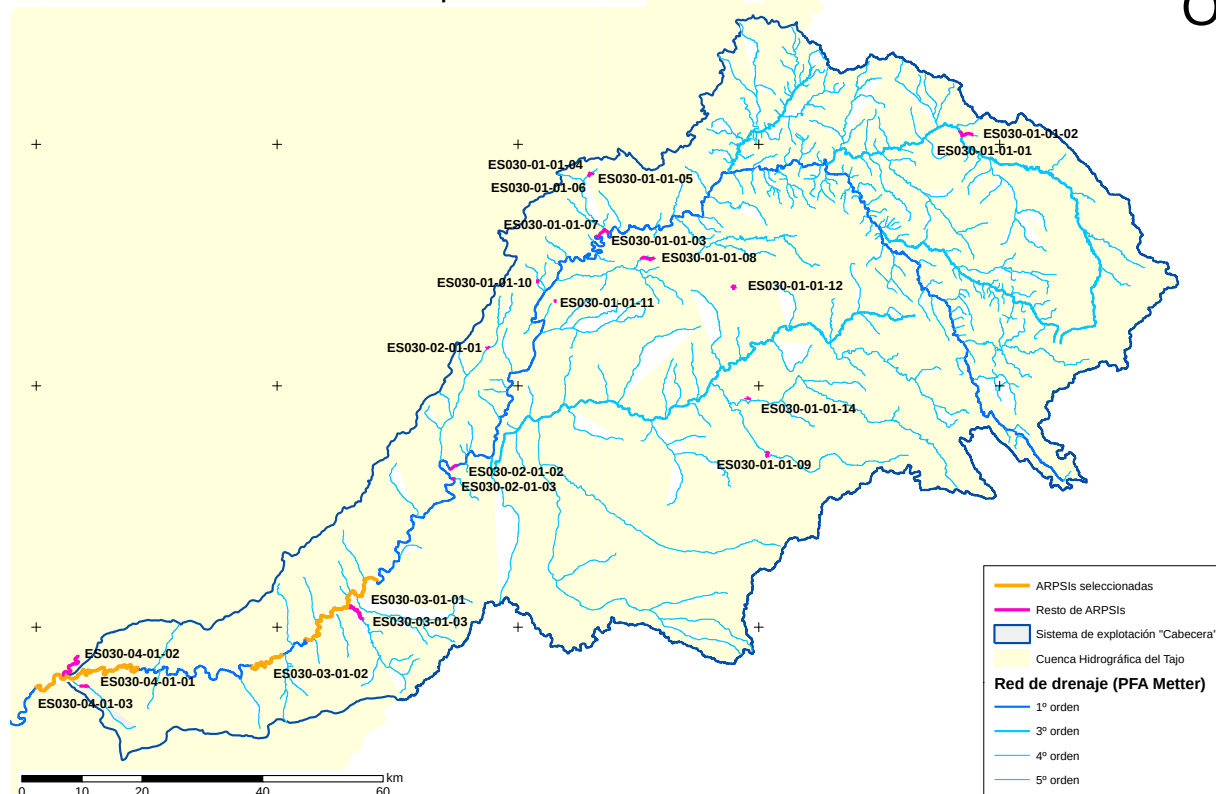


Figura 1. Localización de las ARPSIs presentes en el sistema de explotación de Cabecera

Abundando en esta cuestión, se han identificado dos fuentes básicas de información digital de elevaciones con alta resolución: los Modelos Digitales del Terreno de las áreas de alto riesgo de inundación fluvial (MDT01), que son archivos raster con información de cotas a 1x1 m de resolución y asociados a las ARPSIs, y los datos LIDAR (2ª cobertura, 2015-Actualidad), que son nubes de puntos LiDAR procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2021).

El problema en ambos casos es, como ya se ha señalado, que las cotas del terreno en los cauces son las referidas a la lámina de agua que circulaba por el cauce en la fecha de la toma de información, no siendo utilizable para estudios hidráulicos. Un ejemplo de este hecho, que resulta curioso en la información de referencia MDT01 de estudio de las ARSPIs, se puede ver en la figura adjunta, en la que la forma del lecho en línea recta de las curvas de nivel y los perfiles transversales 1 y 2 (líneas negras en la figura inferior) sugiere que están representando muy probablemente la forma característica de la cota de lámina de agua, coincidiendo en superficie esas líneas de fondo horizontales con la lámina de agua observada en la ortofotografía. Posteriormente, en el análisis de la zona de Aranjuez, se observará claramente esta situación al examinar el perfil del thalweg en ese tramo.

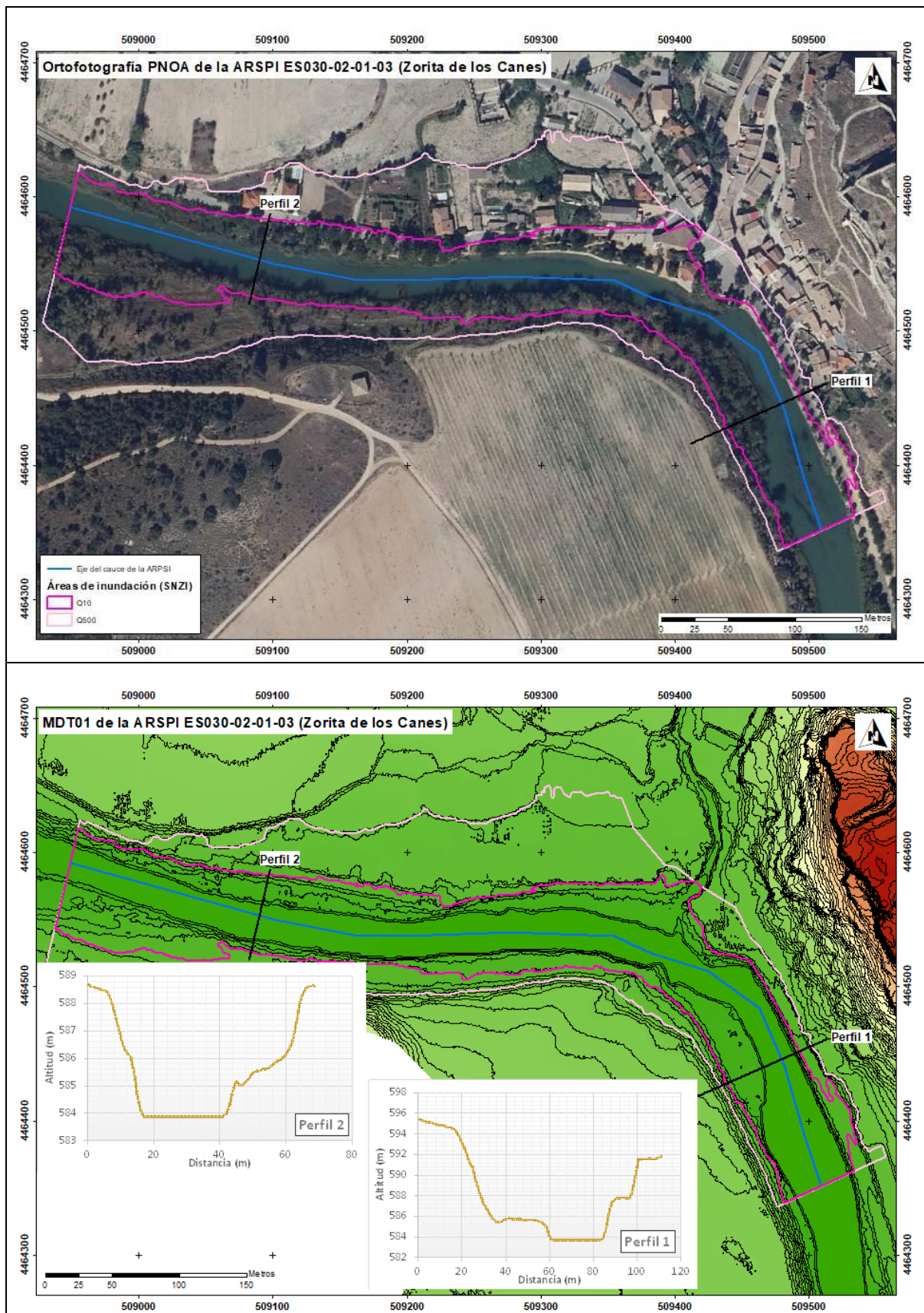


Figura 2. Ejemplo del problema de altura de la lámina de agua detectado en el análisis previo de la información. Detalle de la ARSPI ES030-02-01-03 (Zorita de los Canes).

Estas circunstancias llevaron a descartar algunas ARPSISs con datos de terreno inadecuados a nuestros efectos, y preservar finalmente tres ARPSISs como zonas de estudio para las que se comprobó que el lecho de cauce si quedaba correctamente representado en el MDT01 tras ser comparado con la interpolación realizada de los datos LiDAR. La tabla muestra las zonas seleccionadas, que son las ya mostradas en color naranja el mapa anterior.

Id	Código ARPSIS	Zona	Zona MDT de inundaciones	Est. ROEA más cercana	Long. (km)
A030101	ES030-03-01-01	Illana, Barajas de Melo, Almoguera, Estremera, Fuentidueña de Tajo, Santa Cruz de la Zarza	es030_mdt_ma drid13	A3248	24,21
A030102	ES030-03-01-02	Santa Cruz de la Zarza, Villamanrique de Tajo	es030_mdt_ma drid14	A3248	9,53
A040101	ES030-04-01-01	Aranjuez, Colmenar de Oreja, Ocaña, Seseña, Borox, Ontígola	es030_mdt_ma drid16	A3258 (y de baja 3011 más abajo y 3206 arriba)	29,21

Tabla 1. Zonas seleccionadas para el análisis

3.1.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

Una vez elegidos los tramos de análisis y extraídos sus modelos digitales de elevaciones, ha de construirse el modelo geométrico de los cauces. Este modelo se ha diseñado como un híbrido 1D-2D, con subtramos convencionales unidimensionales definidos mediante secciones transversales en los extremos aguas arriba y aguas abajo, y una zona intermedia bidimensional, que cubre la mayoría del tramo analizado, sobre la que se proyecta una malla de cálculo 2D de muy alta resolución.

Tanto las secciones transversales como el perímetro de la malla se han definido procurando incluir los polígonos de inundación asociados a los caudales de retorno Q10, Q100 y Q500 que, al igual que los MDT01 utilizados en este estudio, proceden del Sistema del Sistema Nacional de Zonas Inundables (MAGRAMA, 2011), y la *Revisión y actualización de la evaluación preliminar del riesgo de inundación* (EPRI 2º ciclo, CHT).

Para la caracterización del terreno se utilizaron los MDT01 y las nubes de puntos de LiDAR ya comentados además de la ortofotografía más reciente, procedente del Plan Nacional de Ortofotografía. En la tabla se resumen los recursos utilizados, disponibles en el Centro Nacional de Información Geográfica CNIG, y sus principales características.

Fuente	Fecha	Características
MDT01	2011	Resolución: 1x1 m
		Formato: *.asc
		Nº de hojas: 3
LiDAR cobertura	2ª 2019-2020 2016	Densidad: 1 pto/m ²
		Formato: *.laz
		Nº de hojas: 34 (2x2 km, 2019-2020) más 17 (1x1 km, 2016)
		Preclasificación y capa de errores: Si
Ortofotografía PNOA	2018 (Castilla-La Mancha)	Resolución: 25x25 cm
	2020 (Madrid)	Formato: WMS

Tabla 2. Fuentes de información utilizadas para la generación de las geometrías

La fuente principal utilizada ha sido el MDT01, al ser éste el oficial utilizado en el SNZI y en las EPRI, y poseer información de topografía en cauce, no disponible en el caso del vuelo LiDAR. Además, otra ventaja del MDT01 es que incluye la eliminación de infraestructuras como puentes o presas para permitir la continuidad del flujo en el cauce.

Continuando los análisis, en el caso concreto de la ARPSI ES030-04-01-01 (Id: A040101) se detectó también un error adicional en el MDT01 asociado a dicha ARPSI: el Modelo Digital del Terreno asociado a ésta (es030_mdt_madrid16) contiene un error en las cotas derivado de convertir a números enteros cotas de doble precisión con decimales. Como consecuencia de este hecho, los valores de cota codificados en el MDT son metros (msnm) en números enteros. Este problema quizás no sería crítico en zonas muy escarpadas, con pendientes importantes, y donde las resoluciones requeridas no fuesen muy elevadas, pero en casos como el que analizamos el redondeo a cotas enteras puede repercutir muy significativamente en los resultados obtenidos.

Debido a ello, en este caso concreto se procedió a un refusionado de Modelos Digitales del Terreno entre el MDT01 y la superficie interpolada a partir de LiDAR 2ª cobertura. Este proceso se ha automatizado en R-CRAN para posibilitar su reproducibilidad a otras áreas. El proceso puede resumirse de forma esquemática en los siguientes pasos:

1. Descarga, lectura y parcheo de forma automática de las hojas de nubes de puntos *.las disponibles en el área de estudio.
2. Filtrado de capas en el archivo resultante: Se consideran los puntos asociados a la clase 2 (terreno) y se eliminan los puntos asignados a la clase 7 (ruido). De forma adicional, se chequean los puntos no clasificados o sin clasificar (clases 1 y 0); de esta forma, se ha obtenido un MDT similar al oficial MDT01. De forma adicional, en este estudio se han creado para las tres zonas un Modelo Digital del Terreno considerando también la clase 6 (edificaciones), cuya ventaja es que permite tener en cuenta la desviación del flujo por las estructuras, aunque no se ha utilizado para dotar de correspondencia el MDT-LiDAR con el MDT01.
3. Generación del MDT-LiDAR mediante triangulación de los puntos (modelo TIN).
4. Obtención del Modelo Digital de Diferencias de cotas entre MDT01 y MDT-LiDAR.
5. Fusión de ambos modelos con una resolución de 1x1 m. Para ello, se genera previamente una máscara del cauce a partir de la estimación variable del valor de

máxima convexidad en el Modelo Digital de Diferencias; lo que permite obtener un Modelo Digital del Terreno de gran precisión en superficie, pero conservando las cotas del cauce.

En las figuras adjuntas puede verse un ejemplo de esta situación. Como se observa en ambas, en aquellas zonas fuera del cauce, la diferencia entre modelos es pequeña, asociada normalmente al redondeo al pasar a números enteros de las cotas. Así, por ejemplo, en el mapa inferior, que representa la diferencias entre ellos, es en la zona de cauce donde las diferencias, reflejadas por valores negativos, se hacen máximas, como consecuencia de una menor elevación del MDT01 que del modelo generado a partir de LiDAR.

Puede verse que el trabajo computacional requerido es intensivo, y exige el manejo tanto de información numérica en forma de tablas y matrices como de datos espaciales de alta resolución. Para apoyar a todas estas tareas se ha empleado el programa de análisis de datos R-CRAN bajo el *framework* RStudio, lo que permite, al ser un lenguaje de programación, implementar gran parte del proceso de trabajo mediante scripts de fácil usabilidad y reproducibilidad a otras zonas de estudio e intervalos de tiempo. Además, dispone de librerías espaciales para el procesamiento y análisis de datos masivos, como es el caso de los datos *Laser Imaging Detection and Ranging* (LiDAR) utilizados para construir parte de las mallas de entrada en HEC-RAS. En este trabajo se han utilizado los algoritmos disponibles en el paquete *lidR*.

Para el procesamiento y análisis del resto de la información espacial se han utilizado QGIS v3, e Idrisi-TerrSet, junto con las librerías para datos espaciales de R-CRAN, además de diferentes desarrollos propios programados en VBasic6 y Fortran.

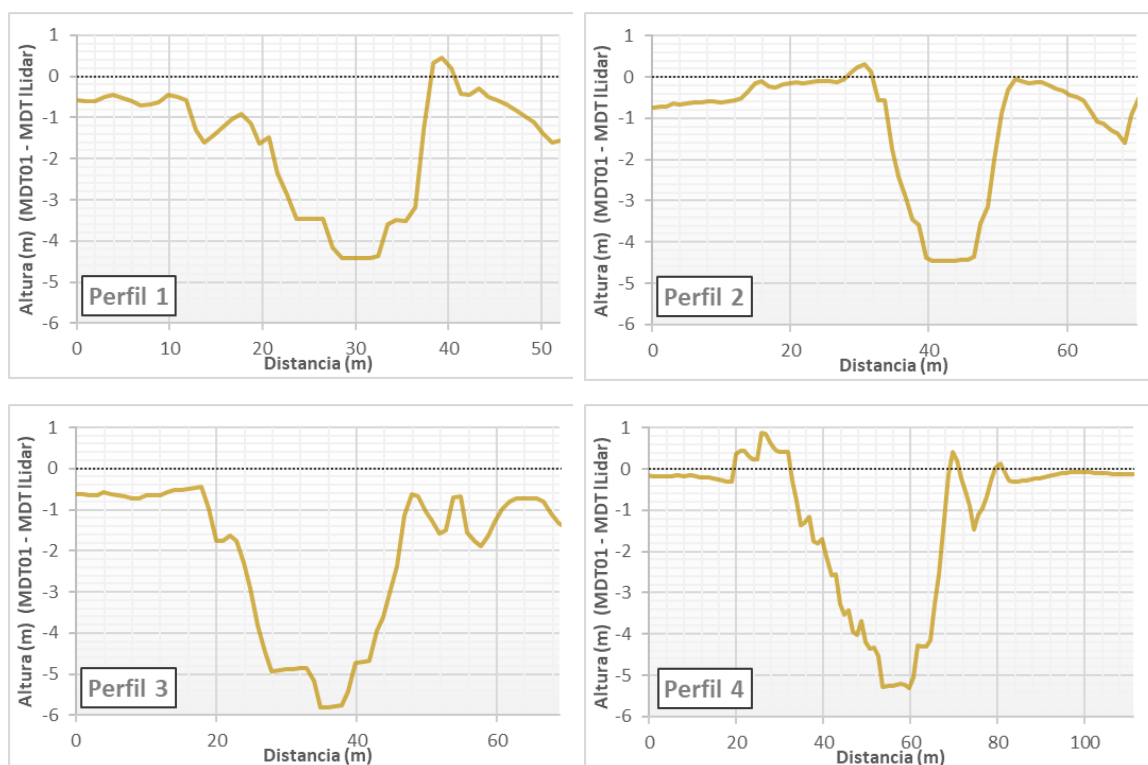


Figura 4. Ejemplo del problema de cotas. Secciones transversales representando las diferencias de altura de la lámina de agua.

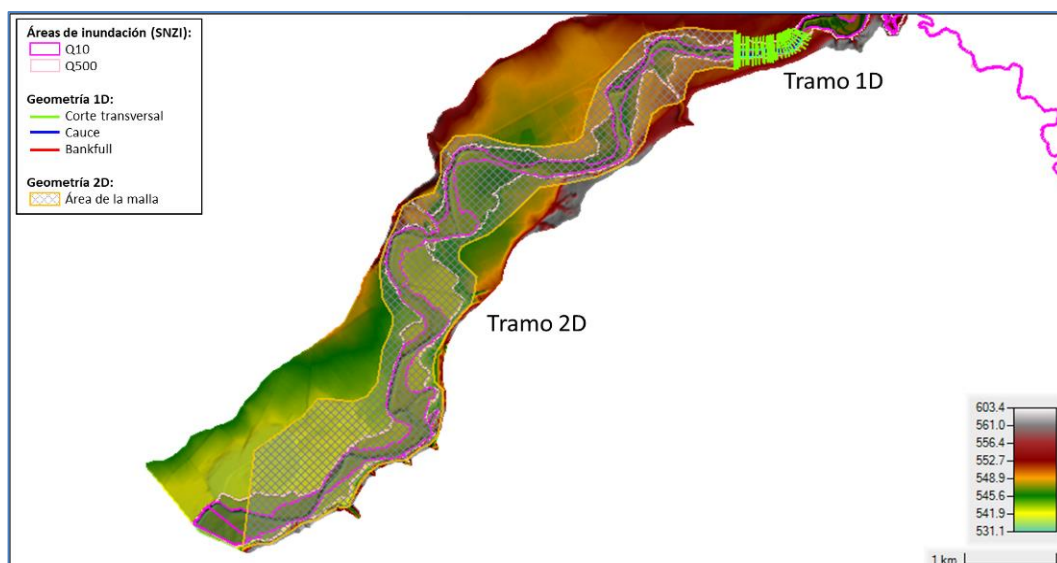
Una vez obtenidos los Modelos Digitales del Terreno, se han generado las geometrías hidráulicas en HEC-RAS, tanto en las zonas 1D como en la 2D. Como se indicó, se ha procurado extender el dominio del estudio de forma que incluya el polígono de inundación definido por la inundación Q500. En el caso de la geometría 1D se han digitalizado además las zonas de ribera o *bankfull* a partir de la ortofotografía del PNOA y se ha revisado conforme a los cortes transversales.

En las figuras adjuntas se representan las geometrías 1D/2D finales, y en la tabla se resumen sus principales características. Pese al muy elevado número de celdas, así elegido a efectos de experimentación, los modelos se ejecutan correctamente en estaciones de trabajo, aunque con elevados tiempos de ejecución.

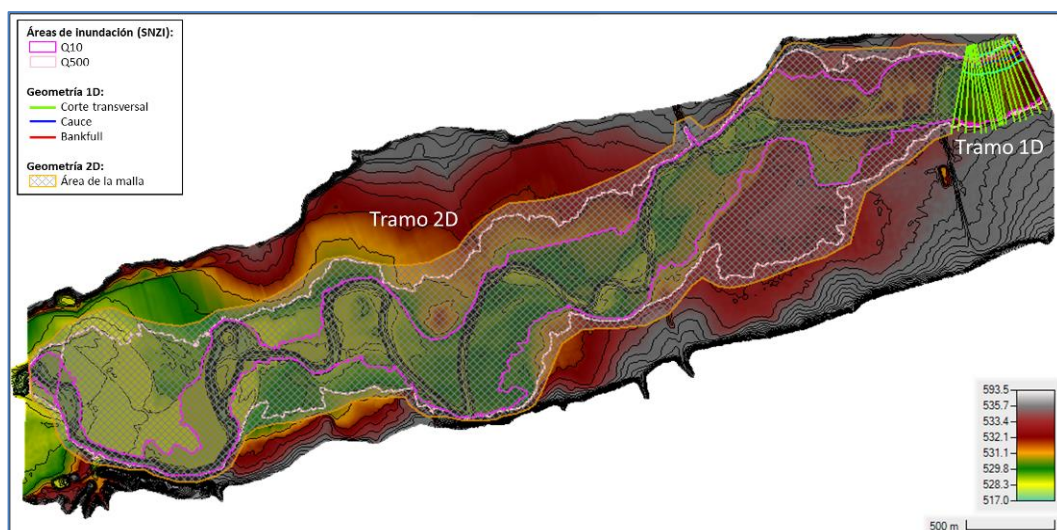
Id	Tramos 1D			Áreas 2D		
	Long. Cauce (m)	Sup. (ha.)	Nº de secciones	Long. Cauce (m)	Sup. (ha.)	Nº de celdas
A030101	838	23,31	29	11.411	600,13	1.506.430
A030102	345	20,09	18	9.376	466,51	1.170.632
A040101	2.990	262,28	64	10.702	881,65	2.210.033

Tabla 3. Principales características de las geometrías generadas

Id: A030101



Id: A030102



Id: A040101

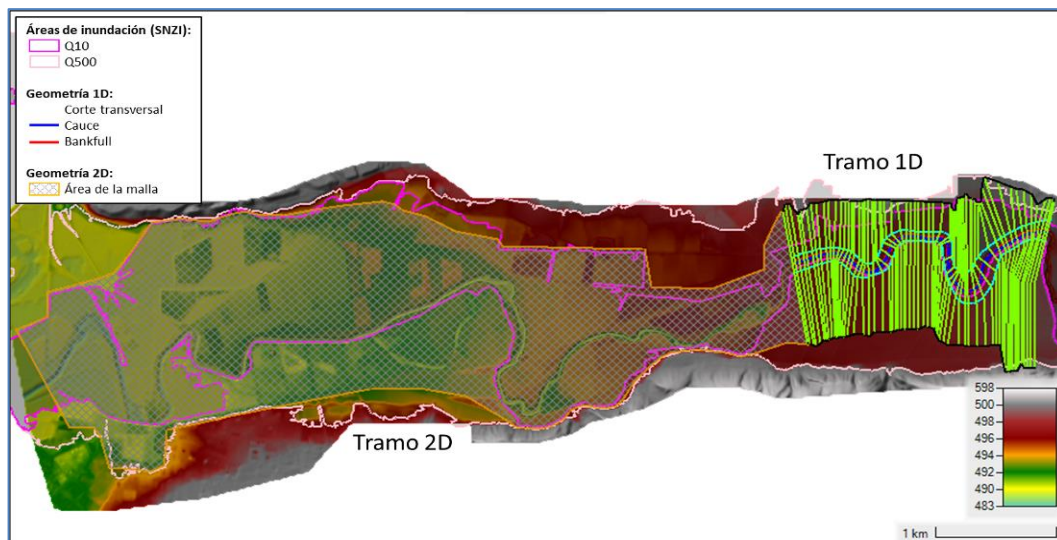


Figura 5. Geometrías de los modelos acoplados 1D-2D en las zonas finalmente estudiadas

3.1.4. RUGOSIDADES DEL CAUCE Y LA LLANURA DE INUNDACIÓN

Dado que la rugosidad depende en gran medida de los usos del suelo y la vegetación, es común estimarla de forma espacialmente distribuida mediante la asignación de valores a las clases de uso disponibles en la cartografía digital. En este estudio se ha utilizado ese esquema de trabajo, asignando valores a la clasificación derivada del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE) para 2014. La ventaja de esta fuente de información es que representa a escala 1:25.000 las entidades que definen a la ocupación del suelo, siendo ésta una escala que aproxima suficientemente, una vez debidamente revisada, las diferentes categorías, para su posterior uso y perfeccionamiento en estudios de detalle.

Para estimar la rugosidad en el cauce y en las llanuras de inundación se emplea usualmente la fórmula de Manning, asignando a los polígonos de ocupación los valores propuestos por el SNZI (MAGRAMA, 2011). De esta forma, se han revisado los polígonos espaciales de SIOSE 2014 a partir de la ortofotografía disponible del PNOA (v. tabla), y una vez corregidos, se han asignado dichos valores en la capa espacial final.

En la figura adjunta se muestra un ejemplo de la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning en función de las categorías de ocupación del suelo del SIOSE 2014 en la ARPSI ES030-03-01-02.

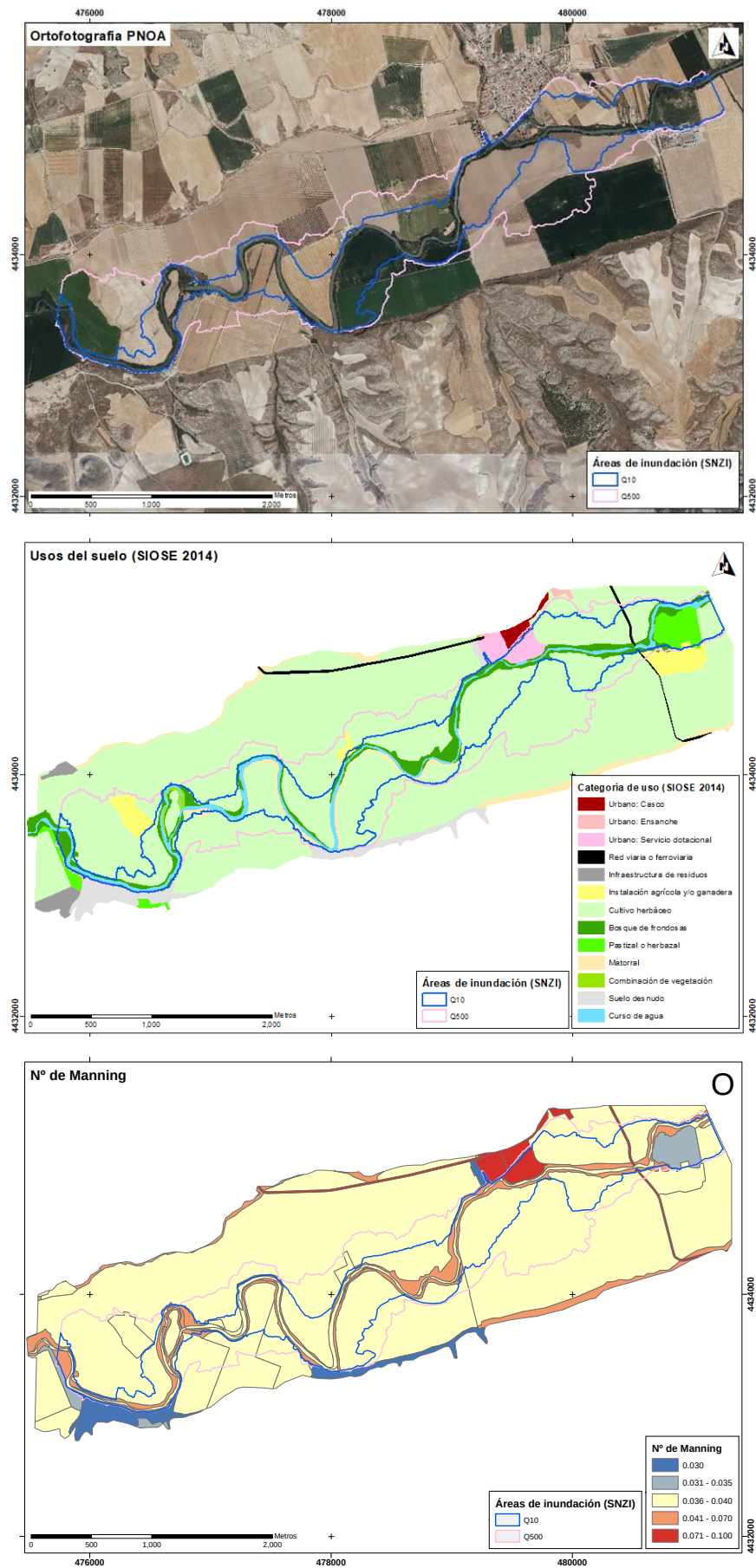


Figura 6. Obtención de la rugosidad de Manning a partir de los usos del suelo del SIOSE, revisada a partir de la Ortofotografía del PNOA (IGN, 2021). ARPSI ES030-03-01-02.

3.1.5. CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

Siguiendo una práctica usual, la condición inicial es la resultante de establecer un periodo de calentamiento y estabilización mediante un flujo en régimen permanente entrante desde aguas arriba. Tras la estabilización se introduce el hidrograma deseado aguas arriba en el tramo 1D. El tramo 2D está acoplado al 1D y su condición de flujo inicial es la misma.

La condición de contorno aguas arriba es el hidrograma de entrada al tramo (p.e. un hidrograma escalera que recorra el rango de caudales de interés), y aguas abajo la de una sección estándar uniforme, con pendiente normal, lo que puede considerarse adecuado si no se observan, como es el caso analizado, efectos de remanso o secciones críticas en el cauce. Los caudales medios anuales circulantes son del orden de 11-12 m³/s, lo que puede orientar sobre estos rangos, máxime si se van a investigar las situaciones de aguas bajas y medias, como es el caso.

Los detalles numéricos de la ejecución dependen del supuesto procesado, habiendo procurando siempre asegurar la estabilidad de los esquemas numéricos. En posteriores análisis cabría optimizar y refinar estos esquemas numéricos para posibilitar tiempos de ejecución menores sin menoscabo de la precisión y calidad de los resultados obtenidos.

4. ANÁLISIS DE LOS TRAMOS

En epígrafes anteriores se mostró el proceso de generación de datos y construcción de modelos hidráulicos en determinados tramos de la cabecera del Tajo, y las razones para todo ello. Seguidamente se desarrolla el análisis propiamente dicho de los tres tramos finalmente elegidos.

Se entiende por la zona de cabecera del Tajo, denominando así a su sistema de explotación, toda la cuenca vertiente situada aguas arriba de Aranjuez. Dentro de esta zona cabe a su vez diferenciar entre el alto Tajo, que es toda la cuenca aguas arriba de Bolarque, y la zona comprendida entre Bolarque y Aranjuez.

En el alto Tajo se genera la mayor parte de los recursos hídricos de toda la cabecera, con demandas relativamente muy reducidas. En Bolarque se produce la derivación del ATS, y de Bolarque a Aranjuez se produce el transporte de los recursos propios y su derivación, en cantidades significativas, para atender las distintas demandas consuntivas y la especificación de caudales mínimos en distintos puntos hasta Aranjuez.

En este tramo de transporte y derivación entre Bolarque y Aranjuez los caudales son regulados y por tanto susceptibles de modulación. Existen pequeñas presas hidroeléctricas o azudes de derivación como los de Zorita, Almoguera, Estremera, Valdajos y Embocador. La figura adjunta muestra algunos de estos puntos singulares, destacando a nuestros efectos por su carácter de alteración del régimen las presas y azudes existentes. Los puntos de interés identificados son (1) presa de Bolarque, (2) puente de Sayatón, (3) presa de Zorita, (4) Zorita de los Canes, (5) central de Almoguera, (6) piscifactoría de Illana, (7) presa de Estremera, (8) salto, (9) salto de Valderribas, (10) Fuentidueña de Tajo, (11) azud Buenamesón, (12) Villamanrique del Tajo, (13) azud de Villaverde, (14) central de Valdajos, (15) Puente de Villarubia, (16) azud de La Aldehuela, (17) casa del Soto, (18) azud Embocador, (19) casa de la Monta, (20) La Pavera, (21) Rancho Grande, en la confluencia con el Jarama.

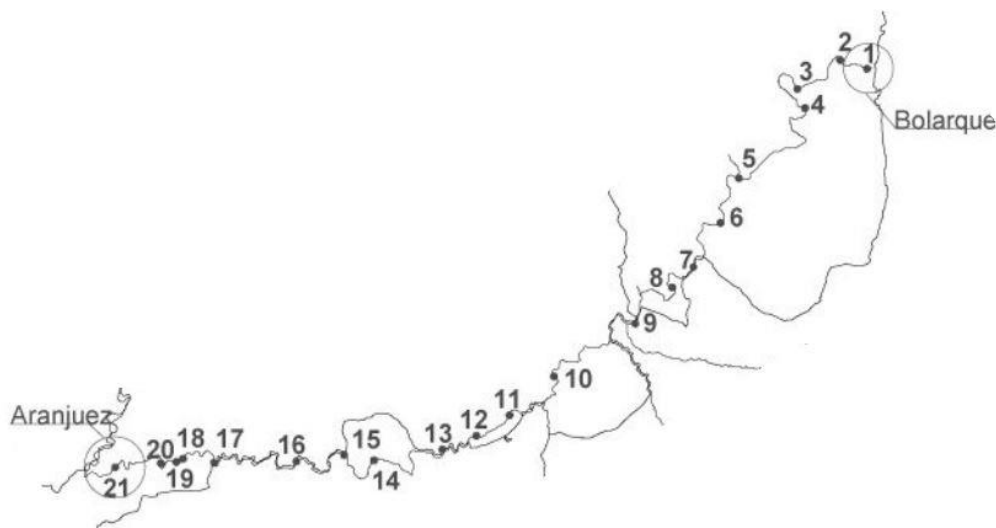


Figura 7. Esquema de azudes y puntos singulares de Bolarque-Aranjuez

Los análisis de caudales mínimos mediante métodos hidráulicos se van a realizar por tanto en el tramo entre Bolarque y Aranjuez, fuera de la cuenca del alto Tajo, y centrándose en tres áreas o tramos específicos, uno primero correspondiente a Estremera-Fuentidueña, otro intermedio en Villamanrique del Tajo, y un tercero final hasta Aranjuez. Las razones de esta elección fueron descritas pormenorizadamente en el capítulo anterior.

La figura adjunta muestra esquemáticamente el tramo fluvial entre Bolarque y Aranjuez, señalando estas tres áreas o tramos de análisis.

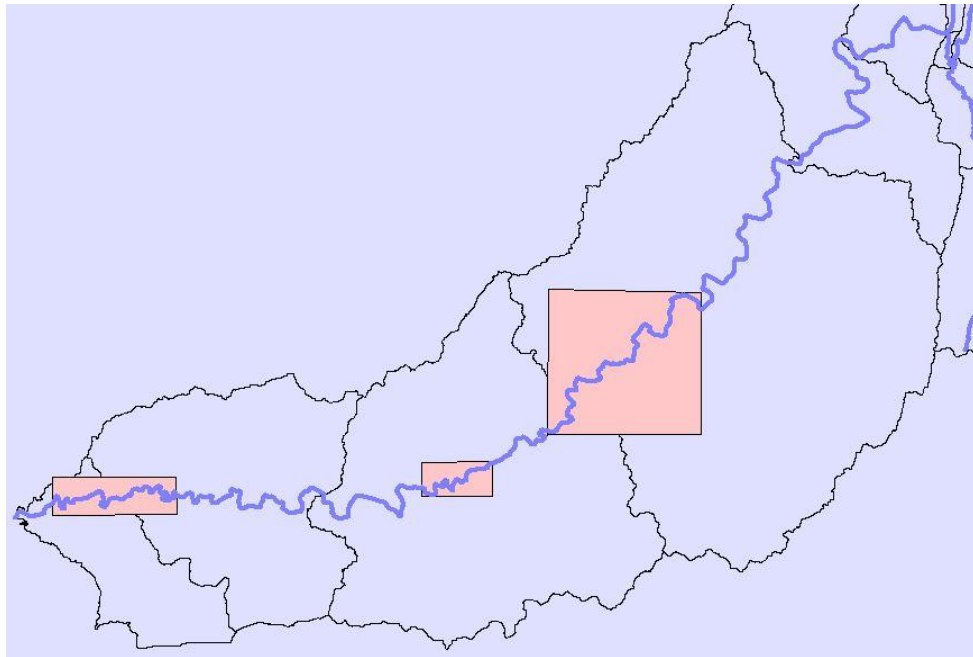


Figura 8. Situación de las áreas de análisis

4.1.1. TRAMO 1. ESTREMERERA

El tramo, de unos 25 km de longitud, se inicia en las inmediaciones de Estremera y llega a la confluencia con el arroyo de Vallehermoso, pasado Fuentidueña de Tajo.

Un primer segmento se inicia en la gravera del Maquilón, aguas abajo del salto xxx, bordea la urbanización El Soto de Estremera, pasa la presa del salto de Valderribas, y sigue hasta el azud junto a la antigua destilería del whisky.

Aguas abajo de este azud se inicia un segundo segmento hasta la mencionada confluencia, con algún pequeño azud de piedras o artesano como el del Puente de Hierro o puente Eiffel de Fuentidueña. Este segundo segmento será el objeto de la modelación 2D, como se mostrará más adelante.

Las figuras adjuntas muestran la totalidad del tramo y la extensión de las bandas de terreno junto al cauce que se van a emplear en los análisis.

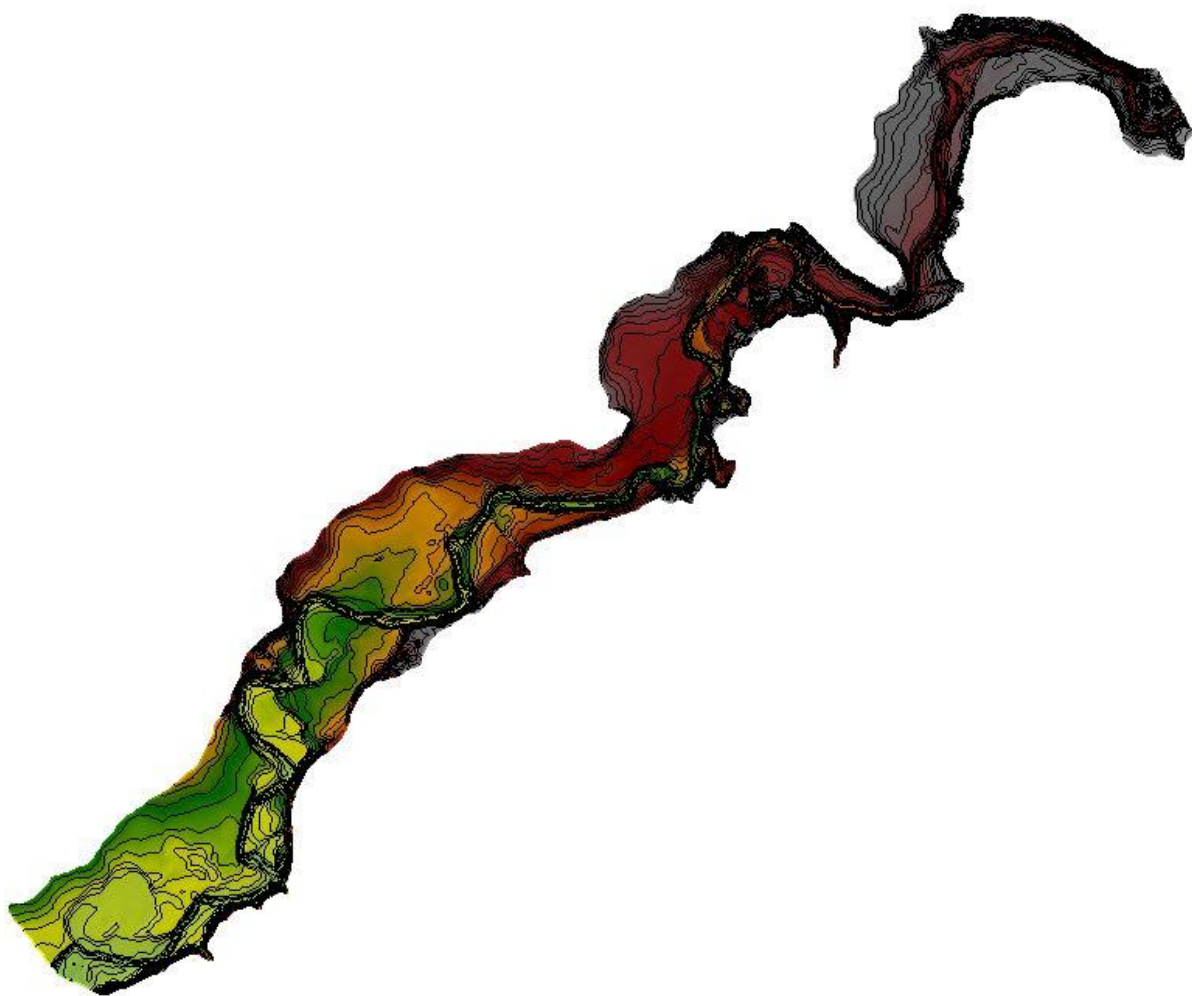


Figura 9. Tramo 1. Estremera

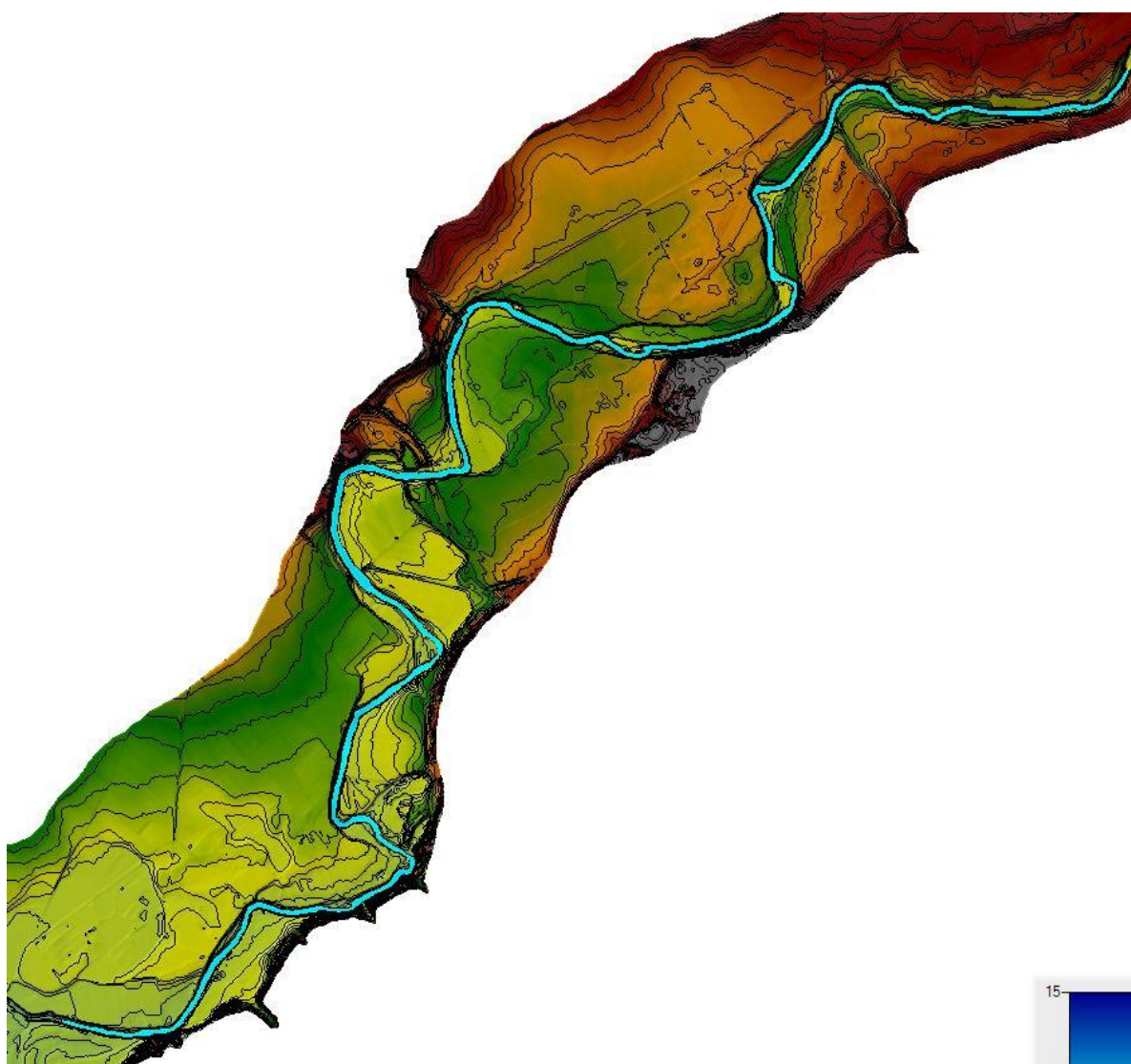


Figura 10. Tramo 1. Estremera. Segmento de las inmediaciones de Fuentidueña

El perfil del cauce en este segundo segmento es el mostrado en la figura, pudiendo apreciarse la relativa estabilidad de pendientes en los distintos subtramos.

Los puntos anómalos se deben a los errores de asimilación del thalweg del río mediante una poligonal recta. Su efecto es por tanto meramente visual, no afectando en nada a los cálculos hidráulicos realizados.

Para visualizar los resultados del cálculo hidráulico y evaluar las relaciones caudal-perímetro mojado se emplean las 14 secciones representativas mostradas en la figura.

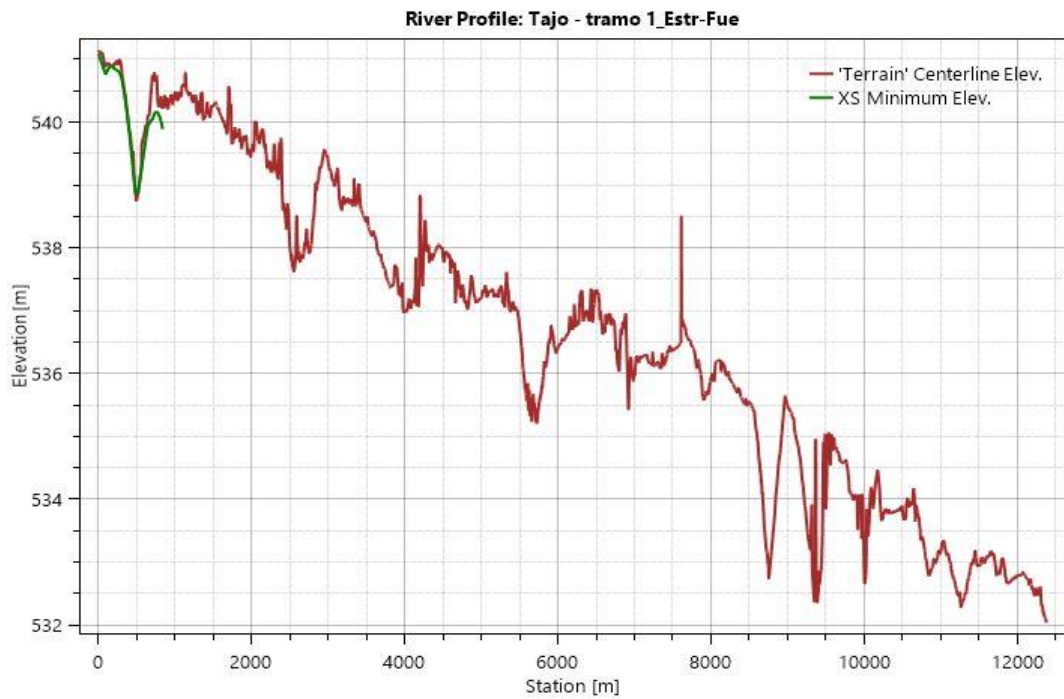


Figura 11. Tramo 1. Estremera. Perfil del terreno

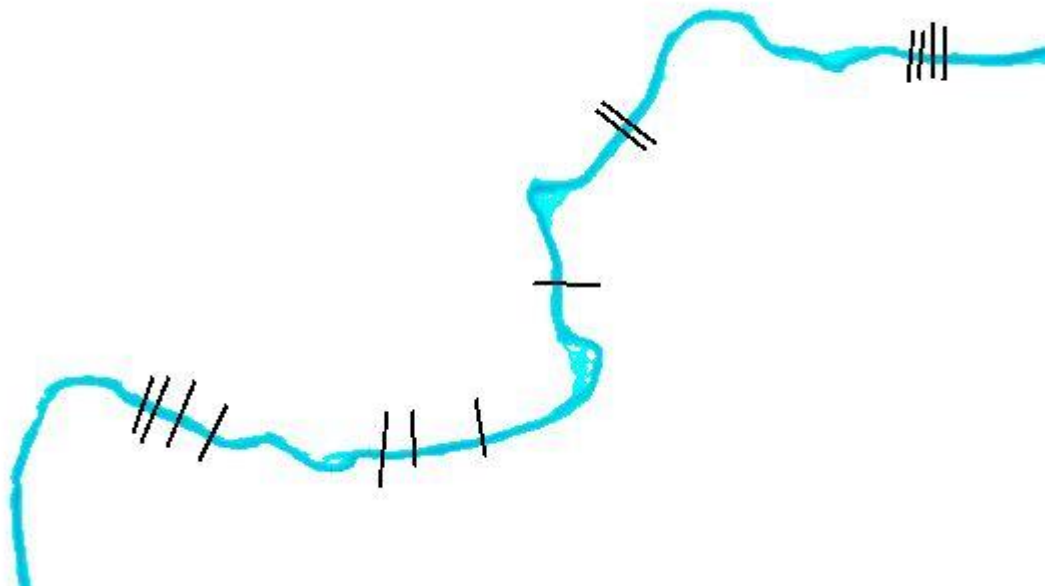


Figura 12. Tramo 1. Estremera. Secciones representativas elegidas

4.1.2. TRAMO 2. VILLAMANRIQUE DE TAJO

El segundo tramo analizado es el correspondiente a las inmediaciones de Villamanrique de Tajo. El tramo se inicia aguas arriba del parque fluvial de Villamanrique y acaba aguas arriba de la confluencia con el arroyo de Valdepueco, con una longitud aproximada de 9 km. La figura muestra el mapa del tramo.

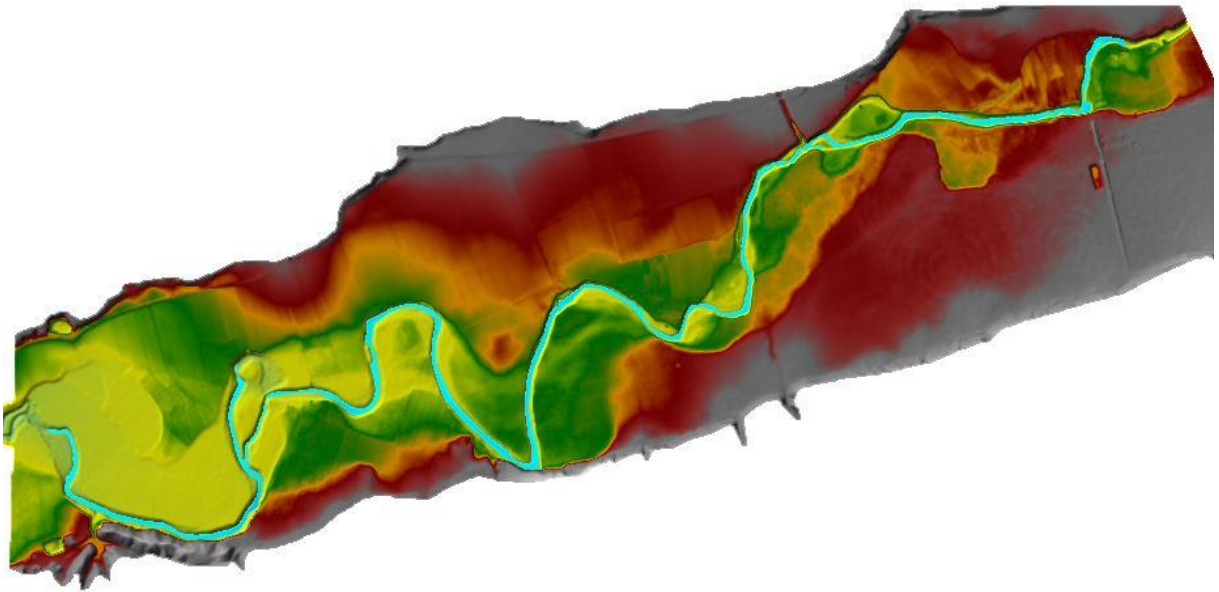


Figura 13. Tramo 2. Villamanrique de Tajo

El perfil del cauce es el mostrado en la figura, pudiendo apreciarse la relativa estabilidad de pendientes en los distintos subtramos. Como antes, los puntos anómalos se deben a los errores de asimilación del thalweg del río mediante una poligonal recta y su efecto es meramente visual, no afectando en nada a los cálculos hidráulicos realizados.

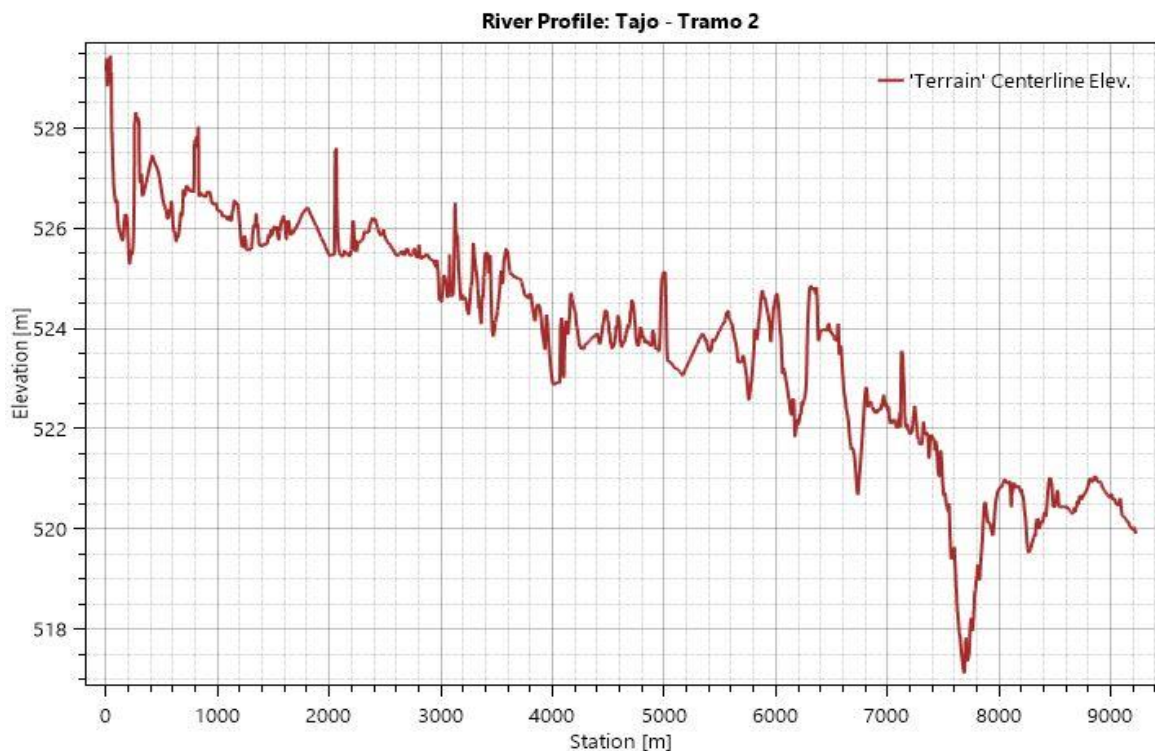


Figura 14. Tramo 2. Villamanrique. Perfil del terreno

El tramo discurre por una amplia zona regada por el canal de Estremera, sin retenciones y remansos apreciables. Para visualizar los resultados del cálculo hidráulico y evaluar las relaciones caudal-perímetro mojado se emplean las 9 secciones representativas mostradas en la figura.

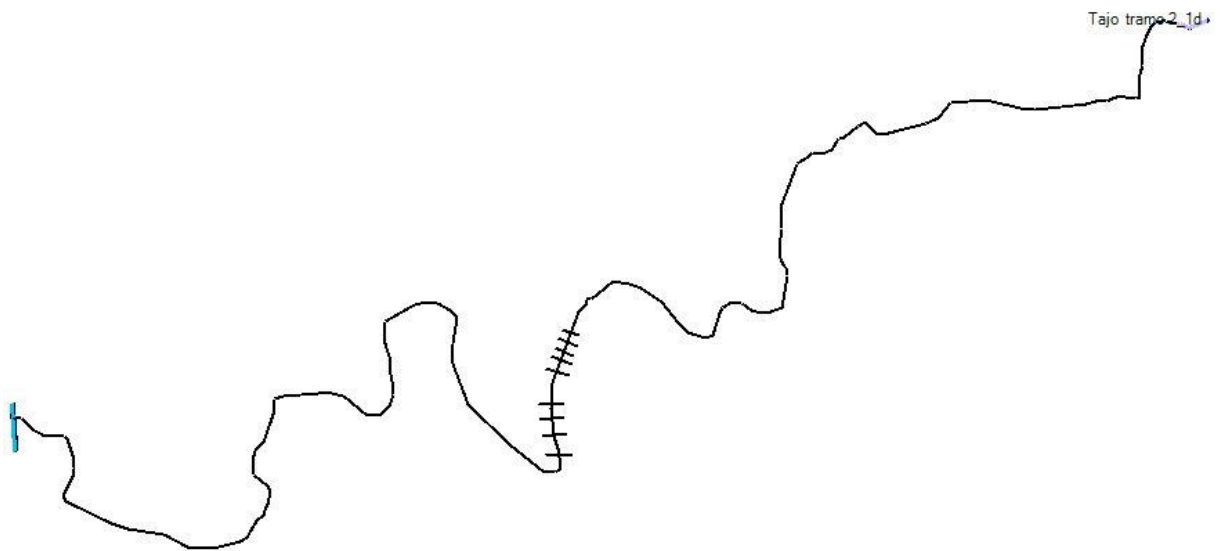


Figura 15. Tramo 2. Villamanrique. Secciones representativas elegidas

4.1.3. TRAMO 3. ARANJUEZ

Codificado como A040101, el tramo se inicia aguas arriba del embalse del Embocador y llega hasta Aranjuez, tras atravesar la ciudad y su entorno, con una longitud que supera los 17 km.

En un punto intermedio se encuentra la presa y embalse del Embocador, y próximo al final el azud del Puente de Barcas en Aranjuez. Ambos generan moderados efectos de remanso.

La figura muestra el mapa general del tramo y un detalle de la zona de Aranjuez.

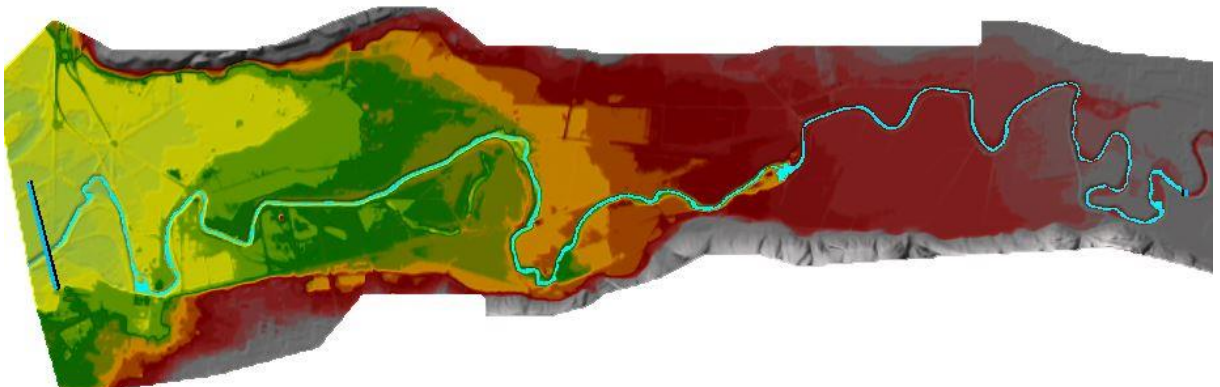


Figura 16. Tramo 3. Aranjuez

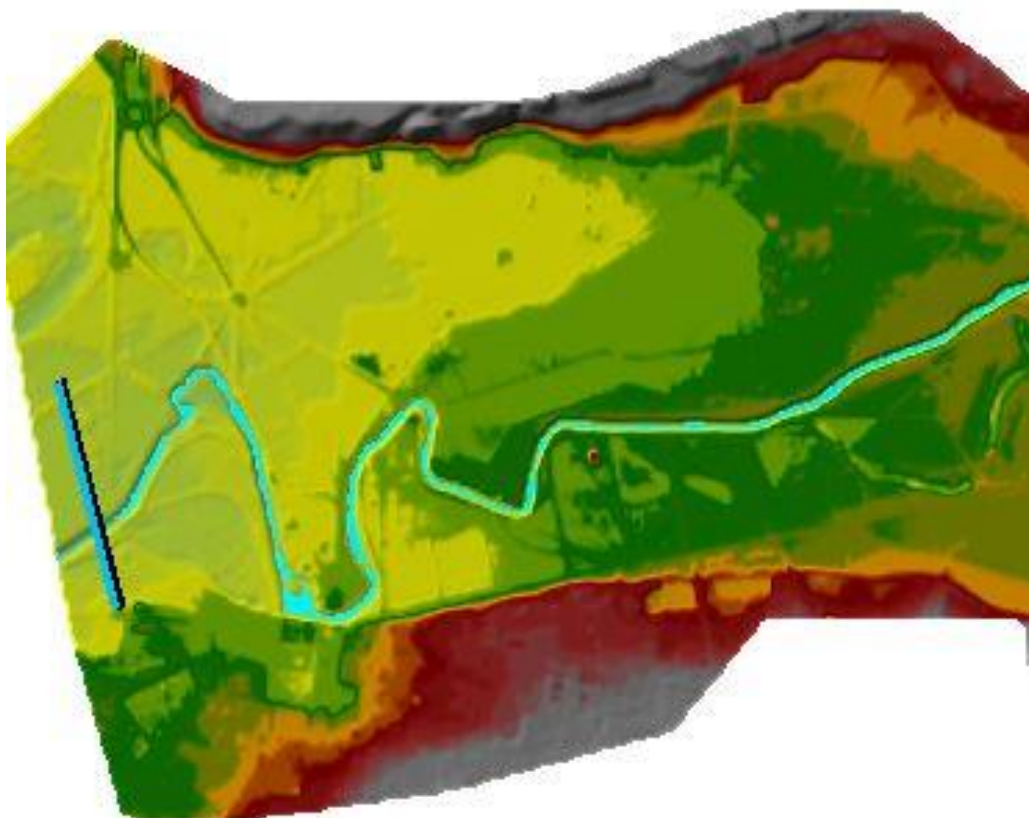


Figura 17. Tramo 3. Aranjuez (detalle)

Para su análisis se ha dispuesto del modelo de elevaciones ya comentado anteriormente. El modelo de elevaciones del terreno disponible para esta zona presenta las cotas redondeadas a metros, lo que supone una importante deficiencia que impide la realización de cálculos hidráulicos similares a los de los tramos anteriores (determinación precisa de perímetros mojados), por lo que no se abordarán tales cálculos.

La figura adjunta muestra esta anomalía de redondeo, ya comentada en epígrafes anteriores al describir las fuentes de datos, siguiendo el perfil del cauce, junto con el perfil de la lámina de agua, en el que esta irregularidades quedan absorbidas.

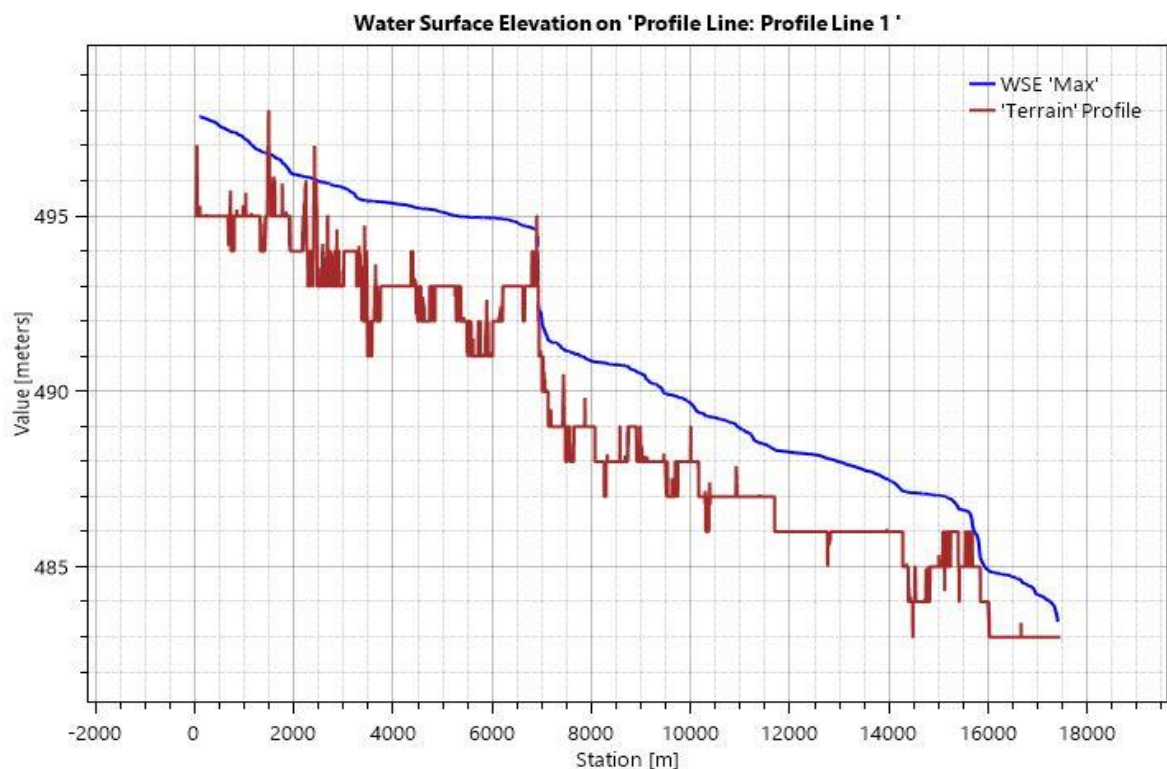


Figura 18. Tramo 3. Aranjuez. Perfil del terreno y lámina de agua

En consecuencia el análisis se limitará al contraste de la lámina de agua en diferentes secciones para diferentes valores de caudal circulante, apreciándose así el impacto paisajístico en la ciudad de diferentes caudales. Se estima que aunque el error de redondeo en las cotas impide caracterizar la geometría hidráulica del cauce con la precisión requerida, su influencia será muy moderada si se persigue no el valor absoluto para un caudal dado sino la comparación relativa entre los efectos de dos niveles de caudales distintos. En definitiva, disponer de un modelo de elevaciones grosero impide la obtención de resultados precisos en una sección del cauce, pero puede ser aceptable para comparaciones relativas en esa misma sección.

Toda la zona final del tramo corresponde al paso por la ciudad de Aranjuez, y el cauce se encuentra fuertemente alterado. La zona aguas abajo del Embocador presenta menores alteraciones y podría ser representativa de un tramo sin efectos de remanso, adecuado para el análisis hidráulico.

Para tener una idea representativa del efecto del caudal sobre los niveles se han elegido 12 secciones distribuidas las 5 primeras S301 a S305 en el tramo aguas abajo de la presa del Embocador, representativo de condiciones menos alteradas, y las 7 siguientes en puntos significativos del río en el entorno de Aranjuez. Esos perfiles significativos, mostrados en el mapa adjunto, son:

- S306 Casa del Labrador
- S307 Camping y área deportiva
- S308 Jardín del Príncipe, junto al Museo de Faluas Reales
- S309 Escuela de piragüismo, aguas arriba del Puente de Barcas
- S310 Jardín de la Isla, a la altura del Jardín Árabe
- S311 Jardín de la Isla, a la altura de los árboles singulares
- S312 Fuente de Neptuno

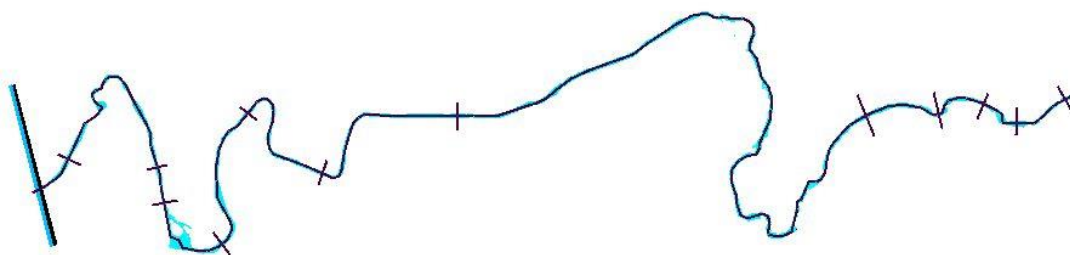


Figura 19. Tramo 3. Aranjuez. Secciones representativas elegidas

4.2. SÍNTESIS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

Conforme a lo expuesto en epígrafes anteriores, el análisis general aplicado a los tramos descritos consiste en la determinación de la relación entre caudales circulantes y perímetros mojados en las diferentes secciones, la inspección de esa relación para observar curvaturas máximas o puntos con pendiente unidad, y su comportamiento en los intervalos de valores de caudal estacional precritos en la zona.

Además, se observarán los perfiles de agua correspondientes a diferentes caudales en esos intervalos analizando sus diferencias relativas en las distintas secciones consideradas.

Este análisis se ha realizado para los dos primeros tramos, para los que se ha podido disponer de un modelo digital del terreno de alta resolución y calidad. Para el tercer tramo, y por las razones señaladas, el análisis se limita a la observación de los perfiles para diferentes caudales.

En síntesis, el proceso general seguido en los análisis ha sido:

- En todo el cauce del Tajo entre Bolarque y Aranjuez, se han elegido tramos representativos para los que se disponga de modelos del terreno de alta resolución (p.e. 1 metro) y alta precisión (p.e. 1 cm).
- Para cada tramo considerado se han elegido distintas secciones del cauce con el objetivo de analizar la sensibilidad al caudal de los perímetros mojados y de las alturas de la lámina de agua. Elegidos los tramos y secciones,
- Para cada tramo se ejecuta un cálculo hidráulico que permita obtener las relaciones nivel-caudal o curvas de gasto en cualquier sección del tramo.
- Para cada sección de ese tramo se obtienen la curva de gasto, el perfil del terreno y las funciones geométricas de anchura de la lámina de agua y perímetro mojado en función de la cota.
- Combinando todos estos resultados se obtienen las funciones de perímetro mojado y anchura en función de la cota.

- Se estandariza la función de caudal-perímetro mojado y se obtiene su función de curvatura para cualquier valor del caudal. Se analiza esta función obteniendo los puntos de curvatura máxima y de pendiente unidad.
- Se interpretan estos resultados formulando las oportunas conclusiones.

Seguidamente se describen estos resultados para todas las secciones de todos los tramos analizados.

Adicionalmente, en el tramo 3 se analiza la evolución del perfil de la lámina de agua para diferentes valores de caudal, con objeto de apreciar su impacto paisajístico. Ello es irrelevante desde el punto de vista del mínimo medioambiental, pero proporciona una idea muy visual del efecto.

5.RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Como se indicó, se han analizado 3 tramos y un total de 35 secciones (14 en Fuentidueña, 9 en Villamanrique, y 12 en Aranjuez), codificadas como TSS (1 dígito identificativo del tramo y 2 de la sección). La geometría de las secciones del cauce se ha determinado a partir del modelo digital del terreno con resolución de 1x1 m, altura 1 cm, definiéndose mediante poligonales con pares de valores XZ (estación-elevación). Las diferentes secciones obtenidas son las mostradas en el Anexo.

A su vez los caudales considerados en los cálculos hidráulicos han sido de 1, 2, 3, ... 20 m³/s, cubriendo así adecuadamente toda la gama de caudales bajos y medios en los 3 tramos fluviales.

Para cada uno de estos 20 valores de caudal se ha obtenido la altura alcanzada por el agua en todas las secciones de todos los tramos, construyendo por interpolación mediante splines bicúbicos las curvas de gasto también mostradas en el Anexo.

5.2. PERÍMETROS MOJADOS

Los resultados obtenidos para cada sección de cada tramo estudiado se muestran en los gráficos ofrecidos en el Anexo.

Como puede verse para el primer perfil las relaciones de caudal y perímetro mojado muestran los cambios que se van produciendo en la sección a medida que aumenta el tirante de agua. La curva de gasto está bien perfilada, así como la del caudal y perímetro mojado. La relación de curvatura presenta máximos para caudales reducidos, del orden de 2 m³/s seguido de otro máximo en torno a los 8 con una primera inflexión en torno a los 5 m³/s, bajando después ligeramente hasta valores oscilantes, sin máximos bien identificados. El segundo perfil de este mismo tramo revela un patrón similar al anterior, con curvaturas máximas para caudales reducidos, inferiores a 5 m³/s, que después tienden a anularse.

Igual patrón muestran el tercer y cuarto perfil, con un máximo en torno a 4 m³/s y otro en torno a 7,5. El quinto perfil presenta un máximo en torno a 6 m³/s, valor que se repite precedido por uno inferior en el perfil sexto. Los perfiles 7 y 8 muestran máximos para caudales muy reducidos, pero con una aparente menor fiabilidad al observar sí un comportamiento anómalo de la curva de gasto para los caudales muy bajos. Esa anomalía se repite también para las secciones siguientes, por lo que los valores de curvatura correspondientes no deben ser considerados como fiables.

En el tramo segundo la primera sección muestra una discontinuidad en torno a 11 m³/s, valor que aumenta hasta 14 en el segundo y tercer perfil, y aumenta aún más en el cuarto y quinto. Las relaciones de caudal y perímetro mojado muestran discontinuidades quizá atribuibles a la sección del cauce a partir de esas cotas, en las que parece surgir un segundo muy pequeño cauce lateral en la margen izquierda.

Finalmente, en el tercer tramo no es posible realizar un análisis de este tipo dada la anomalía ya comentada respecto al redondeo de cotas del modelo del terreno en ese tramo.

A la vista de estos resultados, la conclusión que cabría deducir es precisamente que no cabe extraer conclusiones concluyentes. En algunos casos se sugieren caudales reducidos, inferiores a 5 m³/s mientras que en otros se elevan hasta 10 e incluso 20, lo que claramente no

tiene sentido considerando que esos valores están por encima del flujo actual medio interanual en el tramo.

Entre las razones para esta falta de resultados concluyentes puede estar la necesidad de una mayor resolución geométrica de los cauces en las zonas de aguas bajas, resolución que probablemente no pueda alcanzarse empleando los productos digitales disponibles de forma estándar, y requiera de campañas batimétricas específicas de muy alta resolución.

Considerando el conjunto, no se deduce ningún valor que claramente vaya asociado a curvaturas máximas en función de los caudales, por lo que la aplicación del método hidráulico en este caso, y con la información de partida disponible, no permite sugerir ningún valor como mínimo medioambiental recomendado.

5.3. IMPACTO PAISAJÍSTICO. PERFILES DE LA LÁMINA DE AGUA

Un análisis adicional no asociado a las condiciones ambientales sino al impacto de los caudales sobre los niveles del agua es el que se ha realizado en la zona de Aranjuez, donde además de sus condiciones ambientales, el río tiene un evidente interés turístico y escénico.

Para ello, empleando el modelo hidráulico desarrollado, se ha calculado el nivel de la lámina de agua a lo largo de la ciudad para diferentes caudales circulantes entre 2 y 20 m³/s. El cálculo se ha realizado para los 19 valores discretos entre 2 y 20, de 1 en 1, con los resultados mostrados en la figura de perfiles del agua a lo largo de la ciudad.

Puede verse que las diferencias entre los perfiles son reducidas. Concretamente, para los valores de 6 y 8'5 m³/s propuestos como mínimos ecológicos, las diferencias oscilan entre 5 y 15 cms, según la sección considerada, lo que resulta prácticamente inapreciable.

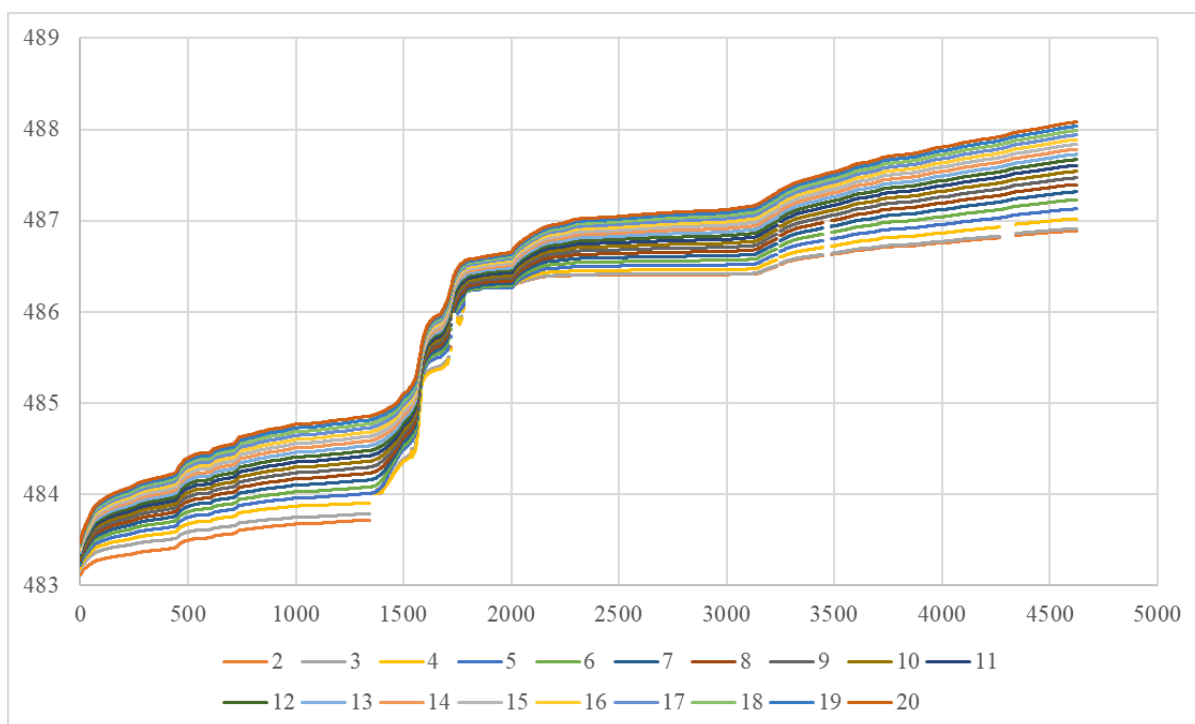


Figura 20. Tramo 3. Aranjuez. Perfiles de la lámina de agua para diferentes caudales

La siguiente figura muestra el detalle de perfiles para estos dos valores, junto con la diferencia de las alturas alcanzadas, ilustrando las magnitudes señaladas.

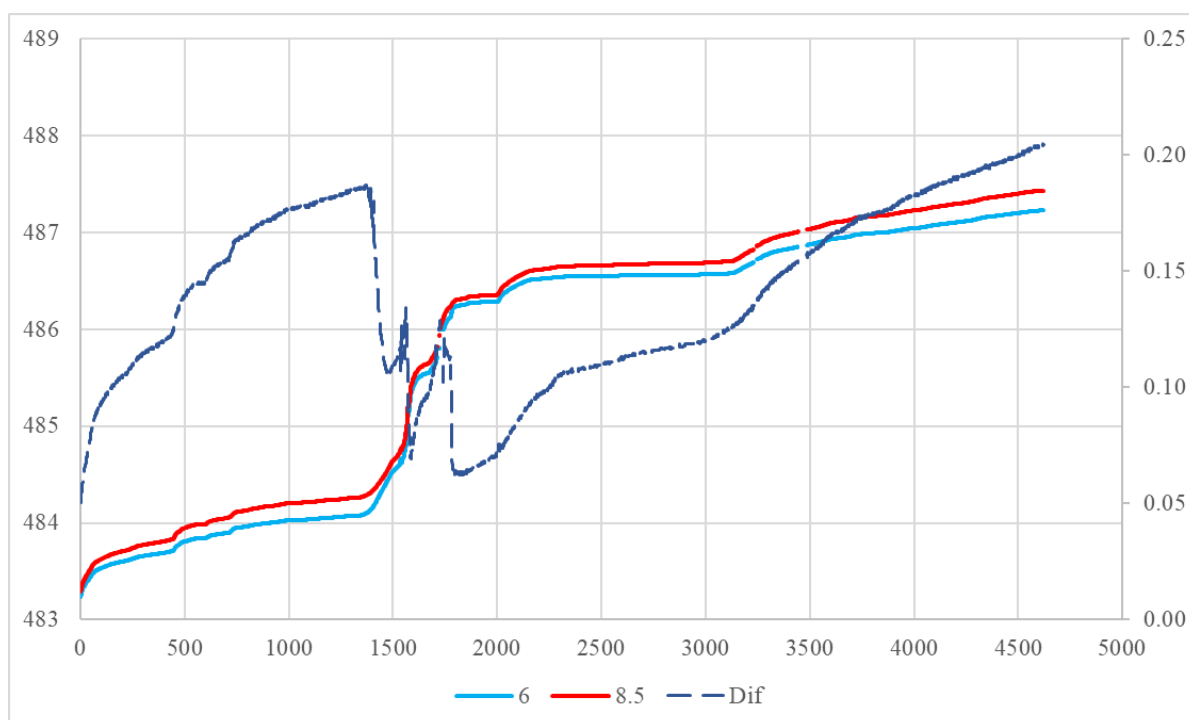


Figura 21. Tramo 3. Aranjuez. Perfiles de la lámina de agua para caudales mínimos

Esta situación representada es estática y compara dos perfiles permanentes. Otro análisis de interés es el dinámico: si se modifica el caudal mínimo circulante a un valor mayor, como sería pasar de 6 a 8'5, entonces cualquier flujo inferior a esa cantidad no es admisible, y debe desembalsarse una cantidad adicional para alcanzarlo. Eso supone una mayor cota de la lámina de agua, que puede ser más o menos significativa desde el punto de vista no ya ambiental, sino paisajístico.

Para estudiar este impacto, ha de traducirse la series de caudales a series de niveles en el punto o puntos de interés, y contrastar los resultados que se obtienen.

Operativamente, se toma la serie diaria de caudales y se calcula la altura de la lámina alcanzada en Aranjuez con esa serie. Seguidamente se impone otra serie de caudales en la que los valores bajo 8'5 se elevan hasta llegar a ese valor, y se observa igualmente la serie de niveles alcanzados. Se comparan ambas obteniendo una serie de diferencias de altura, que se analiza estadísticamente. Ese análisis es el que se ha realizado, y los resultados son los mostrados.

El punto elegido ha sido el Tajo al paso de Aranjuez, en el entorno del Puente de la Barca, entre la escuela de Piraguismo y el Jardín del Parterre. Perfil 309.

La curva de gasto se ha estimado a partir del modelo hidráulico, observando los niveles alcanzados para diferentes caudales circulantes, y como caudales representativos de la circulación diaria se han escogido los de la estación del Embocador (3258), con 32 años de datos.

La ejecución de los cálculos descritos indica que el 42% de los días no hay ninguna diferencia, y el 58% del tiempo restante las diferencias oscilan entre 1 y 3 cms, superando muy excepcionalmente los 4, y con una media de 21 mm.

La media global, considerando los nulos, es de 12 mm, con un máximo que no llega a 9 cms.

La figura adjunta muestra esa distribución de diferencias obtenida.

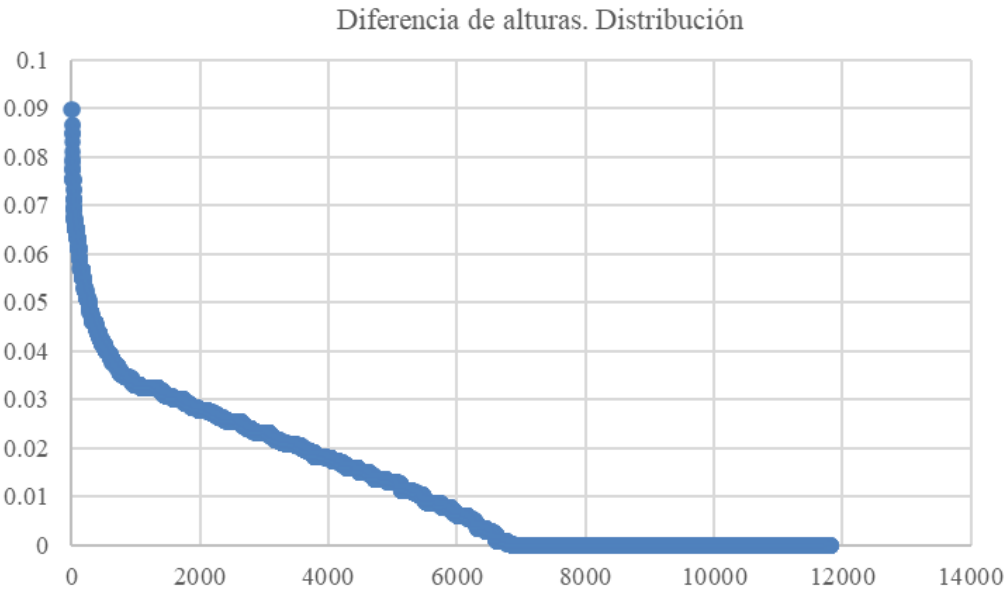


Figura 22. Tramo 3. Aranjuez. . Distribución de la diferencia de alturas de caudales mínimos 6-8.5

Igualmente, las figuras siguientes muestran esa información en forma de histograma y de curva de frecuencias.

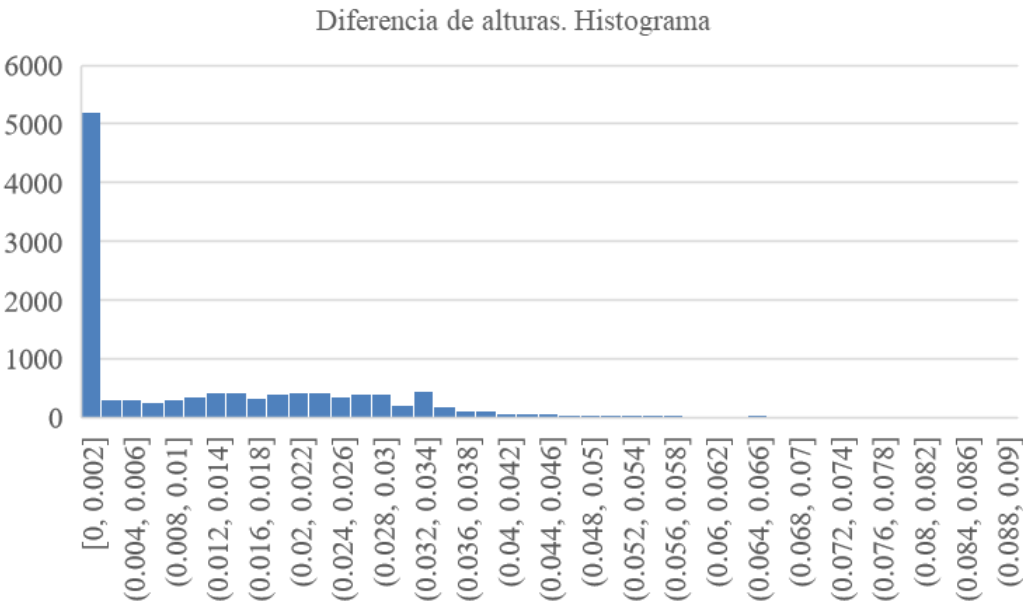


Figura 23. Tramo 3. Aranjuez. Histograma de la diferencia de alturas de caudales mínimos 6-8.5

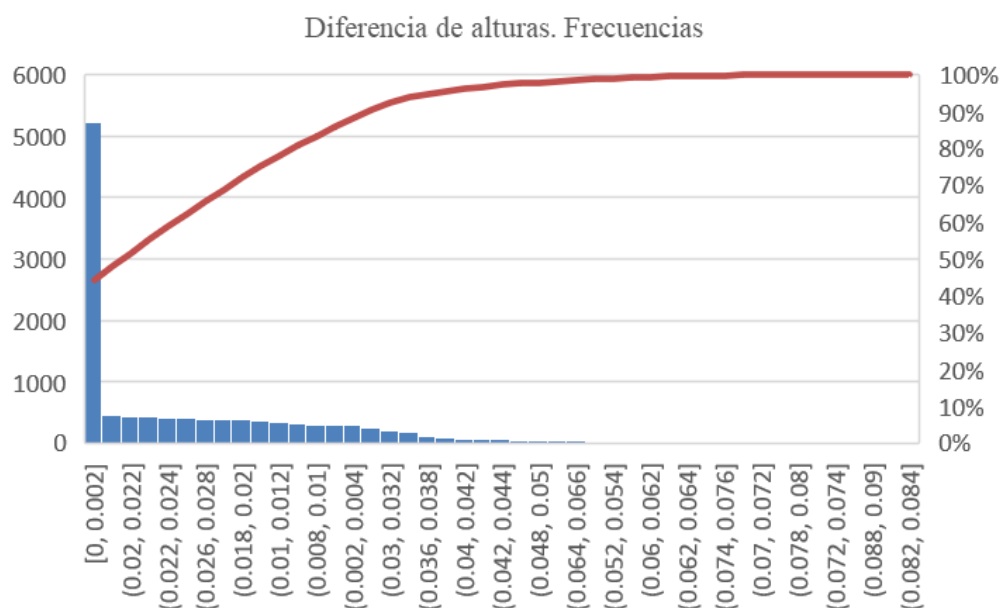


Figura 24. Tramo 3. Aranjuez. Diferencia de alturas de la lámina de agua para caudales mínimos 6-8.5

Finalmente, las figuras adjuntas muestran los resultados del cálculo hidráulico respresentados sobre la ortofotografía del Tajo a su paso por Aranjuez. La primera ofrece una perspectiva general, y las otras dos detalles locales. La lámina de agua correspondiente a 6 m³/s se representa en verde, mientras que la correspondiente a 8'5 se representa en amarillo.



Figura 25. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5



Figura 26. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5 (detalle)



Figura 27. Alturas de la lámina de agua en Aranjuez para caudales mínimos 6-8.5 (detalle)

Como se observa, las diferencias son prácticamente inapreciables, especialmente en el área más aguas arriba, afectada por el remanso.

Ha de insistirse en el valor aproximado e indicativo de estos resultados. Afinar más requiere disponer de modelos geométricos del cauce con batimetrías de muy alta resolución y caracterizaciones de la rugosidad más precisas y contrastadas. Son trabajos que cabría realizar en fases posteriores de estos análisis.

6.CONCLUSIONES

Los resultados básicos son los anteriormente comentados.

Como ya se ha señalado, en los análisis de perímetros mojados no hay puntos claros de transición y por tanto no cabe apreciar valores de caudales mínimos identificables.

En concreto, para los valores en el rango de 6-9 m³/s no se aprecian valores disruptivos del caudal.

Cabe perfeccionar los análisis hidráulicos básicamente mediante mejores caracterizaciones geométricas de los cauces, lo que requiere campañas batimétricas específicas, y emplear más secciones representativas.

También sería recomendable emplear otros indicadores hidráulicos además del perímetro mojado, como podría ser el tirante de agua, y probar diferentes técnicas de escalado para las curvas.

Desde el punto de vista paisajístico, las diferencias son inapreciables.

7.ANEXO. GEOMETRIA DE LAS SECCIONES

En el presente Anexo se muestran los datos y resultados básicos del estudio hidráulico de caudales y perímetros mojados, correspondientes a las diferentes secciones consideradas en el análisis.

Para cada sección se incluyen cinco gráficos correspondientes a la sección transversal del cauce, la curvas de cotas y perímetros mojados, la curva de gasto, la de caudales perímetros mojados y finalmente la de curvaturas de la curva anterior.

Las curvaturas en cada punto se han obtenido de forma no paramétrica mediante diferencias finitas, manteniendo su signo para apreciar posibles cambios pese a ser indiferente a los efectos del máximo.

Los valores de caudal y perímetro mojado han sido escalados dividiendo por el máximo.

Los gráficos se muestran con una ventana en la fila superior conteniendo la sección, una ventana izquierda en la segunda fila con la curva de cota-perímetro mojado, una ventana derecha en la segunda fila con la curva de gasto, señalando los puntos de cálculo, una ventana izquierda en la fila inferior la curva de caudales y perímetros mojados, y una ventana derecha en misma fila inferior con las curvaturas en función del caudal.

