

# Trabajo de Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Civil

Estudio del retranqueo de motas en el río Segura a su paso por la comarca Vega Baja (Alicante)

Autor: Pablo Valencia Morillo

Tutor: Antonio Ruiz Reina

**Dpto. Ingeniería Espacial y Mecánica de Fluidos**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

# **Estudio del retranqueo de motas en el río Segura a su paso por la comarca Vega Baja (Alicante)**

Autor:

Pablo Valencia Morillo

Tutor:

Antonio Ruiz Reina

Profesor Asociado

Dpto. de Ingeniería Espacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado: Estudio del retranqueo de motas en el río Segura a su paso por la comarca Vega Baja  
(Alicante)

Autor: Pablo Valencia Morillo

Tutor: Antonio Ruiz Reina

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

La elaboración de este Trabajo de Fin de Grado no hubiera sido posible sin la ayuda de numerosas personas a las que les estoy muy agradecida.

En primer lugar, agradecer al tutor de este proyecto, Antonio Ruiz Reina, que me ha apoyado y ayudado durante toda la elaboración del mismo.

Agradecer también a mis compañeros y amigos del Grado, que me han acompañado a lo largo de estos años.

Por último, agradecer a mi familia, que siempre ha tratado de apoyarme y aconsejarme en todo lo que les ha sido posible.

*Pablo Valencia Morillo*

*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

El objetivo de este proyecto es el análisis del retranqueo de las motas en el curso bajo del río Segura. Dichas motas, originalmente dispuestas en las márgenes del río, han restringido al máximo el espacio del cauce, alterando su dinámica natural.

Esta actuación consiste en trasladar las motas hasta una nueva ubicación, con la finalidad de devolver al río su antiguo espacio y a su vez contribuir a mitigar los efectos generados por las inundaciones.

Para llevar a cabo este proyecto, en primer lugar, se ha estudiado el comportamiento de la cuenca y se ha realizado un análisis estadístico de los caudales máximos instantáneos. Con la información proporcionada con esto último, se han generado los correspondientes hidrogramas de avenida, que se han utilizado en las simulaciones hidráulicas realizadas en el software HEC-RAS. Posteriormente, se ha utilizado AutoCAD Civil 3D para modelar el terreno y retranquear las motas hasta su ubicación final.

Por último, para comprobar el efecto de la actuación, se ha vuelto a hacer uso de HEC-RAS para el análisis de los resultados.



# Abstract

---

The goal of this project is to analyze the setback of the hillocks in the lower course of the Segura River. These hillocks, which were originally arranged on the banks of the river, have reduced the river space to the maximum, disrupting its natural dynamics.

This action consists of moving the hillocks to a new site. With these changes, the river will recover its old location and the effect of flooding will be mitigated.

Firstly, it was necessary to study the behavior of the basin, which provided the required information to carry through a statistical analysis of the maximum instantaneous flows. After that, the flood hydrographs could be generated and used to do the hydraulic simulations in HEC-RAS software. Subsequently, AutoCAD Civil 3D was employed to model the terrain and set back the specks to their final location. Finally, to check the effect of the modifications, HEC-RAS was again used to analyze the results.

# Índice

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Abstract.....	xi
Índice .....	xii
Índice de Tablas.....	xiv
Índice de Figuras .....	xv
<b>1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos del trabajo</i> .....	1
<b>2 Estado del arte .....</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Los espacios fluviales en España</i> .....	3
2.1.1 Encauzamientos .....	4
2.1.2 Restauración fluvial .....	6
2.1.3 Retranqueo de motas .....	7
2.1.4 Conectividad longitudinal, transversal y vertical .....	9
2.2 <i>Otros proyectos de recuperación de espacios fluviales en España</i> .....	10
2.3 <i>Marco legal</i> .....	11
2.3.1 Directiva Marco del Agua.....	11
2.3.2 Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación .....	11
2.3.3 Estrategia Nacional de Restauración de Ríos .....	12
2.3.4 Reglamento del Dominio Público Hidráulico.....	12
2.4 <i>Curso bajo del río del Segura</i> .....	13
2.4.1 Confederación Hidrográfica del Segura .....	13
2.4.2 Características de la Cuenca Hidrográfica del Segura.....	14
2.4.2.1 Climatología .....	14
2.4.2.2 Morfoestructura de la cuenca .....	14
2.4.2.3 Litología .....	15
2.4.3 Cronología de inundaciones en la cuenca del Segura .....	15
2.4.4 Localización del tramo de estudio.....	17
2.4.4.1 Población y servicios afectados por el desbordamiento del río Segura .....	18
2.4.5 Encauzamiento de la Vega Baja del río Segura .....	20
2.4.6 Retranqueo de las motas en el curso bajo del río Segura .....	22
2.4.7 La Confederación Hidrográfica del Segura en la actualidad.....	23
<b>3 Análisis estadístico de caudales .....</b>	<b>25</b>
3.1 <i>Metodología aplicada</i> .....	25
3.1.1 Estaciones de aforos .....	26
3.1.2 Datos de caudales .....	27
3.1.3 Análisis estadístico .....	30
3.1.4 Función de valores extremos generalizada (GEV) .....	32
3.1.5 Función de valores extremos de dos componentes (TCEV).....	35
3.1.6 Test de Kolmogorov-Smirnov .....	38
3.1.6.1 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función GEV.....	41

3.1.6.2	Test de Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV .....	42
3.1.7	Resumen y análisis de resultados hidrológicos .....	44
3.2	<i>Obtención de los hidrogramas de avenida</i> .....	45
<b>4</b>	<b>Modelo del terreno modificado</b> .....	<b>49</b>
4.1	<i>Proceso de modelado</i> .....	49
4.2	<i>Obtención de las curvas de nivel del terreno</i> .....	51
4.3	<i>Modificación del terreno original mediante AutoCAD Civil 3D</i> .....	51
4.3.1	Creación de la superficie base .....	51
4.3.2	Eliminación de las motas originales .....	53
4.3.3	Retranqueo de las motas .....	57
4.3.4	Errores de triangulación en la superficie final .....	62
4.3.5	Exportación del terreno modificado desde Civil 3D a HEC-RAS .....	63
<b>5</b>	<b>Modelo de simulación hidráulica</b> .....	<b>65</b>
5.1	<i>Software HEC-RAS</i> .....	65
5.1.1	Modelo Digital de Elevaciones.....	66
5.1.2	Definición de la malla computacional 2D .....	68
5.1.3	Capa de Manning.....	71
5.1.4	Condiciones de contorno .....	74
5.1.5	Condiciones de análisis de la simulación hidráulica.....	75
5.1.6	Adición de elementos <i>weir</i> en el terreno base.....	78
<b>6</b>	<b>Análisis de resultados</b> .....	<b>81</b>
6.1	<i>Comparación de los modelos de terreno</i> .....	81
6.2	<i>Condiciones de contorno</i> .....	83
6.3	<i>Comparativa de hidrogramas con distintos tiempos base</i> .....	86
6.4	<i>Influencia de la presencia de dos puntas en el hidrograma característico de la cuenca</i> .....	91
6.5	<i>Influencia de las motas. Período de retorno de 25 años</i> .....	97
6.6	<i>Influencia de las motas. Período de retorno de 10 años</i> .....	113
6.7	<i>Movimiento de tierras del proceso de retranqueo</i> .....	116
6.8	<i>Superficie del terreno a expropiar</i> .....	117
<b>7</b>	<b>Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b> .....	<b>119</b>
7.1	<i>Conclusiones</i> .....	119
7.2	<i>Líneas de trabajo futuro</i> .....	120
	<b>Referencias</b> .....	<b>121</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Municipio y Población. Comarca Vega Baja del Segura	19
Tabla 3.1 Serie de caudales obtenida de la estación de aforo	28
Tabla 3.2 Caudales instantáneos	29
Tabla 3.3 Tabla de Funciones de distribución para cada región estadística. Fuente: <i>Guía Metodológica para el Desarrollo de Zonas Inundables</i>	32
Tabla 3.4 Valores de los parámetros. Función GEV	35
Tabla 3.5 Caudales máximos según la función GEV	35
Tabla 3.6. Parámetros log-Normal	36
Tabla 3.7 Comprobación de datos anómalamente altos (Outliers)	36
Tabla 3.8 L-coeficiente de variación y parámetros de la regresión. Función TCEV. Fuente: GMDZI	38
Tabla 3.9 Caudales máximos según la función TCEV	38
Tabla 3.10 Test de Bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	40
Tabla 3.11 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función GEV	41
Tabla 3.12 Resultados test de bondad. Función GEV	41
Tabla 3.13 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV	42
Tabla 3.14 Resultados test de bondad. Función TCEV	43
Tabla 3.15 Resumen de Caudales Máximos	44
Tabla 5.1 Valores del coeficiente de rugosidad de Manning	72
Tabla 6.1 Hidrograma de entrada. Q25. Tiempo base: 48h	83
Tabla 6.2 Caudales hidrograma con 2 puntas	92
Tabla 6.3 Volúmenes de desmonte y terraplén	116
Tabla 6.4 Superficie a expropiar. Fuente: Dirección General del Catastro	118

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Encauzamiento del río Segura	4
Figura 2.2 Tendencia erosiva producida por un encauzamiento	5
Figura 2.3 Río encauzado	7
Figura 2.4 Eliminación del encauzamiento	7
Figura 2.5 Río recuperando su dinámica fluvial	7
Figura 2.6 Retranqueo de motas. Caudal bajo. Fuente: <i>Ecologistas en Acción</i>	8
Figura 2.7 Retranqueo de motas. Crecida moderada. Fuente: <i>Ecologistas en Acción</i>	8
Figura 2.8 Retranqueo de motas. Gran crecida. Fuente: <i>Ecologistas en Acción</i>	8
Figura 2.9 Retranqueo de motas. Gran crecida. Motas retranqueada. Fuente: <i>Ecologistas en Acción</i>	9
Figura 2.10 Mapa de la Cuenca del Segura. Fuente: CHS	13
Figura 2.11 Mapa de Altitudes. Fuente: CHS	14
Figura 2.12 Vega Baja del Segura (Noviembre de 1987). Fuente: Atlas Global de la Región de Murcia	16
Figura 2.13 Localización del tramo de estudio. Fuente: CHS	17
Figura 2.14 Tramo de estudio. Curso bajo del río Segura	18
Figura 2.15 Municipios afectados. Tramo de estudio	19
Figura 2.16 Vías afectadas. Tramo de estudio	20
Figura 2.17 Antiguo cauce del río Segura	21
Figura 2.18 Antiguos meandros del río Segura	22
Figura 2.19 Antiguo meandro del río Segura	23
Figura 3.1 Localización de la estación de aforo de Jacarilla. Fuente: Red de Seguimiento	26
Figura 3.2 Expresión de Fuller	27
Figura 3.3 Regresión lineal entre caudales medios diarios e instantáneos	29
Figura 3.4 Regiones con comportamiento estadístico homogéneo, respecto a los caudales máximos anuales. Fuente: Mapa de Caudales Máximos	31
Figura 3.5 Momentos ponderados probabilísticamente (PWM)	33
Figura 3.6 Función de distribución GEV	33
Figura 3.7 Expresión de los momentos ponderados probabilísticamente	33
Figura 3.8 <i>Expresiones de los L-Momentos</i>	34
Figura 3.9 <i>Coefficientes adimensionales de los L-Momentos</i>	34
Figura 3.10 Parámetros de la función GEV	34
Figura 3.11 Distribución log-Normal	36
Figura 3.12 Función de distribución TCEV	37
Figura 3.13 Parámetros primera rama, función TCEV	37
Figura 3.14 Parámetros segunda rama, función TCEV	38
Figura 3.15 Expresión distribución muestral, $F_s$	39
Figura 3.16 Diferencia entre frecuencias teóricas y observadas	39

Figura 3.17 Distancia Kolmogorov-Smirnov. Función GEV	42
Figura 3.18 Distancia Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV	43
Figura 3.19 Hidrogramas de avenida. Comarca Vega Baja del Segura. Fuente: CHS	45
Figura 3.20 Ríos Demarcación Hidrográfica del Segura. Fuente: CHS	46
Figura 4.1 Enumeración de las motas	49
Figura 4.2 EDAR de Algorfa. Fuente: Google Earth	50
Figura 4.3 Vías de tránsito adyacentes al río	50
Figura 4.4 Curvas de nivel obtenidas mediante Global Mapper	51
Figura 4.5 Modelo del terreno original	52
Figura 4.6 Modelo del terreno original	52
Figura 4.7 Perfil longitudinal. Mota 2	53
Figura 4.8 Perfil longitudinal. Mota 11	53
Figura 4.9 Obra lineal. Mota 4	54
Figura 4.10 Obra lineal, anchura variable. Mota 6	55
Figura 4.11 Propiedades obra lineal. Mota 6 (original)	55
Figura 4.12 Asignación de objetivos de la obra lineal	56
Figura 4.13 Comparación de terreno original (izquierda) con terreno modificado (derecha). Mota 1	57
Figura 4.14 Antiguo meandro. Mota 1	58
Figura 4.15 Antiguos meandros. Motas 2 y 3	58
Figura 4.16 Antiguo meandro. Mota 5	59
Figura 4.17 Perfil de superficie y rasante. Mota 1	59
Figura 4.18 Perfil de superficie y rasante. Mota 5	60
Figura 4.19 Perfil de superficie y rasante. Mota 4	60
Figura 4.20 Vista en planta. Mota 1 retranqueada	61
Figura 4.21 Mota 4 retranqueada	61
Figura 4.22 Vista en planta. Motas 12 y 13 retranqueadas	62
Figura 4.23 Error de triangulación. Mota 11	62
Figura 4.24 Espacio vacío en el terreno, mota 11. HEC-RAS	63
Figura 5.1 Interfaz HEC-RAS (5.0.7)	66
Figura 5.2 Superficie del terreno original	67
Figura 5.3 Detalles terreno modificado	67
Figura 5.4 Detalles terreno modificado	67
Figura 5.5 Geometric Data. HEC-RAS	68
Figura 5.6 Línea de condición de contorno aguas arriba	69
Figura 5.7 Ajuste de línea de rotura a la malla 2D	69
Figura 5.8 Malla 2D refinada	70
Figura 5.9 Malla 2D. Situación Actual	70
Figura 5.10 Malla 2D. Situación Futura	71
Figura 5.11 Capa de coeficiente de rugosidad de Manning	74

Figura 5.12 Unsteady Flow Data	75
Figura 5.13 Unsteady Flow Analysis	76
Figura 5.14 Acequia desbordada	78
Figura 5.15 Perfil de vertedero ( <i>weir</i> )	79
Figura 6.1 Comparación Terreno Actual y Terreno Futuro	82
Figura 6.2 <i>Weir</i> dispuestos sobre el terreno modificado	82
Figura 6.3 Hidrograma de entrada. Q25. $T_{base}:48h$	85
Figura 6.4 Condición de contorno aguas abajo. <i>Normal depth</i>	85
Figura 6.5 Condición de contorno. Salida Norte. <i>Normal Depth</i>	86
Figura 6.6 Vista en planta de la línea “Inicio Tramo”	87
Figura 6.7 Profundidad para Q25. Tiempo base de 48h, 24h y 12h	88
Figura 6.8 Vista en planta de la línea “Tramo final”	88
Figura 6.9 Calados para Q25. Tiempos base de 48h, 24h y 12h. Tramo final	89
Figura 6.10 Elevación de la Superficie del agua. Tramo final	89
Figura 6.11 Velocidades máximas. Inicio tramo	90
Figura 6.12 Velocidades máximas. Tramo final	90
Figura 6.13 Hidrogramas de avenida. Comarca Vega Baja del Segura. Fuente: CHS	91
Figura 6.14 Hidrograma con dos caudales punta	92
Figura 6.15 Calados correspondientes a los dos hidrogramas. Tramo inicial	93
Figura 6.16 Calados correspondientes a los dos hidrogramas. Tramo final	93
Figura 6.17 Vista en planta de la línea “Llanura de inundación 2”	94
Figura 6.18 Calados en la llanura de inundación	94
Figura 6.19 Vista en planta de la línea “Sección desborde”	95
Figura 6.20 Superficie del agua. Sección desbordada	95
Figura 6.21 Superficie del agua. Sección desbordada	96
Figura 6.22 Superficie del agua. Sección desbordada	96
Figura 6.23 Llanura de inundación. Situación inicial	98
Figura 6.24 Llanura de inundación. Situación futura	98
Figura 6.25 Ubicación de las motas retranqueadas en el tramo de estudio	99
Figura 6.26 Motas inundadas. Comienzo de la simulación. Tramo inicial	99
Figura 6.27 Motas inundadas. Comienzo de la simulación. Tramo final	100
Figura 6.28 Motas inundadas. Tramo inicial	100
Figura 6.29 Mota 2	101
Figura 6.30 Mota 4	102
Figura 6.31 Velocidades. Tramo inicial	103
Figura 6.32 Desbordamiento zona inicial del tramo. Situación actual	104
Figura 6.33 Terreno original. Tramo medio	104
Figura 6.34 Terreno futuro. Tramo medio	105

Figura 6.35 Elevación de la superficie del agua. Mota 7. Situación actual	105
Figura 6.36 Elevación de la superficie del agua. Mota 7. Situación futura	106
Figura 6.37 Calados. Mota 8	106
Figura 6.38 Cruce CV-91 y CV-935	107
Figura 6.39 Desbordamiento en cruce CV-91 y CV-935	107
Figura 6.40 Motas 10 y 11 inundadas	108
Figura 6.41 Terreno inundado. Mota 11 original	109
Figura 6.42 Evolución de la inundación. Mota 11	109
Figura 6.43 Llanura de inundación. Tramo final	110
Figura 6.44 Motas 12 y 13	110
Figura 6.45 Elevación de la Superficie del Agua. Mota 13	111
Figura 6.46 Velocidades. Tramo Final	112
Figura 6.47 Velocidades. Llanura de inundación. Tramo final	112
Figura 6.48 Situación actual (derecha) y futura (izquierda). Tramo inicial	113
Figura 6.49 Mota 7. Período de retorno 10 años	114
Figura 6.50 Motas 10 y 11. Periodo de retorno 10 años	115
Figura 6.51 Motas 12 y 13. Período de retorno 10 años	115

# 1 INTRODUCCIÓN

---

España se caracteriza por presentar un régimen pluviométrico muy variable, pues en reiteradas ocasiones se producen períodos de sequía seguidos de episodios de precipitaciones extremas, lo cual genera un aumento repentino de caudales, alcanzando valores muy superiores a los que tendrían lugar en situaciones normales. De esta forma, dichos caudales generan crecidas de los ríos muy considerables, desembocando en la anegación de los terrenos en torno a los cauces.

Como se ha mencionado, es posible encontrar una gran diversidad de regímenes de lluvia dentro del territorio español, ya que, en zonas como los litorales Cantábrico y Mediterráneo, tienen mayor ocurrencia lluvias torrenciales, por lo que sus cauces presentarán un comportamiento distinto al de otras zonas de la península.

Es preciso tener en cuenta que fenómenos extremos, como es el caso de las inundaciones, no sólo tienen su origen en las precipitaciones muy intensas, sino también al deshielo de las nieves al comienzo de las épocas estivales, mareas vivas o situaciones como roturas o uso incorrecto de embalses o presas. Sin embargo, este trabajo se centrará fundamentalmente en el estudio de las crecidas e inundaciones ocasionadas por las precipitaciones, lo cual se verá posteriormente que tiene grandes consecuencias en el comportamiento fluvial.

A lo largo de la historia, el ser humano se ha servido de los recursos proporcionados por los ríos para su abastecimiento, así como llevar a cabo la implantación en su curso de infraestructuras como embalses y presas que condujeron a una modificación del comportamiento hidrodinámico de los cauces.

Además de esto, durante las décadas pasadas, gran parte del territorio ha sido transformado, principalmente para uso urbano e industrial, provocando un grave deterioro ecológico de los cursos, con la consecuente pérdida de hábitats y especies animal y vegetal, pues siempre los ríos han desempeñado un papel fundamental desde el punto de vista de la conservación natural. La pérdida de territorio no sólo involucra la pérdida de hábitat, sino que a su vez produce la alteración del comportamiento fluvial, en especial durante los episodios de avenida, en los que se han desencadenado numerosas catástrofes, tales como desbordamientos e inundaciones, causando importantes pérdidas materiales y humanas, en muchos casos. Así, las crecidas implican importantes repercusiones económicas y sociales en el territorio afectado.

Estos últimos fenómenos tienen lugar debido a que las actuaciones humanas que se han ejecutado en torno a las riberas de los cauces no han presentado un estudio adecuado, primando las necesidades urbanísticas, como por ejemplo la construcción de urbanizaciones, parques o polígonos industriales. Esta situación ha desembocado en muchos casos en la anegación del terreno más cercano al río con fatales consecuencias, ya que el corredor natural del cauce se ha visto reducido considerablemente.

No obstante, el comportamiento para con a los ríos en el pasado cada vez está menos presente, y es que la sociedad actual presenta una mayor consciencia acerca de la necesidad de reestablecer el curso natural de los cauces, para lo cual existen diversas organizaciones que tienen por objeto la mejora y restauración de los ríos y, por ende, esto inducirá en una disminución de los posibles riesgos y daños en regímenes extremos.

## 1.1 Objetivos del trabajo

A modo de resumen, se expondrán los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado:

- Planteamiento general de la problemática de las inundaciones en España y las medidas para mitigar sus efectos.
- Análisis del comportamiento hidrológico del curso bajo del río Segura.
- Análisis estadístico de los caudales máximos y obtención de los hidrogramas de avenida.

- Simulación hidráulica en dos situaciones:
  - Escenario inicial, donde las motas se ubican en su situación original, en las márgenes del río.
  - Escenario futuro, una vez las motas han sido retranqueadas hasta su nueva ubicación.
- Análisis de la influencia del retranqueo de las motas durante las avenidas.

Estos puntos serán tratados de manera exhaustiva en los siguientes apartados.

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

**E**n este apartado se describirá el tramo de estudio de este Trabajo de Fin de Grado, presente en el curso bajo del río Segura. Con ello se pretende conocer el comportamiento hidrológico de este cauce y los efectos que las inundaciones han producido sobre el territorio en torno a él. Además, se explicará la actuación que se llevará a cabo en dicho río, la cual consiste en el retranqueo de las motas dispuestas en las márgenes, con objeto de recuperar el espacio fluvial y, a su vez, contribuir a mitigar las afecciones generadas por los episodios de avenida.

Previamente, se expondrán, de manera general, ciertos aspectos relacionados con el trabajo que se pretende realizar, a fin de contextualizar la problemática existente en relación con las inundaciones y la restauración fluvial en España.

### 2.1 Los espacios fluviales en España

Las redes fluviales son sistemas de drenaje natural del agua caída sobre sus respectivas cuencas, siendo por tanto la función principal de un río desaguar el agua que cae sobre la superficie de su cuenca. Así, el funcionamiento natural de los ríos limita un determinado caudal circulante, el cual una vez es superado, genera el desbordamiento del mismo y la posterior inundación del terreno. Las inundaciones suponen el mecanismo principal de la dinámica fluvial y también contribuyen a que el río reestablezca su funcionamiento natural. Esta apreciación de las inundaciones son las que, aún en la actualidad, la población no ha tomado conciencia de ello.

Durante las últimas décadas, en la gestión de los espacios fluviales han predominado los aspectos ingenieriles, donde los ríos se han considerado únicamente como fuente de recursos, los cuales debían ser explotados al máximo. Así, se han implantado diferentes infraestructuras y se han llevado a cabo actuaciones, tales como encauzamientos, cortes de meandros..., que, en ocasiones, han contribuido a acrecentar los efectos de las inundaciones sobre el territorio, además de reducir notablemente el espacio fluvial y modificar el comportamiento dinámico de los cauces.

El problema principal radica en que las actuaciones mencionadas anteriormente se llevaron a cabo sin tener en cuenta que los ríos son sistemas que cambian de manera continua, tanto temporal como espacialmente, por lo que el hecho de reducir su territorio natural finalmente conlleva una serie de consecuencias que en muchas ocasiones resultan más severas y dañinas que las ocurridas antes de las actuaciones.

Asimismo, en muchos casos se ha optado por la eliminación de la vegetación predominante en el río y los sotos colindantes con éstos. La vegetación presenta un papel muy relevante en la dinámica fluvial, ya que su presencia contribuye a estabilizar la geometría del cauce, proteger de la erosión y disminuir el transporte de sedimentos. De esta forma, desde un punto de vista ingenieril, los ríos debían estar libres de vegetación para así aumentar la velocidad del flujo, reduciendo el riesgo de inundaciones.

Otro aspecto por considerar son las políticas territoriales presentes en multitud de municipios repartidos por toda la península. Los espacios más próximos a los cauces han sido ocupados sin medida, alterando y apropiándose de aquellas áreas que potencialmente son inundadas por las aguas de los cauces. Cuando se producen episodios de avenida en los que la capacidad de desagüe del cauce se ve superada tienen lugar situaciones que son agravadas debido a que el flujo del río tiende a circular por las tierras que, de manera natural, forman parte de la llanura de inundación. Tal es el caso de la comarca de la Vega Baja del Segura, donde muchas poblaciones han ido expandiendo sus términos municipales hacia áreas próximas al río, lo cual ha generado que se hayan visto gravemente afectadas durante episodios de avenida.

Generalmente, en zonas con frecuentes inundaciones se han tomado medidas para paliar sus efectos, pero una vez han ocurrido una serie de catástrofes que bien podían haber sido mitigadas si se hubiesen adoptado planes contra inundaciones de forma previa. Así, normalmente se ha seguido un esquema genérico respecto a la toma de medidas:

1. Detectar problemas en el cauce.
2. Intervenciones en el cauce, ya sean dragados, encauzamientos, u otras acciones.
3. Las intervenciones han supuesto consecuencias, que en ocasiones generan efectos aún más negativos en el medio del cauce y las zonas adyacentes.
4. Al modificar el cauce, éste reacciona a corto plazo, pudiendo producirse el aumento del nivel del lecho, mayor sedimentación...
5. Con ello, el sistema fluvial se desequilibra aún más.
6. Las medidas tomadas para mitigar las inundaciones resultan ineficaces y obsoletas.

En relación con las actuaciones en ríos, en este caso presenta una especial relevancia la implantación de un encauzamiento, que sustituye al cauce original. Para proporcionar un mayor conocimiento acerca de esta actuación, se describirán a continuación sus características más importantes.

### 2.1.1 Encauzamientos

En este apartado se detallarán los aspectos más relevantes de este tipo de actuación en los cauces, así como los posibles efectos que pudieran generar en las áreas colindantes a los ríos. Asimismo, se expondrán algunas de las razones por las que se induce a llevar a cabo este tipo de actuaciones.

Uno de los objetivos por los cuales se realizan encauzamientos es la protección de las márgenes del río y de los terrenos en torno a éste frente a las inundaciones que tienen lugar durante episodios de avenidas, lo cual conlleva la destrucción de cultivos y la anegación de multitud de áreas, con las correspondientes pérdidas de carácter económico y humano que pudieran generarse.



Figura 2.1 Encauzamiento del río Segura

En relación con los aspectos socioeconómicos, con este tipo de actuación se pretende asegurar un comportamiento más estable del río, evitando la “amenaza” que los cambios de régimen puedan ocasionar. La característica principal de los encauzamientos radica en la creencia de una mejora en la capacidad de desagüe del cauce, consiguiendo un mayor caudal de paso, controlado bajo unas determinadas condiciones.

Para comprender mejor el funcionamiento de este tipo de actuación es preciso conocer los efectos que estos conllevan, desde el punto de vista hidráulico.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que los ríos son sistemas dinámicos, donde se producen cambios o modificaciones a causa de acciones exteriores. Según las características de la cuenca, de los materiales, la pendiente del terreno, así como el régimen hidrológico, los cauces naturales presentan modificaciones longitudinales y verticales, es decir, cambios de planta y cambios de fondo, respectivamente. De esta forma, los ríos fluyen transportando agua y materiales sólidos, todo dentro de un sistema autoequilibrado, siempre que se respete su comportamiento hidráulico. Queda pues establecida la importancia que supone el transporte de sólidos como medio fundamental del que dispone el cauce para producir los cambios dentro de su sistema de autoequilibrio.

Es por ello por lo que la implantación de ciertas infraestructuras dentro del río, tales como puentes, presas..., conllevan una alteración importante en la dinámica longitudinal. Es habitual la implantación de obras contra inundaciones en áreas próximas a las desembocaduras de los ríos, como es el caso de la Vega Baja del Segura, en la que el curso final del río Segura está conformado por un encauzamiento del propio río, realizado en décadas anteriores con el objetivo de reducir las frecuentes inundaciones que tenían lugar, y aún a día de hoy, se producen en la zona.

Uno de los aspectos más relevantes de estas actuaciones es la pérdida del espacio del río, impidiendo que éste desarrolle la dinámica fluvial de forma natural, lo cual ha generado graves situaciones durante episodios de avenidas, como se podrá comprobar posteriormente.

Por tanto, es preciso considerar los posibles efectos adversos que los encauzamientos puedan acarrear, ya que ciertos cauces suelen presentar una tendencia a originar un delta en su desembocadura, de manera que la pendiente del río disminuye, favoreciendo la sedimentación de materiales en el fondo, lo cual conlleva la subida del lecho, aumentando la posibilidad de desbordamiento y la consecuente inundación del terreno en caso de avenidas.

Ante estos fenómenos, las obras de defensa contra inundaciones se han visto modificadas y recrecidas. El recrecimiento de estas estructuras ha contribuido a mitigar parte de los efectos producidos por las inundaciones, aunque también ha generado impactos negativos, principalmente aumentando el riesgo de laminación, ya que dificultan la evacuación de las aguas circulantes en el cauce.

Por otra parte, está presente el problema de la incisión del cauce, y es que, al confinar el agua, ésta adquiere mayor poder erosivo, generando calados más profundos, lo que puede generar la reducción de la diversidad de hábitats, perjudicando los ecosistemas de las riberas. Los efectos derivados de la incisión se relacionan con los conceptos de continuidad longitudinal y de conectividad transversal y vertical, conceptos que se explicarán más adelante.

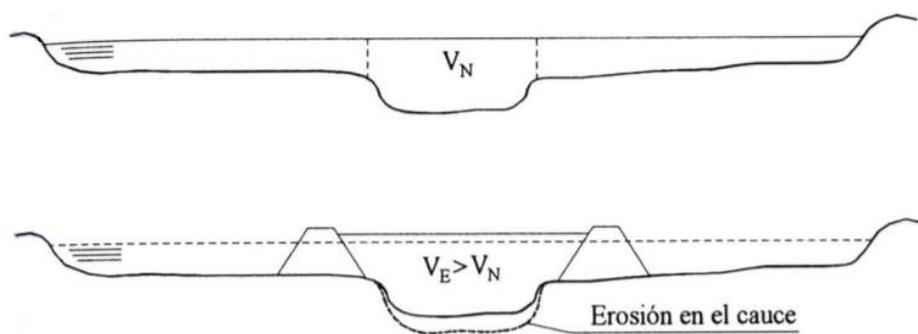


Figura 2.2 Tendencia erosiva producida por un encauzamiento

Todos los aspectos mencionados anteriormente han generado la degradación de muchos sistemas fluviales en España provocando graves consecuencias ante episodios de avenidas, en los que muchos municipios, infraestructuras y demás servicios se han visto muy afectados. Asimismo, esta situación conduce a problemas medioambientales en muchos de los cauces, lo cual ha hecho que la restauración fluvial tenga cada vez más cabida en el ámbito fluvial.

## 2.1.2 Restauración fluvial

En las últimas décadas, y más concretamente en la última mitad del siglo XX, los ríos han sido considerados únicamente como una fuente inagotable de recursos, sin tener en cuenta sus propios procesos internos y para con el medio.

Según se expone en el libro de Alfredo Ollero *Guía Metodológica sobre buenas prácticas en restauración fluvial*, restaurar consiste en restablecer los procesos de un sistema natural, como pudiera ser un río, devolviéndole su estructura original, así como su función, su territorio y sus procesos dinámicos. Tal como se ha mencionado en el apartado anterior los ríos son sistemas autoequilibrados, es decir, por sí solos retornan a su dinámica natural. Por tanto, el papel que la restauración fluvial desempeñaría sería la de eliminar aquellos impactos que degradan el sistema fluvial y tomar las medidas que resulten necesarias para que dicho sistema alcance de nuevo su funcionamiento original, lo cual aportará beneficios sobre la sociedad.

Ahora bien, muchas veces la recuperación completa de los espacios fluviales resulta una tarea realmente compleja, ya que podrían entrar en conflicto diversas competencias, tales como aspectos políticos, legales, ingenieriles o ecológicos, entre otros. Un ejemplo de ello puede ser el río Segura a su paso por la comarca Vega Baja, donde el canal del cauce está altamente integrado con el territorio y se ha visto considerablemente reducido en aras de la extensión urbanística y agraria. Por esta razón, resulta difícil que el cauce recupere completamente su antiguo espacio fluvial.

No obstante, el hecho de una recuperación parcial del sistema fluvial no implica que ésta no deba ser llevada a cabo, pues el concepto de restauración reside más bien en transformar el sistema fluvial en uno equivalente, próximo al de su estado original, pero no idéntico, ya que puede suceder que las características del terreno, la ocupación del territorio colindante, entre otros factores, se hayan visto muy alterados con respecto a etapas pasadas, dificultando el proceso de recuperación del río.

La restauración fluvial es una modalidad relativamente nueva si se compara con otras ramas de la ingeniería. Actualmente, en España se está desarrollando la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, un conjunto de actuaciones con el objetivo de conservar y recuperar el buen estado de los ríos del país, así como fomentar el uso racional del espacio fluvial y minimizar los riesgos de inundación. En estos últimos puntos es donde tiene cabida el objetivo que se pretende realizar: retranquear las motas.

Esta iniciativa comenzó en 2006, a propuesta del entonces Ministerio de Medio Ambiente, actualmente Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Su objetivo principal era marcar una serie de principios generales relativos a la restauración fluvial y fomentar el conocimiento sobre la dinámica y funcionamiento natural de los ríos en España por parte de los técnicos encargados de su gestión. En la actualidad, promueven proyectos de intervención en ríos, fijándose principalmente en la planificación, de manera que se consiga un aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos y la conservación de los sistemas fluviales.

Como se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de la actividad agrícola y la transformación de los ríos han generado un gran impacto en los sistemas fluviales de diversas cuencas hidrográficas del país, pues ha supuesto una modificación del equilibrio y las condiciones naturales de los ríos que las conforman.

En resumen, existen una serie de objetivos a los cuales la restauración fluvial debe ceñirse.

- Recuperar el espacio fluvial. Resulta un factor fundamental, ya que con la recuperación del territorio el río podría recobrar su dinámica natural.
- Recuperar los procesos y las formas fluviales. Devolverle al río su forma original supondría un mejor comportamiento de éste ante situaciones extremas, tales como episodios de avenidas.
- Garantizar la continuidad de los ríos.

Concretamente, en relación a los encauzamientos, la restauración fluvial consistiría en realizar el proceso que se describe a continuación.

1. En primer lugar, el río se encuentra encauzado en el terreno, por lo que no es capaz de realizar sus procesos dinámicos de manera natural, pues su espacio se ha visto considerablemente reducido.

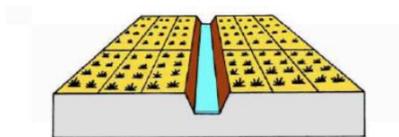


Figura 2.3 Río encauzado

2. Posteriormente, se deben eliminar las estructuras de rigidez del cauce, permitiéndole a éste recuperar poco a poco su antiguo espacio.

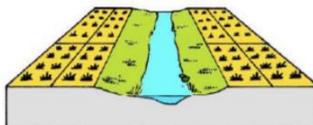


Figura 2.4 Eliminación del encauzamiento

3. Con el tiempo, el río irá reestableciendo su dinámica natural, consiguiendo además una mayor conexión con el entorno que le rodea.

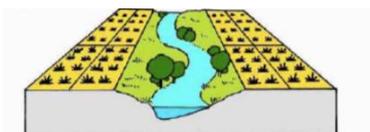


Figura 2.5 Río recuperando su dinámica fluvial

Existen diversas soluciones que se pueden tomar como medidas para alcanzar esta meta, entre las que se encuentra el retranqueo de motas, actuación que se quiere analizar en este Trabajo de Fin de Grado. A continuación, se explicará en qué consiste esta actuación, a fin de proporcionar un mayor conocimiento acerca de su funcionamiento.

### 2.1.3 Retranqueo de motas

El retranqueo de motas constituye una forma simple de devolverle al río su antiguo espacio. Con ello se pretende proporcionar una mayor anchura al cauce, no sólo con fines medioambientales, sino también con el objetivo de mitigar los riesgos generados durante las crecidas extraordinarias del río que provoquen el desbordamiento del mismo.

Las motas son defensas longitudinales normalmente dispuestas en las márgenes de los ríos y cuya función principal es impedir el desbordamiento del río y la consecuente inundación de las áreas en torno a él. Por tanto, suponen la separación entre el cauce y los distintos usos de suelo que se han instalado en la llanura de inundación.

En ocasiones, son aprovechadas como caminos en las riberas de los ríos, por lo que el material del que están hechas es de tierras compactadas y recubiertas por gravas para que adquieran un aspecto más concordante con el terreno en torno a ellas.

Estas estructuras han provocado diversos problemas, tales como:

- Generar una sobreelevación del flujo del río durante las crecidas.
- Alterar la distribución de los sedimentos del lecho y los transportados por el flujo, pues tienden a concentrarlos en el cauce menor.
- Dificultar la dinámica lateral del sistema fluvial.
- Dificultar el regreso al cauce menor de las aguas que se han desbordado durante una crecida.

- Disminuir la capacidad de laminación en la llanura de laminación, ya que dificultan el desbordamiento del cauce, lo cual puede conllevar efectos más devastadores.
- Si no presentan una adecuada estructura y grado de compactación se pueden deteriorar rápidamente tras un episodio de crecida, produciendo daños mayores.

No obstante, si estas estructuras se reubicasen hasta zonas más alejadas del cauce no presentarían efectos tan negativos, ya que se podrían obtener grandes beneficios gracias a su nueva localización.

- Incrementar la anchura del cauce activo. Esto provocaría una reducción de la energía de la corriente del flujo durante las crecidas, por lo que los efectos generados por ella no serían tan severos.
- Mejor distribución de los sedimentos transportados por el flujo de las crecidas, permitiendo al río adquirir una dinámica fluvial equivalente, más similar a la que presentaba antes de la reducción de su espacio natural.
- Ralentizar la acción de las crecidas. El río, al ocupar más espacio permite que las crecidas se ralenticen, favoreciendo así la laminación.

A fin de que resulte más claro el concepto de retranqueo, se muestran a continuación diversos esquemas que explican con sencillez en qué consiste esta actuación.



Figura 2.6 Retranqueo de motas. Caudal bajo. Fuente: *Ecologistas en Acción*



Figura 2.7 Retranqueo de motas. Crecida moderada. Fuente: *Ecologistas en Acción*

Cuando circulan el caudal bajo del río y el caudal de crecida moderada, las motas cumplen su función protegiendo a los cultivos y demás parcelas adyacentes, impidiendo que el agua llegue hasta los municipios.



Figura 2.8 Retranqueo de motas. Gran crecida. Fuente: *Ecologistas en Acción*

El principal problema se encuentra cuando las motas son dispuestas muy cerca del canal del río, ya que su función al no ser capaces de retener la inundación o, al menos, mitigar sus efectos. Se pierde el efecto de laminación, generando que el agua se desborde precipitadamente y con mayor energía, pudiendo afectar severamente a los municipios y demás servicios.



Figura 2.9 Retranqueo de motas. Gran crecida. Motas retranqueada. Fuente: *Ecologistas en Acción*

No obstante, si se retranquean las motas hasta zonas más alejadas del canal, las parcelas más próximas al río se verán afectadas por la inundación, pero los efectos devastadores de las crecidas se ven disminuidos por la acción de las motas. Éste resulta el aspecto principal de esta actuación contra las inundaciones.

Además de las características anteriores, esta medida no presenta una gran complejidad en su realización. Requiere de maquinaria y de material para conformar las motas, el cual podría incluso proceder del mismo río.

#### 2.1.4 Conectividad longitudinal, transversal y vertical

Las márgenes de los ríos son zonas con gran dinámica, tanto temporal como espacial. Es por ello por lo que resulta de vital importancia la zonificación adecuada del espacio fluvial según la frecuencia con la que se produzcan las inundaciones. De esta forma, se debe garantizar la funcionalidad de las riberas con sus respectivos cauces. En relación a la restauración fluvial, es preciso remarcar tres aspectos muy importantes a tener en cuenta cuando se pretende llevar a cabo cualquier actuación sobre un río.

- Conectividad longitudinal. La existencia de una banda de vegetación a lo largo del cauce contribuye al control del flujo o movimiento del agua, nutrientes, sedimentos y especies a través del corredor fluvial. Un curso fluvial en el que no existan estructuras ni demás barreras construidas por la acción humana presenta una continuidad desde su nacimiento hasta su desembocadura, lo cual resulta fundamental para el correcto funcionamiento del sistema fluvial y de sus ecosistemas. Las defensas longitudinales que se dispongan en el curso del río alterarán la funcionalidad del sistema y afectarán también a los procesos transversales.
- Conectividad transversal. Se relaciona con la forma en la que el canal del cauce se une con sus riberas y la llanura de inundación. Permite el intercambio de agua, nutrientes y sedimentos entre el cauce y la llanura de inundación, lo cual resulta esencial para mantener la biodiversidad y los procesos del río. Sólo se hace operativa con las avenidas, ya sean ordinarias o extraordinarias.
- Conectividad vertical: La permeabilidad de los materiales del cauce y de las riberas permite la existencia de flujos subsuperficiales y subterráneos. Por tanto, esta conectividad supone la conexión que debe existir de manera natural entre el curso fluvial con la zona hiporreica y el nivel freático. La zona hiporreica se define como la zona de transición que se encuentra por debajo de los cauces de los ríos donde convergen y se producen intercambios entre las aguas superficiales y subterráneas.

El encauzamiento del río Segura privó de una notable superficie que el río precisaba para realizar sus procesos de manera natural, lo cual afectó considerablemente a los episodios de avenidas que han ido sucediéndose a lo largo de los últimos años. Por esta razón, la conectividad lateral es una propiedad que se ha pretendido garantizar al realizar la traslación de las motas. Si la ribera está interconectada con el cauce correctamente, los desbordamientos que pudieran generarse durante las crecidas redistribuirán los sedimentos, favoreciendo el buen funcionamiento del sistema fluvial.

Asimismo, la conectividad longitudinal también se vio afectada por el encauzamiento, pues el trazado del cauce

fue altamente modificado al eliminar numerosos meandros, dificultando por tanto la evacuación de los caudales y tornándose en zonas sensibles al desbordamiento. De esta forma, la actuación de retranquear las motas puede ayudar a mejorar la conectividad longitudinal, debido a que el río tomará una forma más similar a la que presentaba antes de ser encauzado.

Por último, la conectividad vertical se verá afectada en cuanto a los procesos que se dan en el perfil del flujo, pues la canalización del río ha afectado al transporte de sedimentos, así como a los calados y velocidades que el río presentaba anteriormente. Al recuperar parcialmente el antiguo espacio del cauce, los procesos presentes en él serán más similares a los del río original.

## 2.2 Otros proyectos de recuperación de espacios fluviales en España

Al igual que ocurre con el río Segura, existen otros cauces cuyo espacio para el desbordamiento natural se ha visto modificado de manera considerable, lo que ha generado muchos problemas durante las crecidas. Un ejemplo de ello es el curso medio del río Órbigo, en la provincia de León.

La Confederación Hidrográfica del Duero llevó a cabo este proyecto de mejora durante 2011 y 2012, destacando por su valor como ejemplo de la aplicación de la *Directiva Marco del Agua* y de la *Directiva de Inundaciones*. Las obras realizadas dieron lugar a una recuperación de la conectividad transversal y longitudinal del río, mejorando así la capacidad de laminación natural, disminuyendo por tanto el riesgo ante posibles inundaciones y ayudando a la regeneración de los espacios fluviales.

El proyecto consistió en la retirada o retranqueo de decenas de kilómetros de motas, recuperando cientos de hectáreas de la llanura de inundación y gran parte del antiguo cauce, con lo que se consiguió también la regeneración ecológica de las riberas. Además de ello, las obras desempeñadas durante su ejecución no presentaron una dificultad excesiva, ya que únicamente fueron necesarios trabajos con maquinaria y movimientos de tierra, lo cual, bajo una buena planificación previa, tuvo buenos resultados.

Debido a estos resultados, el proyecto supuso un ejemplo de aplicación de la Directiva Marco del Agua y de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, lo que llegó a ser finalista del premio *European Riverprize*, concedidos por la denominada International River Foundation, fundación destinada a la preservación y recuperación de los ríos del mundo.

Además del proyecto anterior, existen otros similares en España, demostrando la importancia de este tipo de actuaciones sobre los sistemas fluviales.

Tal es el caso del retranqueo de motas situadas junto al río Ebro, a su paso por la localidad de Alfaro, en La Rioja. Esta actuación formó parte de un conjunto de obras de emergencia dispuestas por la Confederación Hidrográfica del Ebro en 2018, debido a las crecidas extraordinarias registradas durante ese año en el río Ebro y algunos de sus afluentes, que provocaron graves daños a infraestructuras, como la carretera nacional N-113 y en el ferrocarril Castejón-Pamplona, por lo que era necesario tomar medidas para paliar los efectos de las inundaciones.

En este proyecto se realizó el retranqueo de una única mota situada en la margen izquierda del río Ebro, con el objetivo de aumentar la sección de desagüe del río en el tramo en cuestión, reduciendo las afecciones que pudieran ocasionarse durante episodios de avenidas en el futuro.

Posteriormente, también se han llevado a cabo otros trabajos de reparación y mejoras de defensa en diversas zonas de la provincia de Zaragoza y en la Comunidad foral de Navarra, pues el río Ebro ha generado durante años serias complicaciones durante las crecidas en estas áreas.

La ejecución de este tipo de actuaciones pone de manifiesto que las diversas Confederaciones de España, así como distintas administraciones, están tomando consciencia acerca de la importancia de la recuperación de los espacios fluviales y su relación con las inundaciones, pues éstas continúan suponiendo un coste de cientos de millones de euros anualmente, además de las víctimas mortales.

A pesar de esto, en la actualidad aún hay toda una tarea pendiente en cuanto a la recuperación de la conectividad lateral entre los cauces y sus llanuras de inundación.

## 2.3 Marco legal

Dentro del ámbito de las inundaciones, existe todo un marco legal que recoge una serie de especificaciones que han de ser consideradas para realizar proyectos de restauración y recuperación de los espacios fluviales.

### 2.3.1 Directiva Marco del Agua

En primer lugar, se encuentra la Directiva Marco del Agua (DMA), la cual nació como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión del agua en la Unión Europea. Las aguas de la Comunidad Europea están sometidas a un presión cada vez mayor, ya que se exige una fuerte demanda de las mismas, así como una buena calidad y en cantidad suficiente, lo cual no siempre resulta fácil de conseguir. De esta manera, surgió la necesidad de tomar una serie de medidas a fin de garantizar la sostenibilidad de los sistemas fluviales. Esta directiva ha permitido establecer unos objetivos medioambientales homogéneos para todos los Estados Miembros.

La DMA entró en vigor en diciembre del año 2000, tras un proceso de debate y la puesta en común de ideas entre diferentes ámbitos profesionales, tales como expertos de agua, políticos y agentes medioambientales. Con ello se establecieron los principios fundamentales de la gestión de los recursos hídricos. La Unión Europea plantea que cada Estado Miembro adapte esta directiva, a fin de determinar los aspectos principales más específicos de cada país en materia de aguas. Asimismo, pide que cada país miembro elabore los llamados planes hidrológicos de las cuencas, con el fin de alcanzar los objetivos en cada una de las demarcaciones que conforman la red hidrográfica de cada Estado. A modo de resumen, se muestra a continuación, algunos de los principios que plantea esta directiva.

- Proteger, mejorar y prevenir el deterioro de los ecosistemas acuáticos.
- Promover el uso sostenible del agua.
- Garantizar la reducción progresiva de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.
- Contribuir a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

Con respecto a este último principio es donde tiene cabida, principalmente, el proyecto que aquí se está realizando.

### 2.3.2 Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación

Las inundaciones son las catástrofes naturales que mayores daños generan en España. Las competencias en cuanto a gestión y defensa frente a los efectos devastadores que originan afectan a multitud de administraciones, desde la local en labores de planteamiento urbanístico y protección civil; la autonómica, en relación a la ordenación del territorio, gestión del dominio público hidráulico en las cuencas intracomunitarias y la protección civil; y la Estatal, en la gestión del dominio público hidráulico de las cuencas intercomunitarias y protección civil.

Para reforzar las actuaciones que deben considerarse durante episodios de inundaciones, la Comisión Europea aprobó en noviembre de 2007 la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de inundaciones, transpuesta por la legislación española por el RD 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación. El objetivo de esta Directiva es mejorar la coordinación entre las administraciones con el fin de reducir daños, principalmente en aquellas áreas con mayor riesgo de inundación, denominadas como Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs). La herramienta clave de esta directiva radica en la elaboración, aprobación y posterior implantación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), regulados por el RD 903/2010. A continuación, se establecen los objetivos generales de estos planes:

- Incremento de la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, agentes sociales y económicos.
- Mejorar la coordinación administrativa entre todos los actores involucrados en la gestión del riesgo de inundación.
- Mejorar el conocimiento para la adecuada gestión del riesgo de inundación.
- Contribuir a la mejora en materia de ordenación del territorio y la gestión de la exposición en las zonas inundables.

- Mejorar la capacidad predictiva ante situaciones de avenida e inundaciones.
- Reducir, en la medida de lo posible, el riesgo a través de la disminución de la peligrosidad para la salud humana, actividades económicas, el patrimonio cultural y medioambiental en las zonas inundables.
- Disminuir la vulnerabilidad de los elementos ubicados en las zonas inundables.

Por estos motivos, a fin de establecer un horizonte futuro para los objetivos que marca esta Directiva, ésta exige la evaluación de los PGRI para cada Demarcación Hidrográfica de manera anual.

### 2.3.3 Estrategia Nacional de Restauración de Ríos

Paralelamente a la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación, el actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, al igual que sus homólogos en legislaturas anteriores, está desarrollando la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, un conjunto de actuaciones establecidas para conservar y recuperar el buen estado de los ríos de España, así como mitigar los riesgos de inundación, potenciar su patrimonio cultural, fomentar el uso racional de los espacios fluviales e impulsar el desarrollo sostenible del medio rural.

El objetivo principal de esta Estrategia es impulsar la actual gestión de los cauces, de manera que las diferentes administraciones involucradas trabajen para alcanzar el buen estado ecológico y funcional, siguiendo por tanto la Directiva Marco del Agua, descrita anteriormente.

Además del objetivo anterior, existen otros más específicos, los cuales se mencionan a continuación:

- Fomentar la integración de la gestión de los ecosistemas fluviales en cuanto a políticas de uso y gestión del territorio.
- Mejorar la formación para la gestión sostenible de los ríos y su restauración.
- Aportar información y experiencias para mejorar las actuaciones de restauración fluvial.
- Implicar a colectivos sociales y fomentar la participación ciudadana en la gestión de sistemas fluviales.

Con todo ello se pretende mejorar el conocimiento acerca de la dinámica y el comportamiento fluvial, aspectos fundamentales para planificar correctamente las actuaciones que se deban implantar, intentando garantizar el aprovechamiento sostenible de los ríos y su conservación, con lo que a su vez se deberá exigir una formación más actual y multidisciplinar para aquellos agentes que intervengan en proyectos fluviales. Asimismo, una mayor participación ciudadana proporcionará una mejor percepción acerca de los problemas asociados a los ríos, la gestión de los mismos y las llanuras de inundación.

### 2.3.4 Reglamento del Dominio Público Hidráulico

La gestión del riesgo es uno de los aspectos fundamentales que se debe abordar en cuanto a materia de actuaciones en sistemas fluviales. El objetivo principal que se debe alcanzar es la protección de las personas, los bienes y el medio ambiente, por medio de normativa sobre inundaciones, referida en el apartado 2.3.2.

Inicialmente, el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero supuso la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado en 1986, para incorporar los criterios de la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Evaluación y Gestión de los riesgos de inundación. Este reglamento establece la definición del cauce basándose en criterios geomorfológicos, ecológicos e hidrológicos.

El Dominio Público Hidráulico (DPH) incluye:

- Aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas.
- Los cauces de corrientes naturales continuas o discontinuas, es decir, el terreno sobre el circulan los ríos, ramblas, entre otras corrientes de agua.
- Los lechos de embalses y lagos.

La existencia del Dominio Público Hidráulico responde a la necesidad de garantizar una protección de los recursos hídricos y de los ecosistemas fluviales. Generalmente, se requiere un permiso para llevar a cabo ciertas actuaciones dentro de cualquier DPH, tales como extraer áridos, plantar o cortar vegetación o implantar cualquier obra que pudiera afectar al ecosistema del río.

## 2.4 Curso bajo del río del Segura

Hasta ahora, se han explicado ciertos aspectos generales que deben ser tenidos en cuenta para la realización de este proyecto.

En los siguientes apartados se describirá la zona de estudio, a fin de conocer en mayor profundidad las características del terreno y su comportamiento hidrológico en torno al río Segura, pues estos puntos presentan una gran influencia en el funcionamiento de los sistemas fluviales de dicha zona.

### 2.4.1 Confederación Hidrográfica del Segura

La Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) se encuentra en el Sureste de la Península Ibérica, ocupando una superficie en torno a los 20 km<sup>2</sup>. Comprende principalmente a la Región de Murcia, aunque también afecta a las comunidades autónomas de Andalucía (provincias de Almería, Granada y Jaén), Comunidad Valenciana (provincia de Alicante) y Castilla-La Mancha (provincia de Albacete). De manera más concreta, tal y como se recoge en el artículo 2.2 del Real Decreto 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas:

*“Comprende el territorio de las cuencas hidrográficas que vierten al mar Mediterráneo entre la desembocadura del río Almanzora y la margen izquierda de la Gola del Segura en su desembocadura, incluidas sus aguas de transición; además la subcuenca hidrográfica de la Rambla de Canales y las cuencas endorreicas de Yecla y Corral Rubio. Las aguas costeras tienen como límite sur la línea con orientación 122° que pasa por el Puntazo de los Ratones, al norte de la desembocadura del río Almanzora, y como límite norte la línea con orientación 100° que pasa por el límite costero entre los términos municipales de Elche y Guardamar del Segura”.*

A continuación, en la Figura 2.10 se muestran las diversas zonas que conforman la cuenca del Segura.



Figura 2.10 Mapa de la Cuenca del Segura. Fuente: CHS

Antes de comenzar el estudio del tramo es preciso conocer las características de la cuenca del Segura, ya que éstas influyen notablemente en el régimen hidrológico de la zona.

## 2.4.2 Características de la Cuenca Hidrográfica del Segura

### 2.4.2.1 Climatología

La Cuenca Hidrográfica del Segura forma parte de la vertiente Mediterránea, en la cual tienen lugar un fenómeno climático conocido como “gota fría”, que suele presentarse al comienzo del otoño y la primavera. Esta circunstancia tiene lugar principalmente en la parte occidental del Mediterráneo, donde al final del verano se han registrado altas temperaturas, por lo que el mar emite gran cantidad de calor, a lo que en ocasiones se suma la llegada de masas de aire cálido procedente de África, el cual se humedece rápidamente en este mar. Cuando la masa de aire cálido entra en contacto con aire relativamente frío esto produce la generación de tormentas de gran envergadura e intensidad, lo que posteriormente ocasionarán crecidas y avenidas en las cuencas de esta zona de España.

Las precipitaciones registradas durante las décadas pasadas han alcanzado valores superiores a los 100 mm, incluso superando los 200 mm en algunos casos, en 24 horas. Así, las precipitaciones han dado lugar a caudales repentinos con puntas muy elevadas.

Esta circunstancia ha llevado al Gobierno regional a catalogar la zona como catastrófica, tal como ocurrió en septiembre de 2019, a causa de los severos daños sufridos por las inundaciones.

### 2.4.2.2 Morfoestructura de la cuenca

Esta zona de España se caracteriza por presentar una topografía con grandes desniveles, ya que en ella se pueden encontrar variedad de accidentes, como son depresiones, sierras y llanuras litorales. Todo ello explica el comportamiento fluvial de los cauces pertenecientes a esta cuenca.

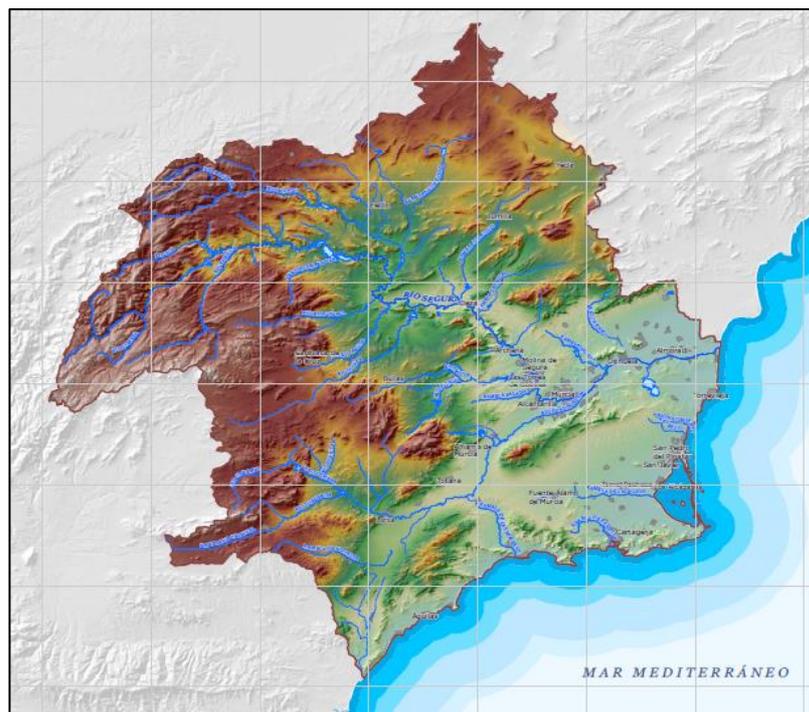


Figura 2.11 Mapa de Altitudes. Fuente: CHS

La zona septentrional y oeste de la cuenca presenta una orografía montañosa, con cotas superiores a los 2000 m; mientras que, hacia el sur y este, el terreno presenta cotas menores, pudiéndose encontrar extensas llanuras cercanas a la costa. Como se puede observar en la Figura 2.11, los ríos, en su cabecera, suelen discurrir por valles, lo que implica que los cauces se encuentren encajonados en el terreno, por lo que se produce un aumento importante de los calados y las velocidades, pues no existe espacio disponible para el desbordamiento, lo que a su vez conlleva grandes caudales aguas abajo, en el cauce principal.

En los tramos intermedios de los cauces, cuando la pendiente del terreno es menor que aguas arriba, se forman

terrazas aluviales, producto del poder erosivo de los ríos en la cabecera. En estas zonas, al aumentar el caudal a valores muy superiores al régimen natural, se producen desbordamientos fácilmente, inundando las zonas en torno a los cauces.

Por último, en la vega media y baja del Segura, se implantaron una serie de medidas para defenderse contra episodios de avenidas, como lo son las motas de contención. Éstas, debido a las continuas inundaciones que tenían lugar en el territorio, fueron recrecidas y consolidadas, lo que supuso que el lecho normal del río estuviese topográficamente más elevado, por lo que cuando aumenta el caudal por encima de su régimen natural, o bien se produce la rotura de alguna de las motas, las zonas adyacentes queden inundadas.

### 2.4.2.3 Litología

Desde el punto de vista geológico, la cuenca del Segura se encuentra compuesta principalmente por tres materiales: depósitos cuaternarios, calizas y margas.

Una de las características más destacadas de las margas es su impermeabilidad, lo cual favorece de manera considerable a la escorrentía y, por consiguiente, a la inundación de los terrenos, al no permitir la infiltración de las aguas a través de ella. Asimismo, las calizas presentan un carácter muy impermeable cuando las lluvias son muy intensas implica un mayor riesgo de escorrentía.

Por último, los depósitos cuaternarios son depósitos de origen glaciar y fluvial, caracterizados por la acumulación de arcillas y arenas, con fragmentos de material de diversos tamaños. Al igual que los materiales anteriores, las arcillas también presentan una naturaleza impermeable, favoreciendo las escorrentías.

Por tanto, la litología de la zona supone un factor importante en el comportamiento de la cuenca durante los períodos de inundación, ya que no facilita la infiltración del agua de lluvia hacia estratos inferiores, lo que implica que gran parte de las aguas de lluvia aneguen el terreno.

### 2.4.3 Cronología de inundaciones en la cuenca del Segura

Los factores descritos anteriormente han contribuido a que históricamente el territorio comprendido en la Demarcación Hidrográfica del Segura se haya visto afectado frecuentemente por fenómenos de inundación y avenidas, tal como se recoge en registros históricos, datando el más antiguo de 1259, según la Cronología de Riadas en la Cuenca del Segura (fuente: CHS).

Esta tendencia a sufrir episodios de inundaciones ha supuesto la necesidad de implantar sistemas de contención, tales como presas y embalses que ayuden a regular los caudales circulantes en los cauces, dictaminando ciertos aspectos que ayudasen a disminuir los daños ocasionados en episodios extremos.

De esta forma, por medio del Real Decreto Ley 4/1987 de 13 de noviembre, se establecieron una serie de obras de defensa contra inundaciones. Previo a las actuaciones, se realizó un estudio para poder determinar las soluciones posibles más adecuadas hidráulicamente. Dentro de dichas actuaciones se adoptaron, entre otras, soluciones como encauzamientos, derivaciones y rectificaciones de los cauces.

Uno de los encauzamientos que se llevaron a cabo fue sobre el propio río Segura, objeto de estudio de este trabajo. En particular, se realizó un encauzamiento del cauce desde la R<sup>a</sup> del Judío hasta la ciudad de Murcia (74,2 km) y desde aquí hasta la misma desembocadura (71,5 km).

Una de las características más importantes de esta cuenca es la presencia de numerosas ramblas, cauces con caudales esporádicos debido a las precipitaciones, las cuales pueden llegar a generar caudales torrenciales que, a su vez, se suman a los atribuidos por otros cursos, por lo que dan lugar a regímenes extremos, es decir, crecidas y avenidas.

Durante décadas, la cuenca del Segura ha registrado numerosas inundaciones, alguna de las cuales han sido analizadas por expertos de diversos campos de la ciencia. A continuación, se describirán resumidamente los episodios de inundaciones históricas acaecidas en esta cuenca en las últimas décadas, a fin de obtener un mayor conocimiento acerca del comportamiento e interacción de los cauces y ramblas presentes en ella. Se ha tomado como referencia el documento *Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX. Actuaciones de prevención*.

En primer lugar, la riada de 1982 produjo graves daños, incluyendo la rotura de motas, a pesar de que las ramblas fueron controladas. Posteriormente, en 1986, tuvieron lugar una serie de inundaciones, en las que se destruyeron motas y se produjo la colmatación de ciertos cauces, incrementando el riesgo de inundación. Esto puso de

manifiesto la necesidad de regular los principales afluentes del río Segura, así como una mejor limpieza y mantenimiento de los cauces de manera permanente.

Al año siguiente, en 1987, ocurrió una de las inundaciones más catastróficas, en la que se registraron precipitaciones con períodos de retorno superiores a 500 y 1000 años, provocando la destrucción de muros de defensa y puentes, así como el arrastramiento de huertas en torno a los cauces y el desbordamiento de canales. Además de esto, se produjeron crecidas en numerosas ramblas.



Figura 2.12 Vega Baja del Segura (Noviembre de 1987). Fuente: Atlas Global de la Región de Murcia

En 1989 se produjeron inundaciones debido a que el caudal de las ramblas aumentó de manera muy notoria, sumándose a los caudales de los cauces, los cuales a su vez eran ya muy superiores a los de sus regímenes naturales. Esto generó gran arrastre de sólidos y un aumento considerable de la velocidad circulante de las aguas. En esta ocasión, debido a las inundaciones anteriores, se habían recreado y consolidado las motas existentes y se había realizado la limpieza de los cauces, además de desvíos, laminaciones y retenciones de caudales.

Durante la década de los 90 y principios del siglo XXI se produjeron numerosas inundaciones, esta vez de menor intensidad, por lo que sus efectos no fueron tan perjudiciales como en años anteriores.

En los últimos años, se han producido de nuevo episodios de avenidas considerables. En 2010, las inundaciones afectaron principalmente a áreas cercanas al litoral suroeste de la Región de Murcia, pues se produjeron desbordamientos en diversas ramblas, con gran pérdida de bienes materiales. De nuevo, en 2012, toda la región se vio afectada por fuertes avenidas, con importantes pérdidas de bienes, cultivos, ganados y hasta 3 personas perdieron la vida. Las poblaciones de Lorca y Puerto Lumbreras sufrieron las consecuencias más severas, llegando incluso a crearse la “Plataforma de afectados por la inundación del 28S 2012”.

Por último, es preciso destacar las últimas riadas acaecidas tras el verano de 2019 y comienzos de 2020, las cuales de nuevo generaron importantes pérdidas materiales. En definitiva, es posible considerar que la principal causante de estas avenidas son las intensas precipitaciones que tienen lugar en el territorio, aunque también existen otros factores, relacionados

Por lo tanto, se trata de una región con una tendencia muy acusada a los episodios de avenidas que, como se ha comprobado, ha llevado a tomar una serie de medidas para evitar o, al menos, paliar los posibles daños derivados de estas catástrofes.

A lo largo del siglo XX, se siguieron una serie de actuaciones: el Proyecto de obras de Defensa contra las inundaciones (1933) y el Plan General de Defensa contra avenidas de la Cuenca del Segura (1977). Todo ello derivó en la implantación de obras hidráulicas, tales como embalses, diques, muros de contención, así como desvíos, trasvases, entre otras. Cabe mencionar que algunas de estas medidas no fueron consideradas adecuadamente, ya que en muchos casos se modificó de manera considerable el espacio natural del río,

reduciendo la llanura de inundación y, por tanto, aumentando el riesgo ante fenómenos de crecidas.

Esta situación ha hecho posible comprobar que el río Segura no presenta una adecuada capacidad de desagüe, lo cual ha sido uno de los causantes principales de los desastres producidos, y también han permitido que los organismos responsables de la cuenca hayan ido adquiriendo mayor constancia acerca del espacio natural que deben mantener los cauces para su buen comportamiento, respetando los drenajes, en lugar de primar el acondicionamiento de los terrenos, ya sea para cultivo o bien para otros usos.

Además de las infraestructuras hidráulicas mencionadas, también se han implantado medios de automatización, denominados como SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), el cual permite el registro de datos de multitud de información (precipitaciones, niveles de los cauces y embalses...), contribuyendo a una mejor gestión de la información de la cuenca, lo cual supondrá mejoras en las actuaciones que se deban tomar en situaciones extremas.

En este trabajo se analizarán principalmente las crecidas e inundaciones generadas por la acumulación de precipitaciones muy intensas, pues son las más frecuentes.

Una vez se han descrito las características de la cuenca y se ha proporcionado una idea acerca del régimen de la misma, se explicará en los siguientes apartados el tramo que se ha seleccionado como objeto de estudio.

#### 2.4.4 Localización del tramo de estudio

Con respecto al área de estudio, ésta comprende el tramo del río Segura entre las localidades de Jacarilla y Benijófar, ambos pertenecientes a la provincia de Alicante. Dicho tramo discurre por la comarca denominada como Vega Baja del Segura, en el extremo sur de la Comunidad Valenciana, limitando con la Región de Murcia.

Dicho tramo forma parte del curso bajo del río Segura, muy cercano a su desembocadura en Guardamar del Segura, en el extremo sur de Alicante. Esta zona, al igual que muchas otras dentro de esta cuenca, ha sido fuertemente modificada en décadas pasadas, por lo que el comportamiento del cauce se ha visto muy alterado, principalmente a causa de su encauzamiento, lo que a su vez ha generado graves episodios de avenida, ya que se han eliminado numerosos meandros del antiguo cauce favoreciendo que, ante crecidas extraordinarias, se produzca el desbordamiento del caudal circulante. En la Figura 2.13 se muestra la ubicación del tramo de estudio dentro de la cuenca hidrográfica del río Segura.

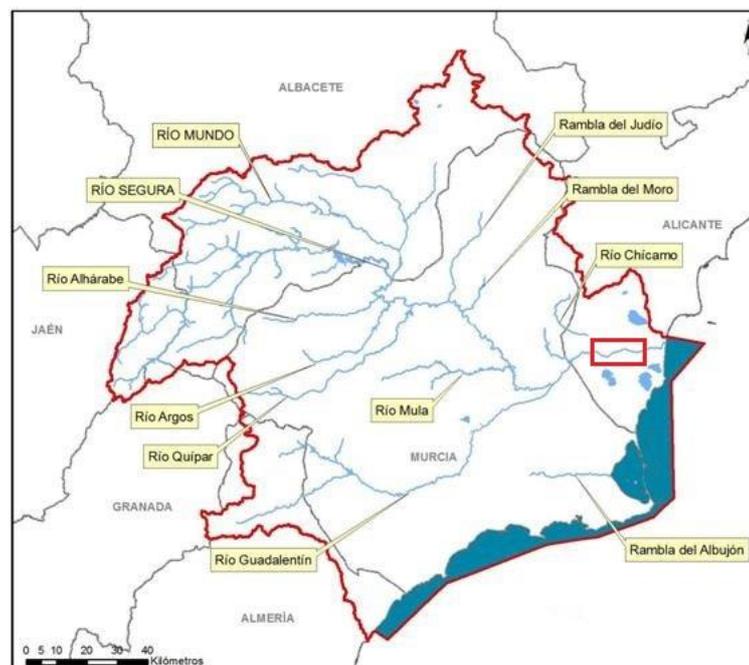


Figura 2.13 Localización del tramo de estudio. Fuente: CHS



Figura 2.14 Tramo de estudio. Curso bajo del río Segura

Los usos de suelo predominantes en esta parte de la cuenca del Segura se destinan fundamentalmente a cultivos de regadío, en contraste con el resto del territorio, donde el entorno es semiárido. Este factor fue uno de los más decisivos para llevar a cabo las actuaciones en el cauce, ya que continuamente se producían inundaciones en el terreno en torno al río, ocasionando importantes pérdidas de producción y económicas.

Durante el siglo XX se ha realizado una modificación sustancial del río, con el objetivo de ganar tierras para cultivo en las zonas cercanas al propio cauce, aunque a costa de disminuir el espacio natural del río. De esta forma, en esta comarca, el río pasó a ser un mero canal artificial de unos 35 metros de anchura. Como consecuencia de esto la capacidad del río quedó reducida, por lo que en episodios fuertes de lluvia se originan caudales puntas muy elevados que el cauce no es capaz de soportar, por lo que se produce el desbordamiento del mismo.

#### 2.4.4.1 Población y servicios afectados por el desbordamiento del río Segura

La cuenca baja del Segura es una de las áreas que mayor grado de degradación ha sufrido en las últimas décadas, debido a ciertos factores:

1. Gran desarrollo del sector agrario, aumentado la superficie de tierras destinadas a cultivos, las cuales se han extendido hasta los mismos límites del río.
2. El encauzamiento del río Segura en su curso bajo que, como ya se ha comentado, ha supuesto una reducción importante de la sección útil del río, así como una gran pérdida del espacio fluvial, repercutiendo gravemente sobre las parcelas y poblaciones adyacentes al cauce.
3. La existencia de una red de transporte y demás infraestructuras, muchas de ellas presentes en la llanura de inundación del río, por lo que se han visto afectadas en numerosas ocasiones durante episodios de fuertes lluvias y desbordamientos del río.

En la Figura 2.15 se muestran los principales municipios que se pueden ver afectados por las inundaciones procedentes del desbordamiento del río Segura a su paso por la comarca Vega Baja del Segura. Existen más municipios aparte de los mostrados, aunque, debido a que las simulaciones hidráulicas que se realizarán posteriormente serán las correspondientes a períodos de retorno bajos, de 10 y 25 años, el resto de las localidades presentes en el territorio, más alejadas del cauce, no se han representado, debido a que no se verán afectados por las inundaciones para estos períodos de retorno. No obstante, para otros períodos de retorno sí quedarían afectados por el desbordamiento del río.

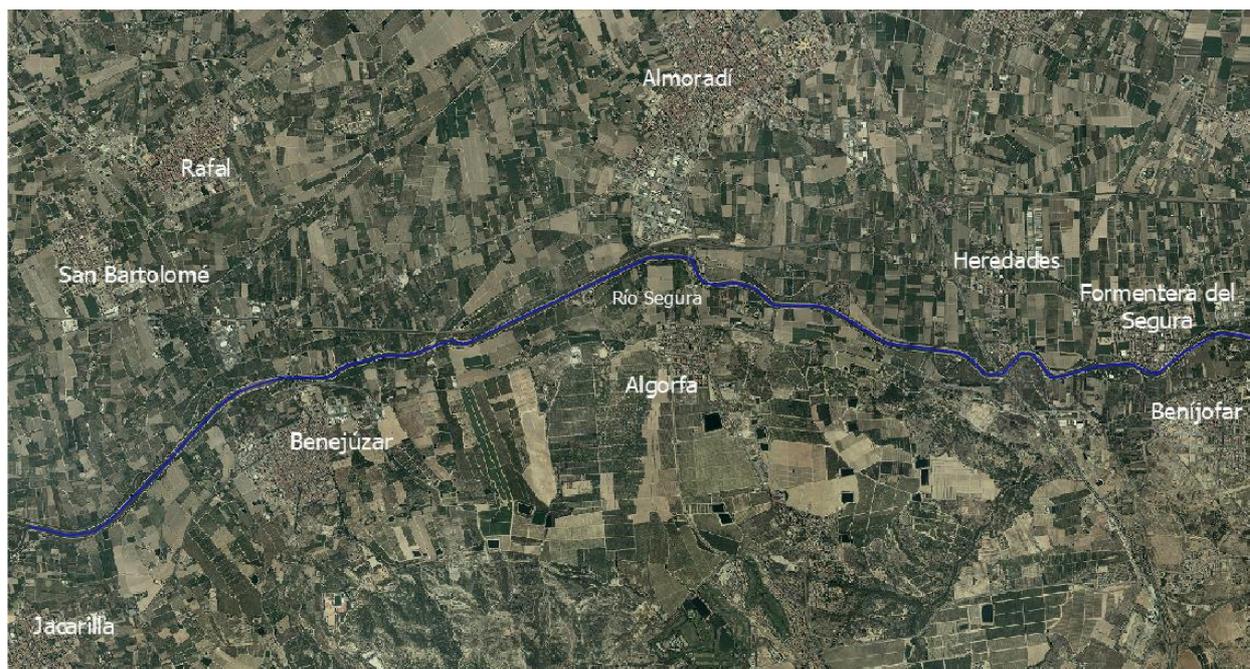


Figura 2.15 Municipios afectados. Tramo de estudio

Con ello, se puede estimar la población afectada por los fuertes episodios de avenida sufridos en la zona durante los últimos años. A partir del Instituto Nacional de Estadística y la Diputación de Alicante se han recogido las poblaciones correspondientes a los municipios que se muestran en la Tabla 2.1, según el Padrón de 2019. Se describirá brevemente algunas de las localidades y servicios que se vieron afectados durante un episodio de avenida, acaecido en septiembre de 2019, uno de los más relevantes y devastadores de los últimos años.

A continuación, se muestra una tabla donde aparece recogido el número de habitantes de cada municipio.

Tabla 2.1 Municipio y Población. Comarca Vega Baja del Segura

Municipio	Población (Nº de habitantes)
Jacarilla	2022
Benejúzar	5402
Algorfa	2935
Benjúfar	3322
Formentera del Segura	4191
Heredades	412
Almoradí	20803
Rafal	4498
San Bartolomé	1784

A partir de la Tabla 2.1 se puede estimar la población total que se vería afectada en caso de producirse algún episodio de crecida extraordinaria del río, la cual supondría una cifra de en torno a 45.400 personas, sin incluir

las demás localidades de la zona. Esto pone de manifiesto el gran número de personas al que el desbordamiento del río afecta de manera directa, lo cual en las últimas décadas se ha vuelto una situación bastante recurrente.

Además de los municipios mencionados, las crecidas de los ríos suponen una grave afección a las infraestructuras implantadas en la zona, tales como autopistas, carreteras secundarias, vías de ferrocarriles...

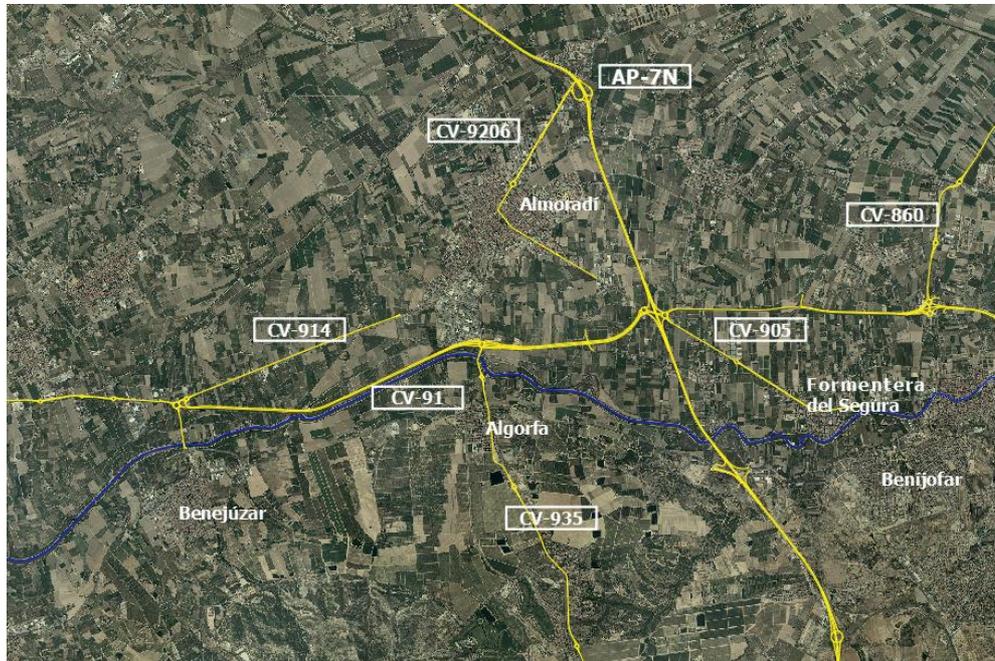


Figura 2.16 Vías afectadas. Tramo de estudio

En la Figura 2.16 aparecen algunas de las vías principales que se vieron afectadas por las inundaciones en la zona, aunque en la última riada se registraron un total de 34 carreteras que tuvieron que ser cerradas al tráfico debido a que quedaron intransitables a causa del nivel de agua alcanzado o por desprendimientos derivados de las crecidas. Tal fue el caso de la AP-7, autopista que comunica muchos de los municipios más importantes de la parte oriental de la península. Asimismo, se generaron percances en los trenes de Cercanías entre Alicante y Murcia, así como la línea de media distancia Ciudad Real/Albacete/Alicante.

Por otra parte, algunos de los municipios de la zona se vieron aislados en su totalidad, como fueron Almoradí y Dolores, cuyos accesos quedaron completamente inhabilitados por los efectos de las inundaciones.

Los casos mencionados son sólo algunos ejemplos de la grave situación que presenta esta comarca debido a las fuertes inundaciones que tienen lugar en la zona, muchas de las cuales se generan por el desbordamiento del río Segura.

#### 2.4.5 Encauzamiento de la Vega Baja del río Segura

El río Segura recoge aguas procedentes de multitud de afluentes por ambas márgenes a lo largo de su curso, las cuales presentan escasa longitud y gran pendiente lo cual, unido a un régimen de lluvias intensas, supone un régimen de caudales torrenciales, lo que conlleva la sucesión de frecuentes avenidas, como se explicó anteriormente. A causa de esto, se llevó a cabo la construcción de diversos embalses y otras infraestructuras que ayudaran a la laminación de estas avenidas, con lo que se pretendía reducir el daño generado por estos fenómenos, lo que contribuiría a un incremento de la producción agrícola, la cual había ido desarrollándose en los últimos años, convirtiéndose en una importante zona agraria.

Además, en el curso bajo del río se realizó el encauzamiento del río Segura, lo que supuso una ardua tarea, ya que esto afectaba a diversos municipios e incluso a la ordenación del territorio. Finalmente, este proyecto se llevó a cabo desde la Contraparada, azud establecido cerca de la ciudad de Murcia, hasta la desembocadura en Guardamar del Segura. Este encauzamiento se diseñó con una capacidad de 400 m<sup>3</sup>/s y un período de retorno de 50 años. No obstante, se han dado episodios de lluvia en los que el caudal punta ha sido inferior a dicha capacidad

y el cauce no ha sido capaz de retener el volumen de agua, por lo que se ha producido en numerosas ocasiones el desbordamiento del río.

Esto condujo a que, debido al gran número de afluentes, y ante episodios de lluvias torrenciales, se generasen importantes caudales punta en sus cuencas receptoras que finalmente vertían al río Segura. Éste, sin embargo, debido a la reducción de su capacidad, supuso desbordamientos por diversos tramos, derivando en la destrucción de una cantidad importante de hectáreas de cultivos, de sistemas de defensa, como es el caso de las motas, así como daños a municipios e infraestructura, generando, por tanto, importantes pérdidas económicas en esta área.

Con respecto a las características del encauzamiento, la sección tipo presenta forma de trapecio con taludes variables a lo largo de su trazado, según la elevación del terreno. Las motas dispuestas en las márgenes presentan un ancho de entre 8 y 12 metros. Cabe ahora distinguir entre los distintos tramos del encauzamiento:

- Tramo Murcia-Benejúzar. Con una longitud de 31 km, presenta taludes de 3.5H/1V, con ancho de 10 metros y altura que oscila entre los 6.50 y 7.50 metros desde el fondo del cauce hasta la parte más alta de las motas.
- Tramo Benejúzar-Rojales. Tiene una longitud de 10.5 Km y un talud de 2.5H/1V. Debido a la existencia de ciertos núcleos de población cercanos al río, en este tramo se ha optado por disponer muros de fábrica durante 5.2 km.
- Tramo Rojales-Guardamar del Segura. Es el último tramo hasta la desembocadura del río. Presenta una longitud de 8.7 km. Su ancho varía entre los 20 metros hasta los 100 metros en las zonas más cercanas al mar, así como unos taludes 2.5H/1V y altura que oscila entre los 6.50 y 3.50 metros en la desembocadura.

Desde el punto de vista medioambiental, esta obra se realizó de manera que se produjese el menor impacto posible sobre el río. No obstante, se ha producido una reducción en la longitud del río Segura en un 28,5%, pues éste inicialmente, desde la Contraparada hasta Guardamar del Segura, presentaba una longitud de 88263 metros lineales, quedando finalmente reducido a 63277 metros.

Para llevar a cabo el proyecto de encauzamiento del río Segura se perfiló el nuevo trazado en planta del río, donde se mostraban las cortas que se debían realizar. A modo de comparar el antiguo cauce del río y el encauzamiento actual del mismo, se muestra en la Figura 2.17, perteneciente al tramo próximo al municipio de Benejúzar.

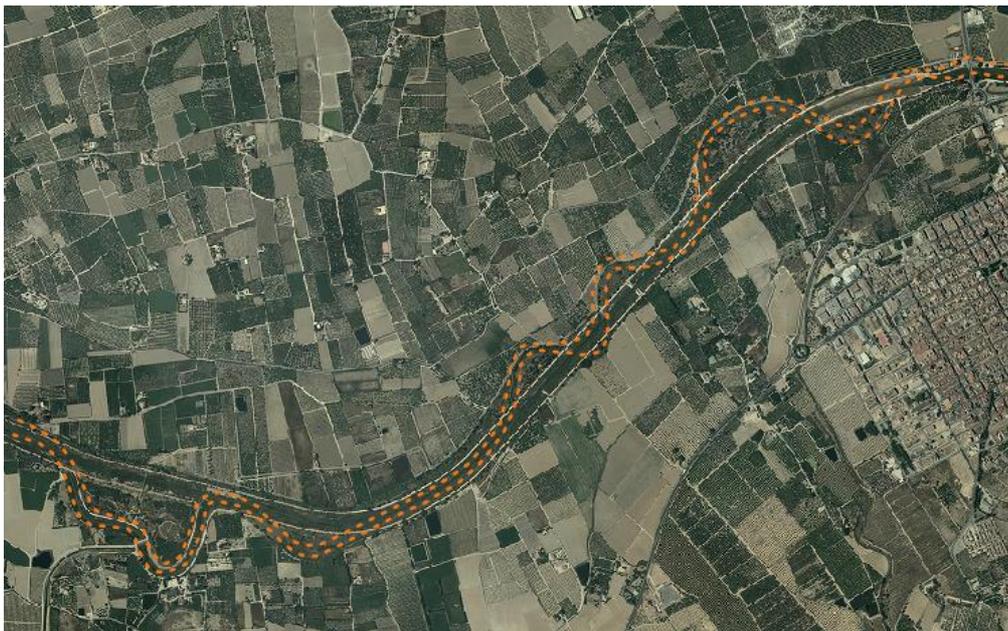


Figura 2.17 Antiguo cauce del río Segura

Debido al enorme impacto que supuso este proyecto en la Vega Baja del Segura, se tomó como medida

medioambiental y paisajística ante las obras de encauzamiento la recuperación de los sotos, formaciones vegetales que acompañan al río en sus márgenes, con especies arbóreas autóctonas, principalmente en los espacios de antiguos meandros del cauce, de manera que se consiguiera naturalizar el terreno del antiguo cauce. Sin embargo, el antiguo curso del río se ha visto modificado considerablemente, siendo uno de los cauces de España más alterados por la acción humana.

#### 2.4.6 Retranqueo de las motas en el curso bajo del río Segura

Como se comentó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo consiste en analizar el efecto que el retranqueo de las motas tendría sobre la llanura de inundación del curso bajo del Segura.

Con esta actuación se pretende mitigar los daños generados por las crecidas, así como recuperar el espacio fluvial del río, de manera que éste presente una forma próxima a la que tenía antes del encauzamiento. Por esta razón, se ha decidido retranquear las motas hasta aquellas áreas que constituían los antiguos meandros del cauce.

Debido a que el río se encuentra muy constreñido a su paso por la comarca de la Vega Baja, esta actuación supondría la expropiación de algunas de las parcelas que actualmente están ocupando los antiguos meandros. La superficie de terreno a expropiar se mostrará en el apartado 6.

En las Figuras 2.18 y 2.19, se puede intuir la forma que presentaban los meandros del cauce original antes de llevar a cabo las cortas de los mismos y el encauzamiento del propio río.

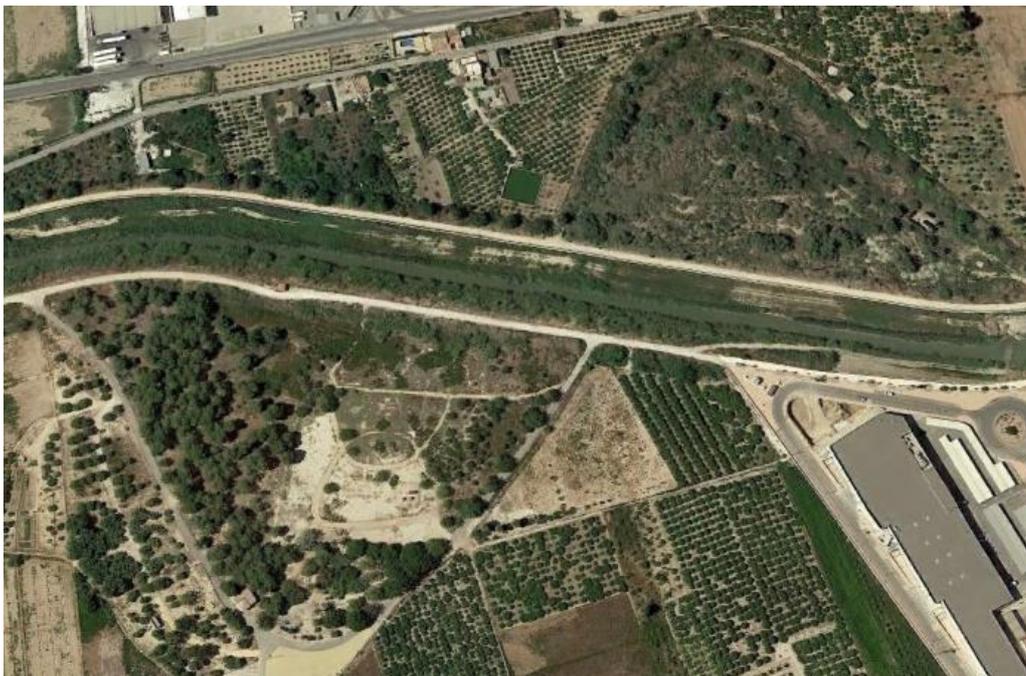


Figura 2.18 Antiguos meandros del río Segura



Figura 2.19 Antiguo meandro del río Segura

Como se puede observar, la mayor parte de los meandros han sido sustituidos por zonas boscosas, por lo que no supondrá apenas pérdidas de terrenos de cultivos, uno de los problemas principales que puede conllevar esta actuación. Más aun teniendo en cuenta que en la comarca Vega Baja gran parte del suelo está destinado para usos agrarios.

A pesar de los aspectos positivos que esta actuación supone, es preciso remarcar ciertos puntos relacionados con el régimen hidrológico de la cuenca del Segura. Como se ha explicado anteriormente, los caudales derivados de las precipitaciones que tienen lugar a lo largo de esta cuenca pueden alcanzar valores muy grandes, incluso se han registrado caudales del orden de 2000 m<sup>3</sup>/s o mayores, para períodos de retorno muy altos.

A consecuencia de estos caudales tan extremos, el retranqueo de las motas no supone una solución viable, pues el flujo circulante por el canal del cauce presenta tal magnitud que se produce rápidamente el desbordamiento del río y las motas son rebasadas con facilidad, perdiendo por tanto su función.

No obstante, sí podrían plantear una solución aceptable para períodos de retorno menores, tales como 10 y 25 años, donde los hidrogramas que se dan presentan puntas de caudal de menor valor, por lo que la inundación no presentará efectos tan extremos. Puesto que la zona de estudio se encuentra frecuentemente afectada por desbordamientos, el hecho de trasladar las motas hacia una nueva ubicación proporcionaría un mayor espacio al río para contener las aguas durante las crecidas, evitando la inundación del terreno.

En el caso del curso bajo del Segura, las motas presentan con una altura que oscila entre los 1.5 y 2.5 metros por encima del terreno y una anchura de coronación variable, entre 10 y 12 metros, ya que se dispusieron para ser aprovechados como caminos en las riberas del propio río. Asimismo, las motas dispuestas en el curso bajo del Segura, y más concretamente en el tramo en cuestión, no presentan refuerzos de hormigón, sino que están hechos a partir de materiales propios de la zona.

#### **2.4.7 La Confederación Hidrográfica del Segura en la actualidad**

Uno de los episodios de avenidas más importantes en los últimos años fue el ocurrido en septiembre de 2019, asociado a una depresión aislada en niveles altos (DANA). Este episodio supuso un punto de inflexión en la cuenca del Segura, debido a que los efectos de la crecida del cauce y las inundaciones pusieron de manifiesto la necesidad urgente de tomar unas medidas más drásticas ante las frecuentes situaciones extremas que tenían lugar en la zona. Asimismo, introdujo el concepto de vulnerabilidad en ciertos territorios de la cuenca, en especial a la zona que comprende el eje del río Segura desde la ciudad de Murcia hasta su desembocadura en Guardamar.

Otro punto de interés son las obras que aun a día de hoy están pendientes del Plan de defensa de Avenidas de 1987, que planteaba la implantación de una serie de presas, encauzamientos en ciertas ramblas de la cuenca y colectores en determinados municipios para garantizar una mejor respuesta del sistema ante la ocurrencia de

fenómenos extremos.

Los acontecimientos que tuvieron lugar pusieron en duda la infraestructura del encauzamiento del Segura en su curso bajo, pues su presencia más bien presentaba un problema, ya que su capacidad es insuficiente si se compara con los caudales estándares que se han dado en muchos de los episodios de fuertes precipitaciones, por lo que no supone una medida de protección viable. Su diseño tampoco propicia la mejora para futuros sucesos, ya que la línea de agua del encauzamiento presenta una cota más alta que los terrenos adyacentes al mismo, lo cual genera el desbordamiento una vez se ha visto superada su capacidad.

Otro de los problemas que presenta la cuenca, sobre todo a lo que la comarca de la Vega Baja respecta, es la existencia de numerosos canales y acequias. Esta red de canales se encuentra en un estado de degradación muy avanzado y presentan un diseño obsoleto que ha repercutido seriamente en la capacidad de drenaje de los distintos sistemas.

Asimismo, en septiembre de este año 2020, se presentará un documento realizado por un comité de expertos para la Prevención de Inundaciones en la Región de Murcia, con el objetivo de reforzar la seguridad de las poblaciones ante episodios de lluvias torrenciales. Este conjunto de medidas también será tomado en consideración en la comarca Vega Baja, pues ambas zonas se encuentran fuertemente relacionadas en lo que a inundaciones se refiere, más aún cuando forman parte de la misma confederación hidrográfica.

Algunos de los objetivos planteados son frenar la velocidad del flujo, promover la infiltración y canalizar el agua. Según las características específicas de cada zona, se tomarán las medidas que más se adecúen. De esta forma, se han considerado medidas y actuaciones en zonas de la cabecera del río Segura, en la vega media y en zonas próximas a su desembocadura, siendo estas últimas las que mayor interés presentan para el estudio que aquí se está realizando.

En el curso bajo, los relieves son prácticamente inexistentes y el canal principal del Segura se ha visto altamente modificado por las actuaciones realizadas en las últimas décadas, por lo que el sistema de drenaje no presta una respuesta adecuada ante episodios de crecidas. Por ello, las principales actuaciones que se pretende implantar priorizarán la recuperación de los cauces y restaurar la red de flujo, de manera que el drenaje del flujo mitigue los posibles daños que pudieran generarse.

Una de las líneas de investigación presentes actualmente es la de establecer o delimitar una serie de llanuras inundables que amortigüen aquel flujo de agua que el encauzamiento del río no es capaz de soportar debido a su estrechez. Con ello se busca minimizar los riesgos para los municipios, infraestructuras y para los terrenos agrícolas, muy afectados por las graves inundaciones acaecidas.

El principal problema se encuentra en que los distintos proyectos que se plantean suponen una difícil tarea, pues el régimen hidrológico es tan extremo que algunas de las actuaciones que se han implantado y estudiado hasta la fecha no han resultado del todo efectivas. Además, puesto que los proyectos que se deban realizar afectan a un gran número de sectores, tales como el sector agrícola, ingenieros o diversas administraciones, la dificultad para complacer a las distintas partes plantea un serio problema.

## 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CAUDALES

---

A l igual que en otros proyectos de carácter fluvial, es preciso realizar un estudio de los caudales máximos que discurren por el tramo de estudio, a fin de poder visualizar posteriormente los posibles efectos derivados de la acción de dichos caudales. El análisis de caudales máximos requiere un estudio estadístico acorde a unas funciones de distribución específicas, dependiendo de la región en la que se encuentre el área estudiada.

La *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables* establece una serie de criterios propios para llevar a cabo la inferencia estadística, la cual será desarrollada en este apartado. Una vez realizado el análisis estadístico se obtendrán los caudales instantáneos asociados a unos determinados períodos de retorno.

### 3.1 Metodología aplicada

La metodología para el estudio de caudales comienza con la obtención de los datos recopilados por las estaciones de aforo. Dichas estaciones deben poseer información suficiente para poder considerar las estimaciones futuras como fiables. A la serie de caudales obtenidos se les aplicará, en primer lugar, unas determinadas funciones estadísticas, las cuales se adaptan mejor al comportamiento específico de la cuenca del Segura. Una vez hecho esto, se realizará un test de bondad, para verificar que los datos se ajustan correctamente a las funciones estadísticas anteriores. Los detalles de este proceso se detallarán posteriormente.

Los procesos de inferencia estadística se basan en el análisis de muestras de datos del fenómeno aleatorio en estudio, en este caso los caudales máximos, intentando definir un modelo que permita realizar predicciones, a partir de la muestra tomada. Según la información que suministre la muestra, la validez del modelo será mayor o menor. Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra mayor información disponible habrá, por lo que las estimaciones podrán presentar menor incertidumbre.

La técnica más habitual para el estudio de caudales máximos se basa en el empleo de las series de máximos anuales recogidas por las estaciones de aforo. No obstante, sólo en rara ocasiones se dispone de estaciones de aforo con datos de más de 40 y 50 años, por lo que es muy difícil de obtener estimaciones fiables de los cuantiles de los periodos de retorno, lo que pone de manifiesto la gran incertidumbre que presenta la obtención de los mismos.

De esta forma, el procedimiento consistirá en el ajuste de la ley de frecuencia a partir de los datos observados por una única estación de aforo, lo cual puede implicar una incertidumbre considerable, dependiendo de la longitud de la serie de datos observados y del régimen hidrológico de la zona. A medida que el período de retorno aumente, mayor será el error de estimación.

Los episodios de avenidas y las consecuentes inundaciones que se pudieran generar son provocadas por los caudales instantáneos, por lo que se deberán obtener estos valores. No obstante, no siempre es posible recopilar información acerca de éstos, por lo que se deberá realizar una regresión lineal a partir de los caudales medios diarios, tal y como exige la *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables*.

Debido a la enorme incertidumbre que presentan los episodios de avenidas, sujetos a gran variabilidad y frecuencia de ocurrencia, el objetivo principal de los estudios hidrológicos no es otro que el de caracterizar, al menos de manera estadística, su correspondiente ley de frecuencia. De esta forma, quedarían relacionados el caudal con su probabilidad de ocurrencia. Además de esto, es preciso considerar que los datos obtenidos en los puntos de aforo serán extrapolados posteriormente hacia puntos no aforados, por lo que es preferible que las estaciones de aforo presenten una distribución más o menos homogénea por todo el área de estudio, y evitar, siempre que sea posible, la existencia de zonas sin información.

A continuación, se describe el esquema seguido en el estudio hidrológico de caudales, el cual se detallará en los siguientes apartados.

1. Selección de las estaciones de aforo, teniendo en cuenta la localización del área que se pretende analizar.
2. Análisis estadístico de los datos foronómicos, según unas funciones estadísticas determinadas.
3. Obtención de los cuantiles asociados a cada período de retorno.
4. Determinación de los hidrogramas de avenida asociados a los caudales punta de avenida.

Una vez se determinen los hidrogramas de avenida será posible introducirlos en el modelo hidráulico de HEC-RAS.

### 3.1.1 Estaciones de aforos

Para la obtención de los datos de aforo se ha utilizado la Red de Seguimiento, dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, así como el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH).

Teniendo en cuenta la localización del tramo de estudio, ubicado en el curso bajo del río Segura, es preciso seleccionar con cuidado la estación de aforo más relevante, a fin de que los datos recogidos se ajusten lo máximo posible a las características del tramo analizado.

Finalmente, la estación considerada para la obtención de datos de aforo se encuentra en el municipio de Jacarilla, situado aguas arriba de Benejúzar, municipio que marca el inicio del tramo de río en cuestión. En la Figura 3.1 se muestra la localización exacta de la estación de Jacarilla en el curso del río Segura.

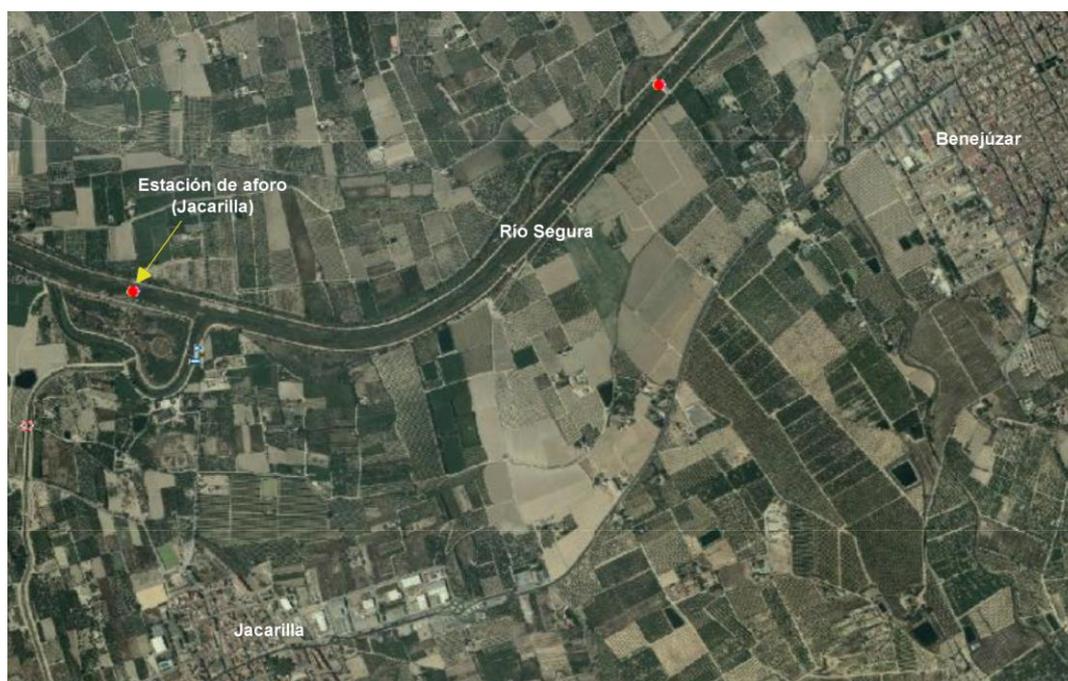


Figura 3.1 Localización de la estación de aforo de Jacarilla. Fuente: Red de Seguimiento

Esta estación presenta información hidrológica a distintos períodos de tiempo, desde datos diarios hasta datos anuales, así como sus caudales asociados, para distintos años hidrológicos, los cuales abarcan desde 1994 a 2019. Cabe destacar que los datos proporcionados se encuentran en algunos casos incompletos, por lo que en estos casos se ha requerido de información adicional proporcionada por el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica). Sin embargo, los datos recogidos de este último corresponden a la misma estación de aforo, por lo que resulta una información fiable. Además, se compararon los caudales mostrados por las dos fuentes de información, pudiendo comprobar que no había diferencia apreciable entre los datos aforados.

La *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables* establece una serie de criterios a la hora de

seleccionar las estaciones de aforo, que son los siguientes:

- El registro no afectado por la presencia de embalses aguas arriba debe tener una longitud mínima de 20 datos. En caso de que este criterio no permita seleccionar un número suficiente de estaciones, puede rebajarse la longitud mínima exigida a 15 datos. Efectivamente, las series de caudales presentaban una longitud mayor a 20 datos, teniendo, por tanto, un número aceptable para poder realizar la inferencia estadística posterior.
- Se considerará que la alteración del registro de caudales y volúmenes máximos anuales no es significativa si se cumple al menos una de las dos condiciones siguientes:
  - El porcentaje de cuenca controlada por los embalses es menor del 10%.
  - El volumen total de embalse es menor del 10% del volumen medio de las avenidas.

Ante esta última condición no se han obtenido datos concluyentes. No obstante, para este proyecto se ha considerado dicha afirmación como cierta, por lo que la estación de datos de aforo seleccionada sería válida según los criterios que establece la *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables*.

### 3.1.2 Datos de caudales

Para el estudio de episodios de avenidas es necesario disponer de los caudales instantáneos, los cuales se han obtenido a partir de la estación de aforo, como ya se ha expuesto en el apartado anterior.

Aquí es preciso mencionar que no todas las estaciones disponen de información acerca de los caudales máximos instantáneos anuales, por lo que en estos casos se deberán obtener por medio de los caudales medios diarios. En este caso, la estación de Jacarilla sí presentaba información de caudales instantáneos, aunque no de todos los años hidrológicos que se han tenido en cuenta. Por tanto, será preciso aplicar la transformación mencionada para esos años hidrológicos.

En estos casos, se aplica la denominada como fórmula de Fuller, que permite estimar los caudales máximos instantáneos, asociados a un determinado año hidrológico, a partir de los datos de caudal máximo medio diario que se tienen en esa misma estación de aforo.

La *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables* establece dos procedimientos a seguir: uno en que la estación de aforo presenta información de caudales instantáneos en la mayor parte de los años hidrológicos; y un segundo método, destinado a aquellas estaciones en las que los caudales instantáneos son completamente desconocidos. Este segundo procedimiento no será preciso aplicarlo, ya que el aforo seleccionado presenta datos suficientes de caudales instantáneos, por lo que se seguirá el primer método.

La expresión de Fuller considera una relación lineal entre los caudales instantáneos,  $Q_i$ , y los caudales medios,  $Q_{med}$ , mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{Q_i}{Q_{md}}$$

Figura 3.2 Expresión de Fuller

Partiendo de los caudales máximos medios diarios y los caudales instantáneos disponibles es posible establecer una regresión lineal, de manera que la pendiente de la recta obtenida es el coeficiente  $k$ , a partir del cual se pueden conseguir los caudales instantáneos restantes. En la Tabla 3.1 se muestran los datos originales de caudales recogidos por la estación de aforo.

Tabla 3.1 Serie de caudales obtenida de la estación de aforo

Año hidrológico	$Q_{inst}$	$Q_{med.max}$ (diario)
1994-1995	-	2.9
1995-1996	9.52	6.54
1996-1997	185.92	61.32
1997-1998	7.32	64.08
1998-1999	86.53	9.4
1999-2000	6.22	2.23
2000-2001	243.77	215.637
2001-2002	19.32	15.862
2002-2003	12.95	7.309
2003-2004	93.46	71.963
2004-2005	10.07	6.422
2005-2006	5.35	3.908
2006-2007	11.27	8.169
2007-2008	4.14	3.421
2008-2009	-	19.894
2009-2010	29.3	25.017
2010-2011	11.14	9.345
2011-2012	-	84.013
2012-2013	34.12	32.16
2013-2014	-	28.902
2014-2015	37.48	28.236
2015-2016	-	22.325
2016-2017	118.97	112.85
2017-2018	-	15.237
2018-2019	-	180.031
2019-2020	-	52.031

Como se puede observar, dentro de la serie temporal existe falta de información acerca de los caudales instantáneos en determinados años hidrológicos, por lo que ha sido necesario llevar a cabo una regresión lineal a partir de los caudales máximos medios diarios de la misma estación de aforo.

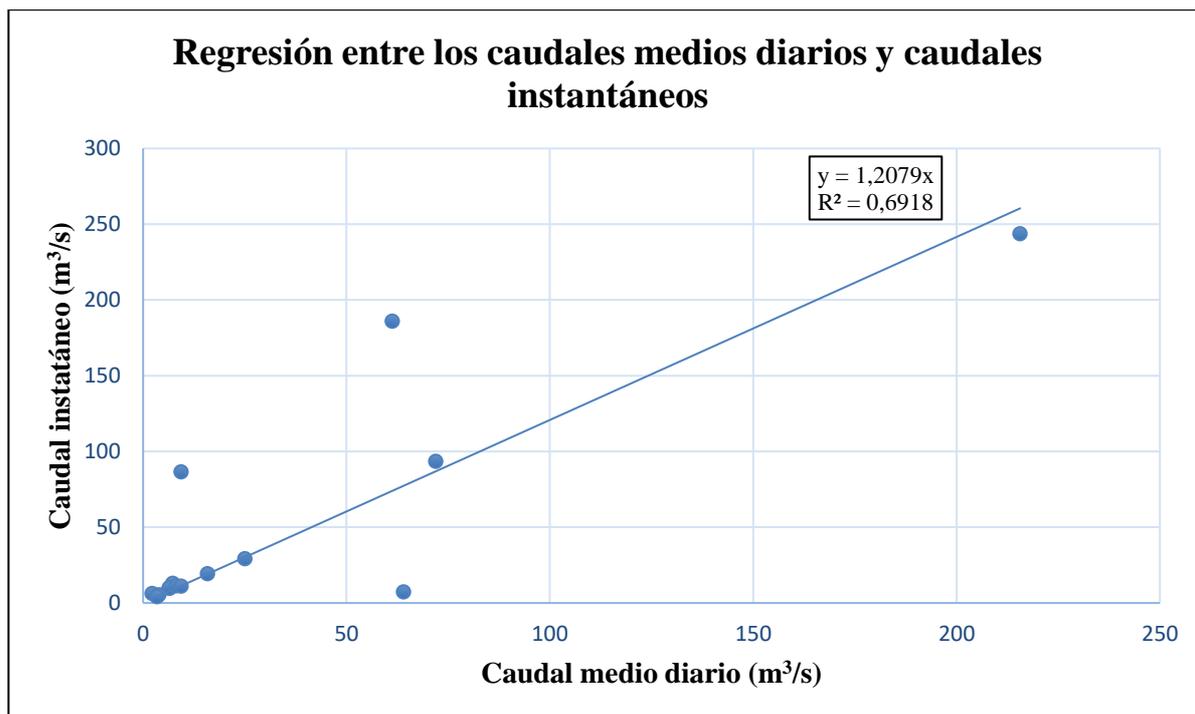


Figura 3.3 Regresión lineal entre caudales medios diarios e instantáneos

Como se puede observar, el coeficiente de determinación de dicha recta presenta un valor en torno a 0.7, valor algo alejado de la unidad.

No obstante, este coeficiente aún presenta un valor relativamente alto, por lo que se puede considerar un ajuste aceptable. En la Figura 3.3 se observan algunos valores de caudal muy distantes de la recta de regresión, los cuales se corresponden con los mayores caudales recogidos por la estación de aforo, que producen que la bondad del ajuste se vea reducida. Es posible apreciar grandes variaciones en los caudales circulantes, lo que sugiere el carácter hidrológico tan extremo que la cuenca del Segura presenta.

Finalmente, tras llevar a cabo los cálculos pertinentes, se han obtenido los siguientes caudales instantáneos:

Tabla 3.2 Caudales instantáneos

Año hidrológico	Q <sub>inst</sub> (m <sup>3</sup> /s)
1994-1995	3.503
1995-1996	9.52
1996-1997	185.92
1997-1998	7.32
1998-1999	86.53
1999-2000	6.22
2000-2001	243.77
2001-2002	19.32
2002-2003	12.95
2003-2004	93.46
2004-2005	10.07
2005-2006	5.35
2006-2007	11.27
2007-2008	4.14
2008-2009	24.030
2009-2010	29.3
2010-2011	11.14

2011-2012	101.479
2012-2013	34.12
2013-2014	34.911
2014-2015	37.48
2015-2016	26.966
2016-2017	118.97
2017-2018	18.405
2018-2019	217.460
2019-2020	62.848

Con estos caudales se podrá realizar la inferencia estadística, a partir de la cual se obtendrán los caudales punta asociados a los distintos períodos de retorno, que en este caso han sido los siguientes: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.

Cabe mencionar de la posible inexactitud que pudieran presentar los valores de caudales instantáneos que se obtengan a partir de la aplicación de la expresión de Fuller, ya que la forma más exacta y fiable de obtenerlos sería mediante mediciones directas en el propio río. No obstante, el método que se ha seguido es bastante utilizado en el cálculo de caudales máximos, por lo que la experiencia empírica que supone dicho método es suficiente para tomar los resultados como válidos. Asimismo, la estación de aforo presentaba información suficiente para realizar una estimación fiable, por lo que se considera correcta el procedimiento aplicado.

También es importante remarcar las hipótesis que se han considerado en los cálculos anteriores. Según la expresión de Fuller, existe una relación constante entre los caudales instantáneos y los caudales máximos medios diarios en toda la cuenca y es independiente de que estos caudales tengan lugar durante distintas avenidas, lo cual puede no ser cierto, sobre todo respecto a las cuencas del levante y sureste de la península. A pesar de ello, se ha considerado, ante la imposibilidad de realizar otra hipótesis, que la variabilidad de la relación entre caudales presenta un rango de variación no muy amplio, al igual que ocurre en otras cuencas con regímenes hidrológicos no tan extremos.

Por tanto, se han considerado como válidos los datos de caudal obtenidos anteriormente.

Una vez determinados los caudales instantáneos para cada año hidrológico se puede realizar el análisis estadístico, para así obtener los caudales puntas de los hidrogramas de avenida.

### 3.1.3 Análisis estadístico

La obtención de las puntas de los hidrogramas de avenida es de vital importancia, ya que supone el punto de partida del modelo hidráulico que se realizará posteriormente. Para calcular los cuantiles es necesario ajustar, mediante una función de distribución, los datos de las series temporales de caudales instantáneos, definidos en el apartado anterior. Por tanto, la función de distribución presenta un papel fundamental, pues a través de ella se analizan las propiedades estadísticas de las series temporales y, por tanto, se podrá realizar una estimación más aproximada de los cuantiles.

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) establece una regionalización del territorio peninsular, dividiéndolo en distintas zonas con comportamiento estadístico homogéneo. Cada uno de estos territorios queda caracterizado por una, o varias, distribuciones estadísticas, a fin de mejorar la estimación de determinados estadísticos. En la Figura 3.4 se muestra el mapa de la España peninsular con las distintas regiones en que queda dividida.

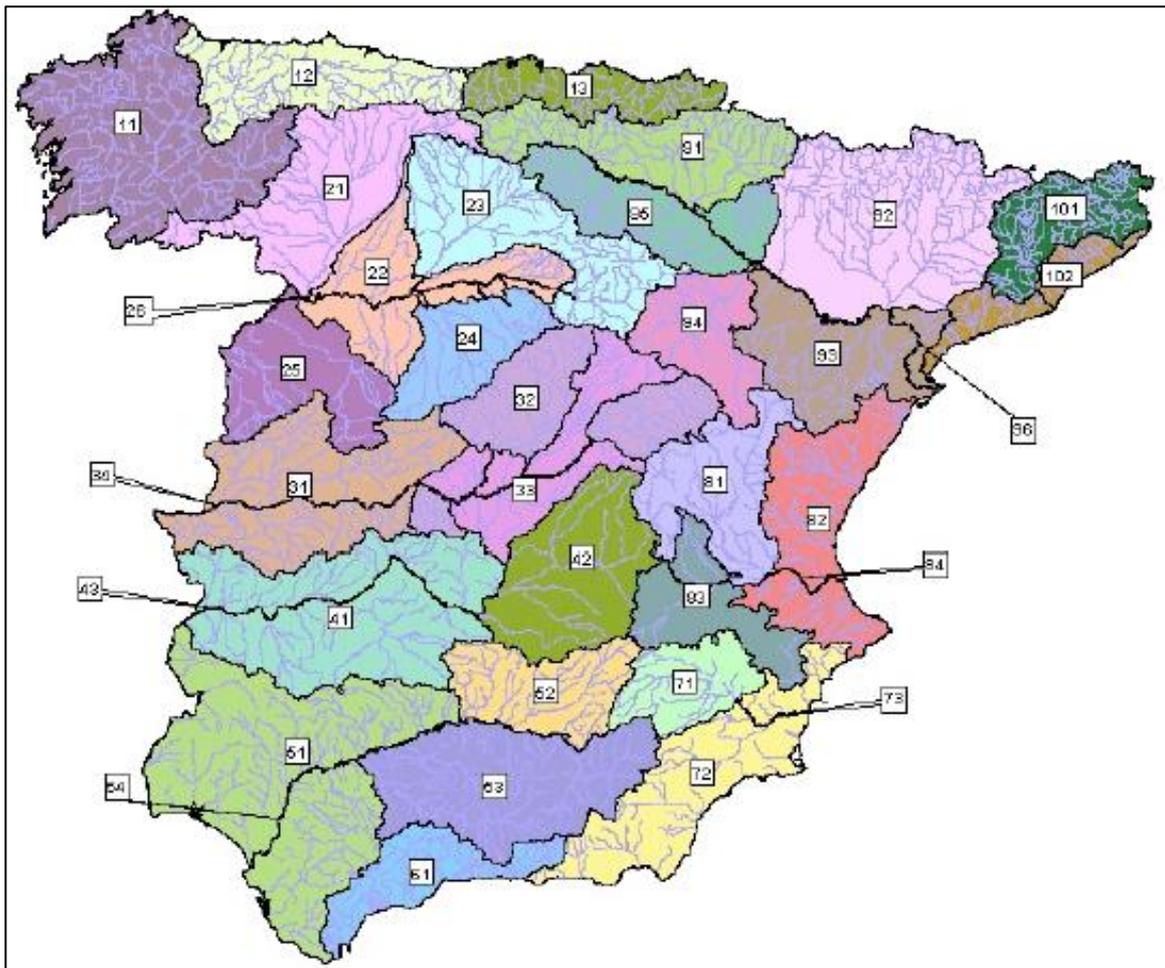


Figura 3.4 Regiones con comportamiento estadístico homogéneo, respecto a los caudales máximos anuales.

Fuente: Mapa de Caudales Máximos

Como resultado de este proceso de regionalización se pueden distinguir hasta 29 regiones, identificadas cada una de ellas por un código numérico. Se puede observar que, dentro de ciertas regiones, existen a su vez determinados tramos de río, correspondientes a los principales ríos de las cuencas, que se consideran de manera independiente, debido a su régimen hidrológico. El tramo final del río Segura pertenecería a la región 73, la cual presenta un comportamiento intermedio entre las regiones 71 y 72.

Los ríos mediterráneos, como es el caso del Segura, presentan dos poblaciones de avenida: avenidas ordinarias, generadas en invierno y primavera, siendo éstas de menor magnitud y más frecuentes; y las avenidas de carácter extraordinario, las cuales tienen lugar durante el verano y otoño. Debido a este comportamiento hidrológico, las funciones de distribución, tales como la Gumble o la LogPearson tipo III, no son capaces de reproducir correctamente el comportamiento tan extremo de estas cuencas, por lo que se deberá utilizar otro tipo de función de distribución.

Como ya se ha comentado, cada zona se rige por una determinada función de distribución. En el caso del curso bajo del Segura, las distribuciones que más ajustarían las series temporales de caudales serían las denominadas como GEV (Generalized Extreme Value) y TCEV (Two Components Extreme Value), ambas derivadas de la función Gumble, tal como se muestra en la Tabla 3.3, recogida en la *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables*. Según estudios realizados por el CEDEX, estas distribuciones reproducen mejor el comportamiento tan extremo existentes en esta zona.

Tabla 3.3 Tabla de Funciones de distribución para cada región estadística. Fuente: *Guía Metodológica para el Desarrollo de Zonas Inundables*

Región	Función	Región	Función
11	GEV	53	GEV
12	GEV	54	GEV
13	GEV	61	GEV
21	Gumbel	71	GEV
22	GEV	72	TCEV
23	Gumbel	73	GEV - TCEV
24	GEV	81	GEV
25	GEV	82	TCEV
26	GEV	83	GEV
31	GEV	84	TCEV
32	GEV	91	GEV
33	GEV	92	GEV
34	GEV	93	GEV
41	GEV	94	GEV
42	GEV	95	GEV
43	GEV	96	Gumbel (aguas arriba del Segre) -GEV (aguas abajo del Segre)
51	GEV	101	GEV
52	GEV	102	GEV

Por tanto, se llevará a cabo un análisis de la serie de caudales para cada una de estas dos distribuciones y se compararán los resultados obtenidos en cada caso. Posteriormente, se realizará un test de bondad para verificar si la muestra se ajusta o no correctamente a dichas funciones.

### 3.1.4 Función de valores extremos generalizada (GEV)

La distribución General de Valores Extremos, más conocida como GEV, es una generalización de la distribución EVI, también conocida como función Gumbel, cuando el parámetro de forma  $k$  de ésta toma un valor de cero. Para el ajuste de esta función se servirá de la teoría de los L-Momentos, empleados para predecir la ocurrencia de valores extremos de multitud de fenómenos, tales como lluvia, crecidas..., asociados a altos períodos de retorno, es decir, con escasa probabilidad de ser superados.

El método de los L-Momentos, o momentos de orden mayor, permiten ajustar de manera más eficiente la función de distribución de probabilidades, ya que les proporciona una mayor importancia a los valores mayores de la serie de datos. De esta forma, se reduce la influencia que las magnitudes pequeñas de la muestra de datos pueden presentar en la teoría de la predicción de eventos extremos.

A continuación, se detalla el procedimiento de ajuste de las funciones de distribución propuestas mediante el método de los L-Momentos, establecido en la *Guía Metodológica para el Desarrollo de zonas inundables*.

Los momentos ponderados probabilísticamente (PWM), para aquellas distribuciones que pueden ser expresadas de manera inversa siguen la siguiente expresión:

$$M_{ijk} = E \left[ x^j F^j (1-F)^k \right]$$

Figura 3.5 Momentos ponderados probabilísticamente (PWM)

Siendo  $E$  la media,  $x$  la variable y  $F$  la función de distribución, que en el caso de la GEV es la siguiente:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{x-u}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \right\}$$

Figura 3.6 Función de distribución GEV

Como se puede observar, la expresión algebraica que define la función de distribución GEV depende de tres parámetros:  $u$ ,  $\alpha$  y  $k$ , que corresponden a los parámetros de localización, de escala y de forma, respectivamente. Sus expresiones serán mostradas con posterioridad.

No obstante, para estimar los parámetros de las funciones de distribución se suelen emplear los momentos ponderados de orden  $M_{1j0}$ , que son lineales en la variable. Estos momentos presentan la ventaja de que, para muestras de pequeño tamaño, la estimación no es sesgada, como sí ocurre con los momentos  $M_{ijk}$ , por lo que a su vez esto supone una ventaja a la hora de estimar los parámetros de las funciones. La estimación de estos momentos se lleva a cabo ponderando el valor de la variable por la probabilidad de no ser superada, lo cual indica el mayor peso que se les da a las variables de mayor valor, como se indicó anteriormente.

Así, para calcular los momentos  $M_{1j0}$  de orden  $r$ , que se designará a partir de ahora como  $b_r$ , se aplica la siguiente expresión que se muestra a continuación. La serie de datos de caudales ha de estar ordenada de forma ascendente, debido a que los caudales mayores presentan una menor probabilidad de ocurrencia.

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \left( \frac{i-0,35}{n} \right)^r$$

Figura 3.7 Expresión de los momentos ponderados probabilísticamente

Donde  $n$  es la longitud de la muestra e  $i$  es la posición que ocupa el dato dentro de la serie ordenada.

Seguidamente, es posible calcular los L-Momentos de la muestra,  $\lambda_i$ , los cuales son combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticamente, y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= b_0 \\ \lambda_2 &= 2b_1 - b_0 \\ \lambda_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0 \\ \lambda_4 &= 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0\end{aligned}$$

Figura 3.8 Expresiones de los L-Momentos

Calculados los L-Momentos se pueden estimar los coeficientes adimensionales de L-Momentos ( $t_i$ ):

$$\begin{aligned}t_2 &= \lambda_2 / \lambda_1 \\ t_3 &= \lambda_3 / \lambda_2 \\ t_4 &= \lambda_4 / \lambda_2\end{aligned}$$

Figura 3.9 Coeficientes adimensionales de los L-Momentos

Finalmente, los tres parámetros que caracterizan la función GEV se estiman a partir de  $\lambda_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , por medio de las expresiones que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}c &= \frac{2}{3+t_3} - \frac{\log(2)}{\log(3)} \\ k &= 7,8590 c + 2,9554 c^2 \\ \alpha &= \frac{t_2 \lambda_1 k}{(1-2^{-k}) \Gamma(1+k)} \\ u &= \lambda_1 - \alpha [1 - \Gamma(1+k)] / k\end{aligned}$$

Figura 3.10 Parámetros de la función GEV

Donde  $\Gamma$  representa la función gamma.

De esta forma, los valores obtenidos para cada uno de los parámetros que definen la función GEV son:

Tabla 3.4 Valores de los parámetros. Función GEV

Parámetro	Valor
$k$	-0.6245
$\alpha$	18.3990
$u$	16.3759

Tomando la inversa de la función e introduciendo los valores de P, es decir, la probabilidad de que un determinado valor de caudal ocurra al menos una vez en N años, y los tres parámetros anteriores, se pueden obtener los caudales máximos asociados a los períodos de retorno que se han considerado: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.

Tabla 3.5 Caudales máximos según la función GEV

T (años)	P	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)
2	0.5	23.954
5	0.8	62.089
10	0.9	107.032
25	0.96	204.071
50	0.98	323.855
100	0.99	508.019
500	0.998	1414.277
1000	0.999	2188.162

### 3.1.5 Función de valores extremos de dos componentes (TCEV)

La función TCEV resulta de la composición de dos funciones tipo Gumbel, por lo que será preciso definir cuatro parámetros para calcular los caudales máximos. En esta función de distribución estadística es preciso tener en cuenta aquellos datos denominados como *outliers*, es decir, datos anómalamente altos.

Cabe remarcar que la presencia de este tipo de datos no supone necesariamente una baja calidad de la información. Se trata de localizar aquellos valores de la serie temporal que presentan una baja probabilidad de ocurrencia, es decir que, dentro de un período de tiempo, se registren caudales con valores tales que se correspondan con períodos de retorno muy altos. Bajo esta afirmación, cabría preguntarse si sería preciso o no eliminar los *outliers*, ya que se trata de estudiar episodios de avenidas y sus consecuencias, por lo que son estos valores anómalamente altos los que producirían los efectos más importantes. El uso de los datos anómalos en las leyes de frecuencia puede conllevar la obtención de cuantiles excesivamente altos y, por ende, un modelo hidráulico que se le alejaría de la realidad, dada su elevada incertidumbre.

Para comprobar la existencia de valores anómalamente altos se puede seguir el procedimiento establecido por el Water Resources Council de EEUU (WRC,1981), el cual asume una distribución log-normal para los datos, lo que supone que los logaritmos de la serie temporal se ajustan a una distribución normal, de manera que los cuantiles de la muestra se obtengan a partir de la técnica del factor de frecuencia:

$$y = \bar{y} + K \cdot s_y$$

Figura 3.11 Distribución log-Normal

Donde  $y$  es el logaritmo del caudal,  $\bar{y}$  es la media de la serie de logaritmos,  $K$  el factor de frecuencia y  $s_y$  la desviación típica de la serie de logaritmos. El factor de frecuencia  $K$  depende del tamaño de la muestra, el cual es de 25 datos en este caso.

Así, aquellos caudales cuyos logaritmos tomen un valor superior al cuantil  $y_H$ , correspondiente al factor de frecuencia, se deberán considerar como valores anómalamente altos. A continuación, se muestran los parámetros obtenidos para el cálculo de *outliers*:

Tabla 3.6. Parámetros log-Normal

n	25
K	2.485
Media	1.4801
$s_y$	0.5445
$y_H$	2.833

Con estos valores es posible comprobar la existencia de valores anómalamente altos, simplemente comparando con el valor  $y_H$ .

Tabla 3.7 Comprobación de datos anómalamente altos (Outliers)

$Q_{inst}$ (Jacarilla)	Log $Q_{inst}$	Dato anómalamente alto
3.503	0.544	NO
4.14	0.617	NO
5.35	0.728	NO
6.22	0.794	NO
7.32	0.865	NO
9.52	0.978	NO
10.07	1.003	NO
11.14	1.047	NO
11.27	1.052	NO
12.95	1.112	NO
18.404	1.265	NO
19.32	1.286	NO
24.029	1.381	NO
26.966	1.431	NO
29.3	1.467	NO
34.12	1.533	NO
34.910	1.543	NO
37.48	1.574	NO
62.848	1.798	NO

86.53	1.937	NO
93.46	1.970	NO
101.479	2.006	NO
118.97	2.075	NO
185.92	2.27	NO
217.459	2.337	NO
243.77	2.387	NO

Se puede comprobar que efectivamente no existen *outliers* dentro de la muestra de datos considerada, por lo que no será preciso eliminar ninguno de los datos presentes en la serie temporal de caudales.

En caso contrario, habría sido necesario el estudio de estos datos anómalos, pero considerándolos como información histórica de la zona de estudio, siempre que se dispusiese de información suficiente como para tomar los *outliers* como el máximo ocurrido en un determinado período temporal, como establece la *Guía para el Desarrollo de zonas inundables*.

Comprobados los valores anómalos, se procede a la aplicación de la función de distribución, la cual sigue la siguiente expresión:

$$F(x) = \exp \left[ -e^{-\frac{x-u_1}{\alpha_1}} - e^{-\frac{x-u_2}{\alpha_2}} \right]$$

Figura 3.12 Función de distribución TCEV

Esta función es resultado de la composición de dos funciones Gumbel y, como se puede observar, depende de cuatro parámetros, lo cual genera una mayor incertidumbre en el cálculo de caudales máximos. La obtención de dichos parámetros es ligeramente diferente a la expuesta anteriormente en el análisis de la función GEV.

Para calcular los dos primeros parámetros de la función,  $\alpha_1$  y  $u_1$ , se sirve de un ajuste local de una función Gumbel, aplicando el método de los L-Momentos, análogamente a cómo se realizó con la función GEV.

$$\alpha_1 = (\lambda_1)_1 \frac{(t_2)_1}{\ln(2)}$$

$$u_1 = (\lambda_1)_1 - 0,5772 \alpha_1$$

Figura 3.13 Parámetros primera rama, función TCEV

Por otra parte, para la obtención de los dos parámetros restantes,  $\alpha_2$  y  $u_2$ , se supondrá un valor regional del L-CV de la segunda rama, según se expone en la Tabla 3.8, y se estimará la media  $(\lambda_1)_2$  a partir de una regresión con los parámetros obtenidos para la primera rama de la función.

Tabla 3.8 L-coeficiente de variación y parámetros de la regresión. Función TCEV. Fuente: GMDZI

Región	L-CV	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
72 y 73	-0,26	1,5846	1,2280	0,8554
82 y 84	-0,24	2,6039	0,5659	0,6861

Como se expuso anteriormente, el tramo de río estudiado pertenece a la región 73, por lo que, siguiendo la Tabla 3.8 mostrada, quedarían definidos los distintos coeficientes necesarios para el cálculo de los parámetros de la segunda rama de la función.

$$(\lambda_1)_2 = -10^a (\lambda_1)_1^b (t_2)_1^c$$

$$\alpha_2 = (\lambda_1)_2 \frac{(t_2)_2}{\ln(2)}$$

$$u_2 = (\lambda_1)_2 - 0,5772 \alpha_2$$

Figura 3.14 Parámetros segunda rama, función TCEV

De esta forma, tras llevar a cabo el cálculo de los estadísticos anteriores, y aplicando la expresión inversa de la función TCEV, se han obtenido los siguientes caudales, asociados a unos determinados períodos de retorno:

Tabla 3.9 Caudales máximos según la función TCEV

T (años)	P	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
2	0.5	48.228
5	0.8	116.5482
10	0.9	169.6498
25	0.96	283.662
50	0.98	954.875
100	0.99	1966.885
500	0.998	4305.492
1000	0.999	5310.891

Tras obtener los cuantiles para cada período de retorno, se ha aplicado un test de bondad a la muestra de datos con el objetivo de verificar si efectivamente dicha muestra se ajusta o no de manera adecuada a la función de distribución considerada. En este caso se ha utilizado el test de Kolmogorov-Smirnov, debido a la sencillez que presenta su aplicación.

### 3.1.6 Test de Kolmogorov-Smirnov

Un problema que presenta el cálculo estadístico habitualmente es verificar si un conjunto de datos asociados a un fenómeno es compatible con una función de distribución estadística determinada, es decir, comprobar si dicho conjunto de datos se ajusta a un modelo específico.

El test de Kolmogorov-Smirnov es una prueba no paramétrica utilizada para determinar la bondad del ajuste de una muestra de datos, la cual permite conocer el grado de concordancia entre la distribución que siguen dichos

datos y una distribución teórica específica, en este caso las distribuciones GEV y TCEV. De esta manera, se puede establecer si los datos observados pueden o no proceder de una función de distribución concreta.

Este test se caracteriza por presentar una aproximación más potente para funciones de distribución continuas, como es el caso de las funciones GEV y TCEV. Asimismo, es posible su aplicación para muestras de pequeño tamaño, al contrario de lo ocurre con otras pruebas, con las cuales no sería aplicable. Esto, unido a su sencillez a la hora de aplicarlo, hace que sea muy utilizado para verificar la bondad del ajuste.

El método para aplicar este test de bondad consiste en comparar la distribución muestral empírica,  $F_s$ , con la función teórica,  $F(x)$ . Por tanto, previamente es necesario obtener los valores de la función  $F_s$ , los cuales dependerán del tamaño de la muestra,  $n$ , y de la posición que ocupe cada dato de caudal máximo dentro de la muestra ordenada de manera descendente (de mayor a menor).

$$F_s = 1 - \frac{i}{n}$$

Figura 3.15 Expresión distribución muestral,  $F_s$

Los valores de  $F(x)$  se obtienen simplemente aplicando la expresión correspondiente a cada función de distribución que se pretenda comprobar su ajuste, introduciendo los datos de la muestra.

Posteriormente, ya es posible calcular la diferencia que existe entre las frecuencias relativas acumuladas teóricas y observadas para los datos de la muestra, y obtener el máximo.

$$D = \max(|F_s - F|)$$

Figura 3.16 Diferencia entre frecuencias teóricas y observadas

Como último paso, es necesario definir un nivel de significación de las muestras  $\alpha$ , relacionado con el nivel de confianza que se considere. En este caso, se ha determinado un nivel de confianza del 95%, por lo que el nivel de significación será del 5%.

Según el tamaño de la muestra,  $n$ , la cual corresponde con 25 años hidrológicos, y  $\alpha$ , se obtiene un valor  $D$  (distancia Kolmogorov-Smirnov), a partir de la Tabla 3.10. En caso de que el estadístico  $D$  calculado sea menor que el estadístico  $D$  de la tabla, la muestra será considerada como válida, ya que la serie de datos se ajusta de manera correcta a la función de distribución que se esté tratando (GEV y TCEV).

Por el contrario, si el valor del estadístico  $D$  de la tabla superase al  $D$  calculado, la muestra no seguiría la distribución estadística, por lo que deberá ser rechazada y, por tanto, no podrá ser considerada para procesos posteriores.

Tabla 3.10 Test de Bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

<i>n</i>	<i>Nivel de significación <math>\alpha</math></i>							
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540
18	0.24360	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	0.39380	0.42224	0.44234
19	0.23735	0.27136	0.30143	0.33685	0.36117	0.38379	0.41156	0.43119
20	0.23156	0.26473	0.29408	0.32866	0.35241	0.37451	0.40165	0.42085
21	0.22517	0.25858	0.28724	0.32104	0.34426	0.36588	0.39243	0.41122
22	0.22115	0.25283	0.28087	0.31394	0.33666	0.35782	0.38382	0.40223
23	0.21646	0.24746	0.27491	0.30728	0.32954	0.35027	0.37575	0.39380
24	0.21205	0.24242	0.26931	0.30104	0.32286	0.34318	0.36787	0.38588
25	0.20790	0.23768	0.26404	0.29518	0.31657	0.33651	0.36104	0.37743
26	0.20399	0.23320	0.25908	0.28962	0.30963	0.33022	0.35431	0.37139
27	0.20030	0.22898	0.25438	0.28438	0.30502	0.32425	0.34794	0.36473
28	0.19680	0.22497	0.24993	0.27942	0.29971	0.31862	0.34190	0.35842
29	0.19348	0.22117	0.24571	0.27471	0.29466	0.31327	0.33617	0.35242
30	0.19032	0.21756	0.24170	0.27023	0.28986	0.30818	0.33072	0.34672
31	0.18732	0.21412	0.23788	0.26596	0.28529	0.30333	0.32553	0.34129
32	0.18445	0.21085	0.23424	0.26189	0.28094	0.29870	0.32058	0.33611
33	0.18171	0.20771	0.23076	0.25801	0.27577	0.29428	0.31584	0.33115
34	0.17909	0.21472	0.22743	0.25429	0.27271	0.29005	0.31131	0.32641
35	0.17659	0.20185	0.22425	0.25073	0.26897	0.28600	0.30597	0.32187
36	0.17418	0.19910	0.22119	0.24732	0.26532	0.28211	0.30281	0.31751
37	0.17188	0.19646	0.21826	0.24404	0.26180	0.27838	0.29882	0.31333
38	0.16966	0.19392	0.21544	0.24089	0.25843	0.27483	0.29498	0.30931
39	0.16753	0.19148	0.21273	0.23785	0.25518	0.27135	0.29125	0.30544

Una vez explicados los pormenores del test de Kolmogorov-Smirnov, se procede a exponer los resultados finalmente obtenidos para cada una de las funciones de distribución que se han considerado, GEV y TCEV.

## 3.1.6.1 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función GEV

Tabla 3.11 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función GEV

Datos Máximos (de mayor a menor)	$F_s$	$F(x)$	D
243.77	0.961538462	0.96928288	0.00774441
217.46	0.923076923	0.96358677	0.04050984
185.92	0.884615385	0.95413952	0.06952413
118.97	0.846153846	0.913448	0.06729415
101.48	0.807692308	0.89256509	0.08487278
93.46	0.769230769	0.88015214	0.11092137
86.53	0.730769231	0.86746869	0.13669946
62.85	0.692307692	0.80285325	0.11054556
37.48	0.653846154	0.65634849	0.00250234
34.91	0.615384615	0.63271707	0.01733245
34.12	0.576923077	0.62495796	0.04803489
29.30	0.538461538	0.57203793	0.03357639
26.97	0.5	0.54250018	0.04250018
24.03	0.461538462	0.50114192	0.03960346
19.32	0.423076923	0.42377648	0.00069956
18.40	0.384615385	0.4070365	0.02242112
12.95	0.346153846	0.29555477	0.05059907
11.27	0.307692308	0.25761283	0.05007948
11.14	0.269230769	0.25462318	0.01460759
10.07	0.230769231	0.22979028	0.00097895
9.52	0.192307692	0.21690437	0.02459668
7.32	0.153846154	0.16520396	0.01135781
6.22	0.115384615	0.13978535	0.02440073
5.35	0.076923077	0.12022014	0.04329707
4.14	0.038461538	0.09426004	0.05579851
3.50	0	0.08138168	0.08138168

Tabla 3.12 Resultados test de bondad. Función GEV

n	25
D	0.1367
Nivel de confianza (%)	95
Nivel de significación ( $\alpha$ )	0.05
C (tabla)	0.26404

Como queda reflejado en la tabla anterior, se cumple que  $D < D$  (tabla), por lo que la muestra de datos se ajusta correctamente a la función GEV.

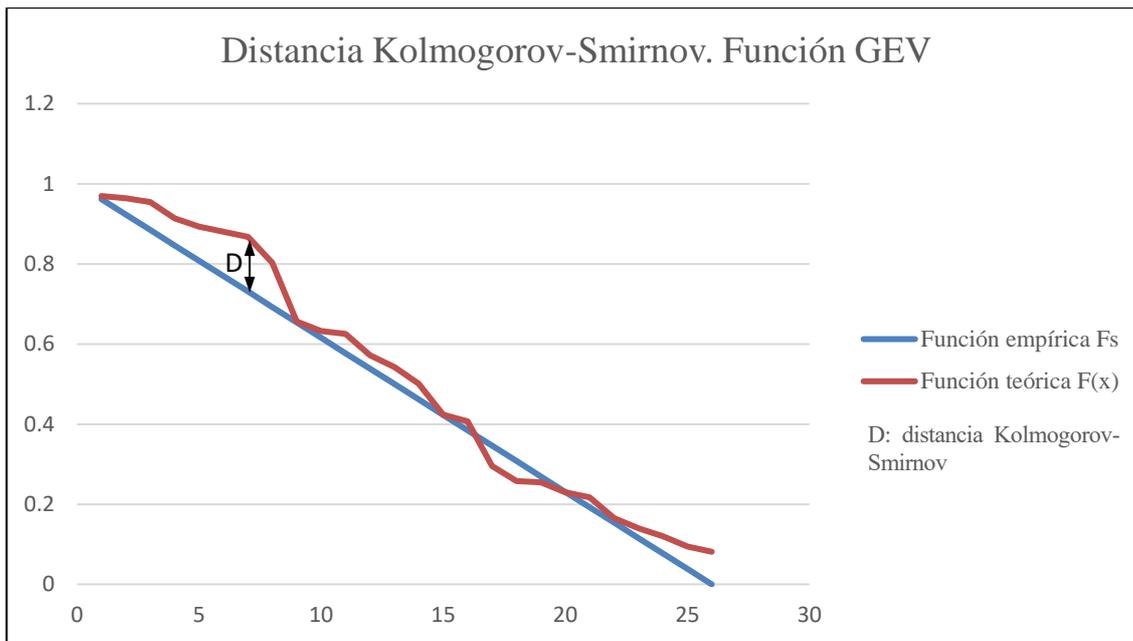


Figura 3.17 Distancia Kolmogorov-Smirnov. Función GEV

3.1.6.2 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV

Tabla 3.13 Test de Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV

Datos Máximos ( de mayor a menor)	$F_s$	$F(x)$	D
243.77	0.96153846	0.950157395	0.01138107
217.46	0.92307692	0.938960698	0.01588377
185.92	0.88461538	0.916911545	0.03229616
118.97	0.84615385	0.806581009	0.03957284
101.48	0.80769231	0.753435947	0.05425636
93.46	0.76923077	0.724395156	0.04483561
86.53	0.73076923	0.696738482	0.03403075
62.85	0.69230769	0.583580343	0.10872735
37.48	0.65384615	0.433314909	0.22053124
34.91	0.61538462	0.41690898	0.19847564
34.12	0.57692308	0.41183348	0.1650896
29.30	0.53846154	0.380692606	0.15776893
26.97	0.5	0.36553307	0.13446693
24.03	0.46153846	0.346434525	0.11510394
19.32	0.42307692	0.315877927	0.107199
18.40	0.38461538	0.309968173	0.07464721
12.95	0.34615385	0.275088803	0.07106504
11.27	0.30769231	0.264504596	0.04318771
11.14	0.26923077	0.263689403	0.00554137
10.07	0.23076923	0.257002158	0.02623293
9.52	0.19230769	0.253581012	0.06127332
7.32	0.15384615	0.240016401	0.08617025
6.22	0.11538462	0.233312012	0.1179274

5.35	0.07692308	0.228049264	0.15112619
4.14	0.03846154	0.22079165	0.18233011
3.50	0	0.217000619	0.21700062

Tabla 3.14 Resultados test de bondad. Función TCEV

n	25
D	0.2205
Nivel de confianza (%)	95
Nivel de significación ( $\alpha$ )	0.05
C (tabla Kolmogorov)	0.26404

De nuevo, queda reflejado en la tabla anterior que  $D < D$  (tabla), por lo que la muestra de datos se ajusta correctamente a la función TCEV.

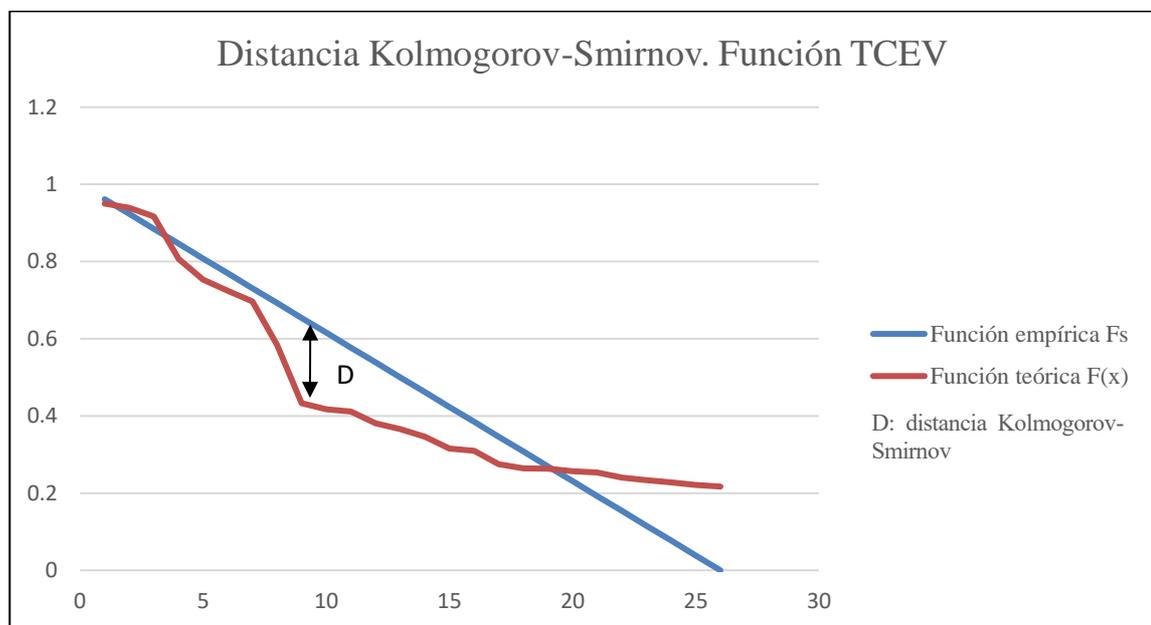


Figura 3.18 Distancia Kolmogorov-Smirnov. Función TCEV

Como se comentó anteriormente, el parámetro  $D$ , denominado como distancia Kolmogorov-Smirnov, trata de cuantificar la diferencia que existe entre la función teórica y la función empírica de datos, es decir, cómo es el ajuste de una serie de datos a una determinada distribución estadística. Para ambas distribuciones se han obtenido valores de  $D$  bajos, lo cual indicaría un buen ajuste de los datos de la serie de caudales. No obstante, con la función GEV el parámetro  $D$  presenta un valor menor que en el caso de la TGEV, por lo que los datos se ajustarían mejor a la primera. Esto no implica que esta última deba ser rechazada, pues su ajuste también presenta una buena aproximación con respecto a la función teórica.

Por tanto, ambas distribuciones estadísticas son válidas, ya que verifican el test de bondad y su ajuste es próximo a las funciones teóricas, por lo que los caudales máximos obtenidos para cada una de ellas pueden ser utilizados para llevar a cabo la simulación hidráulica posterior.

### 3.1.7 Resumen y análisis de resultados hidrológicos

Una vez comprobado el buen ajuste de la serie de caudales extraídos de la estación de aforo, ya es posible establecer los hidrogramas de avenida para llevar a cabo la simulación hidráulica, lo cual se detallará en el siguiente apartado.

A modo de resumen, se exponen a continuación los resultados obtenidos para cada período de retorno a partir de la inferencia estadística de las dos distribuciones que se han considerado.

Tabla 3.15 Resumen de Caudales Máximos

T (años)	Q <sub>max</sub>	
	GEV	TCEV
2	23.953	48.228
5	62.089	116.548
10	107.032	169.649
25	204.071	283.662
50	323.855	954.875
100	508.019	1966.8851
500	1414.280	4305.492
1000	2188.162	5310.892

Comparando ambos resultados, es posible apreciar que los caudales máximos obtenidos a partir de la función TCEV implica valores mayores que aquellos determinados a partir de la GEV. En ambos casos, se puede observar cómo aumentan los caudales de manera considerable para los períodos de retorno por encima de 25 años. Esto se relaciona con la longitud de la serie de datos temporales, como se explicará a continuación.

La serie de caudales obtenidas a partir de las estaciones de aforo corresponde a los máximos registrados durante 25 años. Dentro de esta serie, el mayor caudal registrado durante ese período era de 243.77 m<sup>3</sup>/s, lo cual comparando con los caudales punta correspondientes al período de retorno de 25 años, se puede observar que estos valores se aproximan al valor máximo de la serie temporal para ambas distribuciones. Por tanto, esto pone de manifiesto que la serie temporal presenta una longitud suficiente para obtener de manera fiable los caudales punta para períodos de retorno iguales o inferiores a 25 años.

Por el contrario, para períodos superiores, tales como 50 o 100 años, en los que la ley de frecuencia queda fuera del rango de probabilidad cubierto por los datos de la serie, la precisión en la estimación de los cuantiles se ve considerablemente reducida. Es decir, el error en la estimación se incrementa al aumentar el período de retorno, siendo dicho error mayor cuanto menor es la longitud de la serie de caudales. De esta forma, al no presentar datos suficientes la serie de caudales no es muy adecuada para representar los caudales punta para períodos de retorno superiores.

Aparte de lo anterior, la incertidumbre que genera la estimación de cuantiles es mayor en aquellas funciones de distribución con tres o más parámetros, como es el caso de las funciones GEV y TCEV, ya que las leyes de frecuencia vienen determinadas por el valor de los momentos estadísticos de tercer o cuarto orden, los cuales han de ser estimados a partir de los datos de la muestra. A su vez, la incertidumbre asociada a la estimación de estos momentos estadísticos se relaciona con la longitud de la muestra que se esté considerando, aumentando dicha incertidumbre a medida que aumenta el orden del momento que se pretenda estimar.

En conclusión, los caudales punta obtenidos para períodos de retorno superiores a 25 años presentan una gran incertidumbre. El alcance de este Trabajo de Fin de Grado se centrará en los efectos que tendrían los hidrogramas de avenidas correspondientes a períodos de retorno de 10 y 25 años, ya que para períodos superiores los caudales adquieren valores tan extremos que las motas situadas en las márgenes del río no supondrán un sistema de contención viable, por lo que se ha descartado su estudio. Además de esto, a partir del análisis estadístico, se ha podido comprobar que, para 10 y 25 años de período de retorno, los resultados obtenidos presentan una gran

fiabilidad.

Asimismo, a partir de la Tabla 3.15, se puede comprobar que los caudales punta derivados del tratamiento estadístico mediante la función GEV presentan valores relativamente inferiores a los de la función TCEV, por lo que se considerarán principalmente los datos de esta última para llevar a cabo las simulaciones. Puesto que se pretende analizar situaciones de crecidas extraordinarias, se introducirá el hidrograma de mayor caudal punta. Esto reafirma lo expuesto en la *Guía Metodológica para el Desarrollo de Zonas Inundables*, según la cual establece que en las regiones cercanas a la costa de las cuencas del Júcar y Segura se emplee una función de valores extremos de dos componentes (TCEV), pues es la que mejor ajusta el comportamiento hidrológico tan extremo presente en estas zonas.

Una vez calculados los caudales punta, es posible estimar los hidrogramas que se introducirán en las simulaciones hidráulicas.

### 3.2 Obtención de los hidrogramas de avenida

Los hidrogramas de avenida supondrán el punto más relevante de las simulaciones hidráulicas posteriores, pues el objetivo de este trabajo consiste en analizar los efectos que el retranqueo de las motas puede suponer durante episodios de avenidas.

Para la obtención de los hidrogramas se han tenido en cuenta hidrogramas históricos pertenecientes a la cuenca del Segura y, más concretamente, al curso bajo de su cauce principal. La Confederación Hidrográfica del Segura se ha encargado de recopilar una serie de hidrogramas de avenida ocurridos en las últimas décadas. Con la información recopilada durante diversos fenómenos se han podido determinar los hidrogramas asociados a las crecidas. A continuación, se muestra un ejemplo de la evolución de las series de datos instantáneos en la comarca de la Vega Baja del Segura.

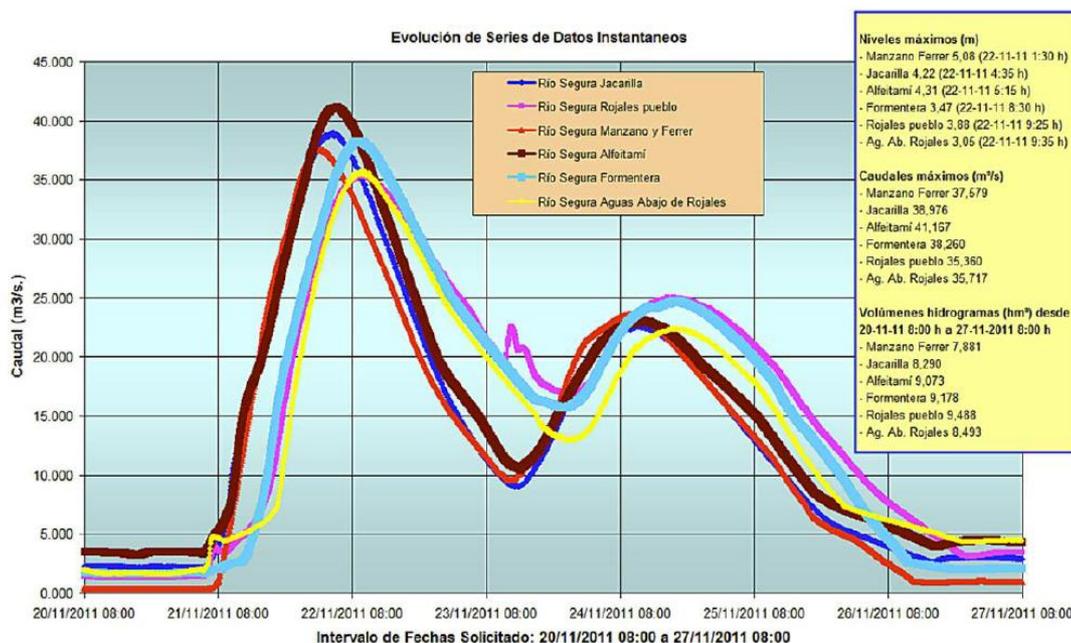


Figura 3.19 Hidrogramas de avenida. Comarca Vega Baja del Segura. Fuente: CHS

Los datos recogidos pertenecen a diversas estaciones de aforo dispuestas en la Comarca Vega Baja del Segura, aunque aquí únicamente se ha tenido en cuenta el hidrograma correspondiente a la estación de Jacarilla, pues esta ha sido la estación de aforo de la cual se ha extraído la serie de caudales temporales, mostrada en apartados anteriores.

Como se puede observar, todos los hidrogramas presentan dos picos, siendo el primero de ellos el más representativo y de mayor caudal máximo. El hecho de que se den dos puntas en el hidrograma se puede deber a la existencia de otros cauces que desembocan en el río Segura cerca de la zona del tramo estudiado. En este

caso, se trata de la denominada como Rambla Salada, la cual finaliza en el río Segura poco después de que éste pase por la ciudad de Orihuela. La existencia de este segundo caudal punta en el hidrograma será objeto de estudio posteriormente, para comprobar si los efectos que genera en la llanura de inundación presentan una importancia significativa. En la Figura 3.20 se muestra la red hidrográfica de la cuenca del Segura, y aparecen señaladas la zona del río Segura que se pretende analizar, cercano a la desembocadura, y la Rambla Salada, a fin de localizarla con respecto al tramo de estudio.

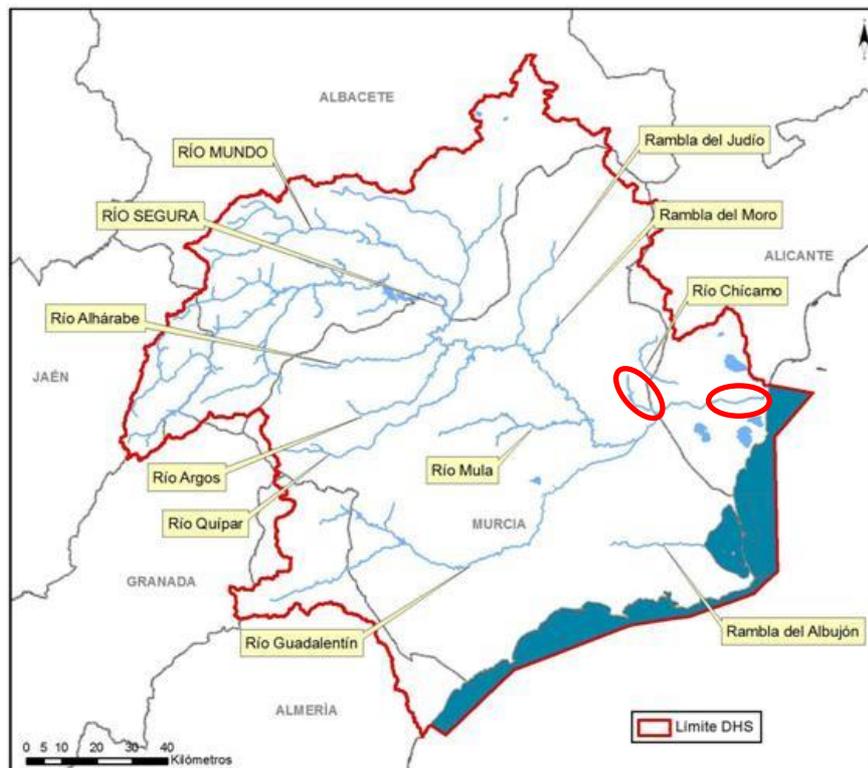


Figura 3.20 Ríos Demarcación Hidrográfica del Segura. Fuente: CHS

Tomando como base los hidrogramas mostrados anteriormente, se han establecido aquellos que posteriormente serán introducidos en las simulaciones de HEC-RAS.

Para ello, se ha considerado la hipótesis de que los hidrogramas de avenida mantienen las mismas proporciones de los hidrogramas característicos del curso bajo del Segura, por lo que los valores del caudal punta y de los caudales de la rama descendente siguen una relación específica entre sí. Por ejemplo, para el caso del hidrograma de Jacarilla el caudal punta oscila en torno a  $39 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el punto bajo de la rama descendente presenta un valor próximo a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que se puede establecer que el caudal máximo es del orden de 4 veces mayor que el caudal de la rama descendente. Esta proporción se mantendrá para determinar los caudales de los hidrogramas de avenida, simplemente reescalando con los caudales punta que se han obtenido del análisis estadístico.

Puesto que no se conoce con exactitud el tiempo base de los hidrogramas de esta zona, será necesario realizar un análisis de sensibilidad, simulando con diferentes tiempos base. La duración de las precipitaciones son un factor muy importante en la forma del hidrograma, por lo que se analizarán los casos para un tiempo base de 12, 24 y 48 horas, considerando que la variación de la lluvia no resulta más allá de las 12 horas de duración entre un caso y otro. El tiempo base de 48 horas se ha tenido en cuenta el tiempo base del hidrograma mostrado en la Figura 3.19.

Manteniendo la proporción entre los caudales del hidrograma característico y considerando los tiempos base anteriores, así como los caudales punta obtenidos anteriormente, se puede estimar el valor de un tercer punto del hidrograma, perteneciente a la rama descendente. El resto de los caudales del hidrograma no será preciso calcularlos, pues HEC-RAS se encarga de interpolar valores introduciendo previamente unos datos iniciales, que en este caso serán el caudal punta y el caudal de la rama descendente. Los hidrogramas de avenida se

mostrarán posteriormente, en el apartado de *Análisis de resultados*.

De esta forma, se introducen en HEC-RAS los hidrogramas de avenida, que serán la condición de contorno aguas arriba del tramo de estudio, pudiendo visualizar los efectos de la inundación tras realizar las simulaciones hidráulicas. Esto se detallará en el apartado de *Modelo de simulación hidráulica*.



# 4 MODELO DEL TERRENO MODIFICADO

En este apartado se explicará pormenorizadamente el proceso seguido para la modificación del modelo digital del terreno, mediante el uso de Autocad Civil 3D.

El terreno modificado servirá de base para las simulaciones hidráulicas que se realizarán por medio de HEC-RAS.

## 4.1 Proceso de modelado

Para llevar a cabo el retranqueo de las motas sobre el terreno natural ha sido necesario el uso de AutoCAD Civil 3D, el cual ha permitido la modificación del terreno original, para así posteriormente implantar las motas de inundación en su ubicación definitiva. El objetivo de este retranqueo pretende reestablecer el espacio natural del río Segura, de manera que los meandros eliminados en el pasado sean recuperados. Por esta razón, se ha decidido que las motas sean retranqueadas hasta los antiguos meandros, por lo que previamente ha sido necesario rebajar la superficie de la mota actual.

Para eliminar las motas actuales se han llevado a cabo diversas obras lineales, a fin de allanar el terreno original y restaurar la elevación natural que tendría sin la presencia de estas motas. Una vez hecho esto, se han implantado dispuesto las motas en su ubicación final. Ello quedará claramente explicado en los apartados sucesivos.

Con objeto de facilitar el proceso de eliminación y posterior retranqueo de motas, éstas han sido numeradas de manera ascendente y en el sentido que sigue el cauce hacia su desembocadura. A continuación, en la Figura 4.1 se muestra la enumeración de las motas, a fin de que resulte más claro el procedimiento que se ha seguido.



Figura 4.1 Enumeración de las motas

Antes de explicar el modelado mediante Civil 3D es necesario remarcar ciertos aspectos que se han considerado durante el mismo.

El tramo de río estudiado presenta un total de 14 motas, más una adicional que no ha podido ser modificada debido a la presencia de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), perteneciente al municipio de Algorfa, que impide el retranqueo de la mota correspondiente, ya que esto supondría que dicha instalación quedaría desprotegida ante episodios de inundación.



Figura 4.2 EDAR de Algorfa. Fuente: Google Earth

Asimismo, es necesario mencionar que en el terreno colindante al río se ubican diversas vías secundarias, por lo que, para retranquear las motas hacia su ubicación final, es decir, hacia los límites de los antiguos meandros del río, se ha tenido en cuenta la presencia de estas vías, de manera que las motas retranqueadas no quedasen por detrás de dichas vías, lo que facilitarían su inundación ante cualquier crecida del río.



Figura 4.3 Vías de tránsito adyacentes al río

Cabe destacar que, si bien el modelo finalmente obtenido pretende reflejar la realidad de la manera más próxima

posible, no deja de presentar ciertos errores en la topografía ya que, durante el tratamiento de los datos geográficos, ha podido producirse cierta pérdida de información, por lo que presentará ciertas diferencias con respecto al terreno original. No obstante, a pesar de ello y como se podrá comprobar posteriormente, el modelo puede suponer una aproximación muy exacta de la topografía del área de estudio.

## 4.2 Obtención de las curvas de nivel del terreno

El primer paso del modelado consiste en la obtención de las curvas de nivel del terreno, a partir de las cuales será posible crear la superficie del terreno.

Cabe destacar que para realizar esto, se ha utilizado el software Global Mapper, pues genera unas curvas de nivel de manera más exacta.

En primer lugar, se introducen los archivos *.asc* correspondientes a los Modelos Digitales del Terreno (MDT05) obtenidos del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para representar el terreno, éste requiere una proyección geográfica, que en este caso corresponde con la ETRS89/ UTM zona 30 (EPSG:25830).

Una vez hecho esto se introduce el intervalo entre curvas de nivel, el cual en este caso se ha considerado que sea de 1 metro para obtener un modelo más detallado del terreno. Posteriormente, se exportan a formato *.dwg* y se abre el correspondiente archivo en AutoCAD Civil 3D.

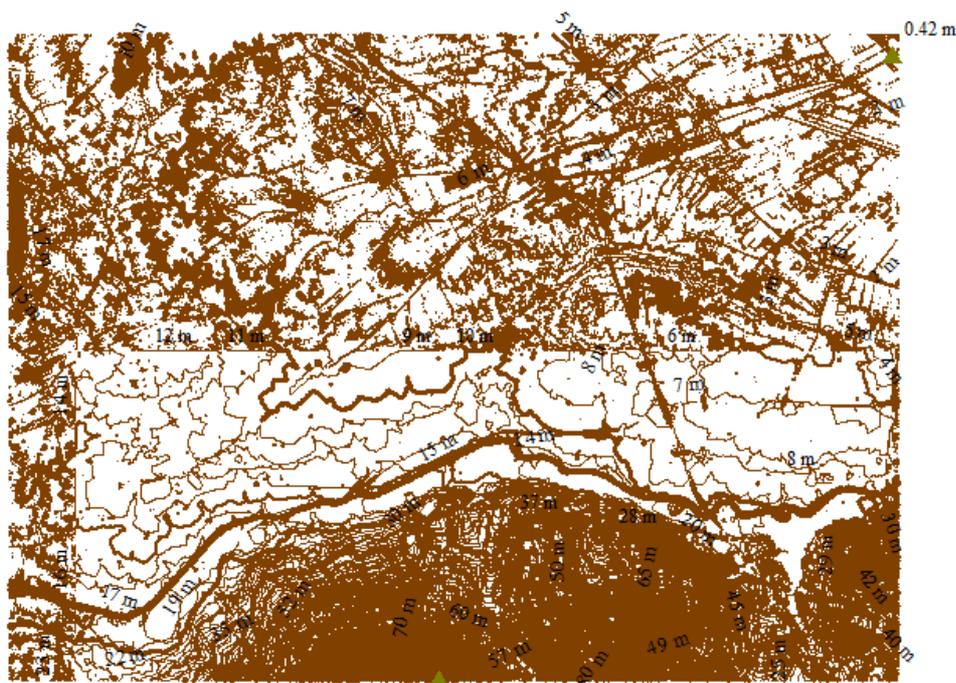


Figura 4.4 Curvas de nivel obtenidas mediante Global Mapper

## 4.3 Modificación del terreno original mediante AutoCAD Civil 3D

Tras la obtención de las curvas de nivel mostradas con anterioridad se introducen en AutoCAD Civil 3D para conseguir la superficie del terreno original, donde se encuentran las motas en su ubicación actual, previa a su implantación final tras el retranqueo.

### 4.3.1 Creación de la superficie base

Dentro de Civil 3D, existen diversos tipos de superficie: TIN, de rejilla, de volumen TIN, etc... Se ha optado por utilizar superficies TIN, pues presentan una mayor precisión para áreas de tamaño relativamente pequeño, como es este caso.

Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y construidas mediante la triangulación de un conjunto de vértices, los cuales están conectados por una serie de aristas para formar una red de triángulos. De esta forma, las aristas forman polígonos triangulares contiguos y no superpuestos, pudiendo capturar la posición de elementos lineales, como pudieran ser las cadenas montañosas o los cauces.

En primer lugar, para conformar la superficie del terreno original es necesario crear una superficie TIN. Esta primera superficie ha sido denominada como Terreno Original, y para su generación basta con añadir las curvas de nivel extraídas de Global Mapper.

Finalmente, tras añadir las curvas de nivel, la superficie *Terreno original* quedó constituida. A continuación, en las Figuras 4.5 y 4.6 se muestra el modelo del terreno obtenido, donde se puede observar con total claridad la forma del cauce.

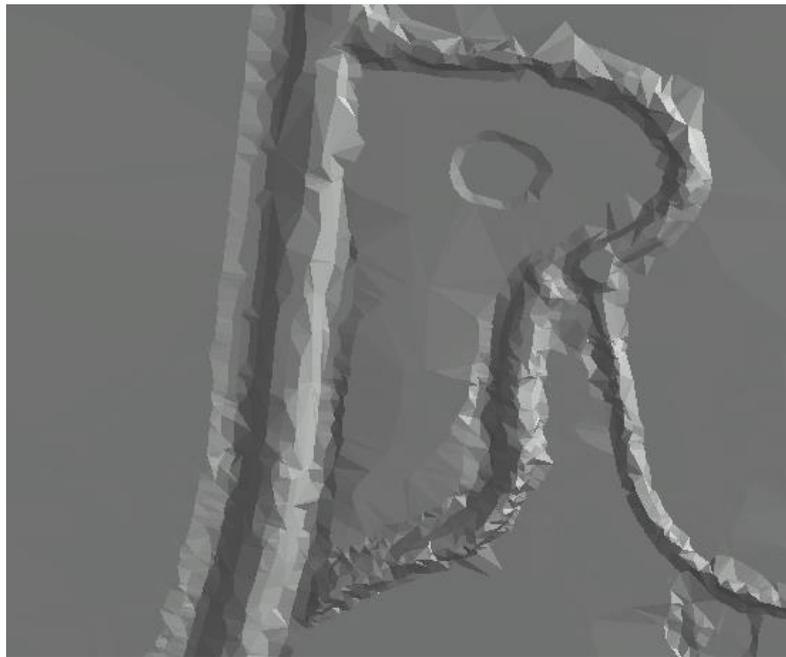


Figura 4.5 Modelo del terreno original



Figura 4.6 Modelo del terreno original

De esta forma, se puede comprobar la precisión con la que la superficie obtenida recrea a la real, a pesar de que, como ya se ha mencionado, se puedan apreciar ciertos errores, derivados del mismo procesamiento de datos

geográficos.

### 4.3.2 Eliminación de las motas originales

Tras establecer la superficie original, la siguiente tarea consiste en eliminar las motas actuales para posteriormente disponerlas en su ubicación final. Para que el proceso resulte más claro se ha impuesto una enumeración a las motas, como se muestra en el apartado 4.1.

La eliminación de estas motas se ha llevado a cabo mediante la implantación de obras lineales, similares a carreteras, para así conseguir allanar el terreno elevado de las motas. Es preciso destacar que la modificación de la superficie se ha realizado de manera que el terreno adyacente a las motas quedase lo menos alterado posible, para así obtener un terreno modificado lo más natural posible y similar al terreno original. A continuación, se detallará el procedimiento seguido para ello.

El primer paso consiste en disponer una alineación en el terreno correspondiente a la mota actual, para lo cual basta con distinguir aquella zona del terreno más elevada. A partir de dicha alineación se crea un perfil longitudinal de dicha alineación con respecto a la superficie original, para así proporcionar una idea de la elevación del terreno a lo largo del eje de la mota. En la mayoría de los casos, la elevación del terreno es completamente horizontal, a excepción de pequeños tramos con alguna depresión en el mismo.



Figura 4.7 Perfil longitudinal. Mota 2

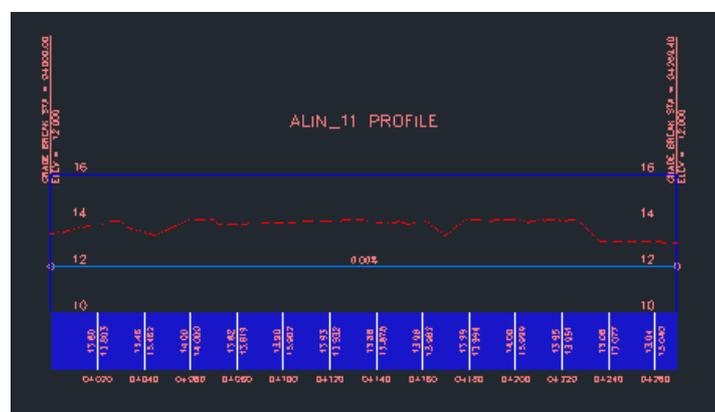


Figura 4.8 Perfil longitudinal. Mota 11

Con objeto de presentar una idea de la elevación relativa de la mota con respecto al terreno colindante a ella se han realizado perfiles transversales del mismo, de manera que la profundidad de las obras lineales para cada

caso sea la adecuada.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se observa que las rasantes de las obras lineales para eliminar las motas originales han sido dispuestas por debajo del terreno ya que, posteriormente, cuando la superficie del terreno original y la superficie de la obra lineal se unan, el terreno por encima de la rasante quede eliminado, cumpliendo por tanto el objetivo que se estaba buscando.

Cuando la rasante queda implantada es necesario imponer los subensamblajes de las obras lineales, para definir la geometría de la sección de dichas obras. Cada subensamblaje incluye una sección transversal definida, la cual puede visualizarse a través de la paleta de herramientas y los catálogos de herramientas que ofrece AutoCAD Civil 3D, estableciendo el subensamblaje que más se adecúe.

Como ya se ha comentado, las obras lineales realizadas se asemejan a la superficie de carreteras, de manera que se consiga con ellas que el terreno más elevado, correspondiente a la superficie de las motas, quede allanado una vez se unan la superficie de la carretera al terreno original. Para ello, lo más importante es establecer una superficie objetivo a la cual la obra lineal deberá adaptarse, por lo que se dispuso un tipo de subensamblaje denominado como carril de transición básico. Este subensamblaje permite una mejor adaptación de la vía con el terreno, lo que posteriormente conlleva una mejor triangulación de la superficie y reduciendo así posibles errores en la misma.

De esta forma, tras seleccionar el tipo de subensamblaje más adecuado se pueden realizar las obras lineales. El ancho y pendiente de los subensamblajes han sido modificados conforme al terreno en torno a la mota que se pretende eliminar.

El procedimiento general para decidir los parámetros de estos objetos es sencillo, simplemente mediante perfiles transversales se visualiza la elevación del terreno. Con ello, una vez establecida la rasante de la obra lineal, se impone un ancho específico de cada subensamblaje. Asimismo, la pendiente de los subensamblajes ha sido nula en la mayor parte de los casos, salvo en aquellos meandros en los que la elevación era más pronunciada y, por tanto, se les ha impuesto una pendiente pequeña, del 0.1%, a fin de garantizar una mejor transición del terreno modificado con la mota eliminada y así evitar cambios bruscos en la superficie del terreno. En la Figura 4.9 se muestra un ejemplo de la obra lineal implantada.

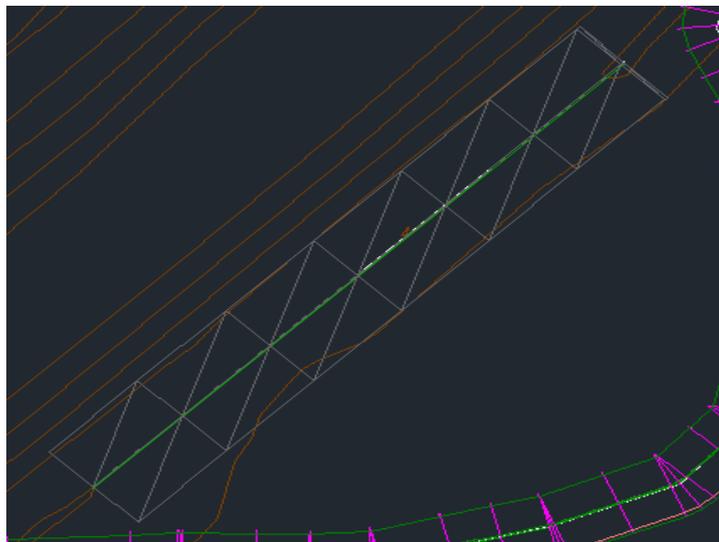


Figura 4.9 Obra lineal. Mota 4

De entre todas las obras lineales realizadas algunas de ellas disponen de más de un subensamblaje con diferente ancho, pues de esta forma se evita una modificación excesiva del terreno. A fin de clarificar esto, se muestran a continuación algunas de las obras lineales con ancho variable. Así se consigue una mejor adaptación con el terreno base.

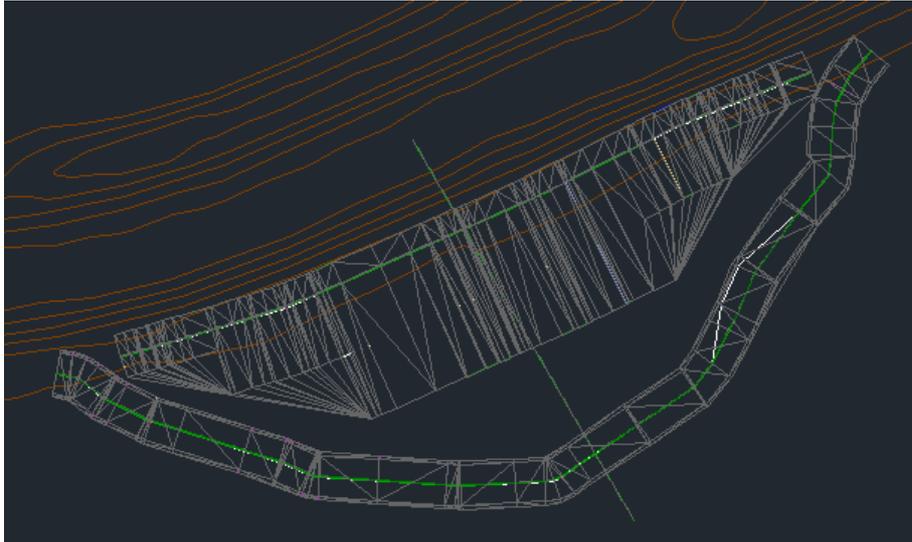


Figura 4.10 Obra lineal, anchura variable. Mota 6

Una vez determinados los subensamblajes se puede realizar la obra lineal. Se ha considerado denominar a las motas eliminadas como *Motas\_originales*, para distinguirlas de las motas posteriormente retranqueadas.

Para crear la obra lineal, se han de añadir las alineaciones, que serán los ejes principales de las mismas, y los subensamblajes que la conformen. Por último, se indica la superficie objetivo sobre la cual se establecerá la obra lineal, la cual para la primera mota será el terreno original, formado a partir de las curvas de nivel.

El siguiente paso sería definir el resto de los parámetros, lo cual se encuentra dentro de las propiedades de la obra lineal.

En la Figura 4.11, se muestran los parámetros introducidos, así como la longitud total de la alineación correspondiente, definida por los puntos kilométricos (P.K) inicial y final. Es aquí donde se deben disponer, para aquellas motas que lo precisen, los distintos subensamblajes, añadiendo una región antes o después, según sea necesario, y definiendo el intervalo de longitud en los que se deberá aplicar un determinado subensamblaje. A continuación, se muestra un ejemplo de esto, correspondiente a la mota 6.

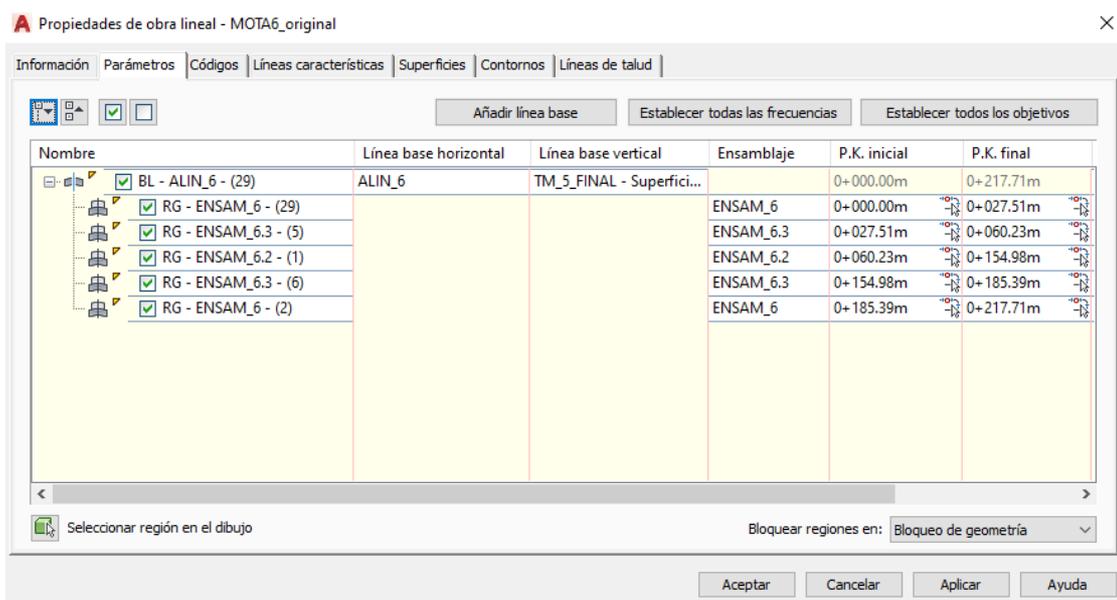


Figura 4.11 Propiedades obra lineal. Mota 6 (original)

Además de esto, es preciso asignar los objetivos de anchura o desfase y los objetivos de talud y terraplén de las obras lineales. Para ello, se sirve del módulo *Establecer todos los objetivos*, que aparece en la figura anterior. Con respecto a la primera, los objetivos que se han impuesto será la alineación correspondiente a la misma mota, mientras que la superficie objetivos de los taludes y elevación de la obra lineal deberá ser el propio terreno. Se tomará como ejemplo la mota 1 eliminada, aunque esto será aplicable al resto de ellas.

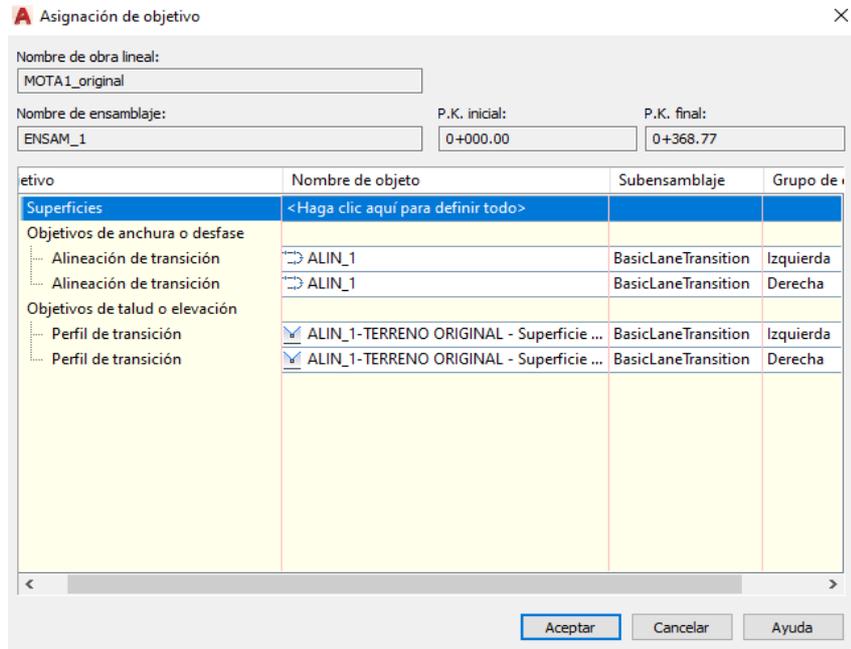


Figura 4.12 Asignación de objetivos de la obra lineal

Por último, se debe generar la superficie de la obra lineal, añadiendo el datum, relacionado con el movimiento de tierras que ésta implica. Una vez hecho esto, se creará la superficie de la obra lineal. En el apartado *Análisis de resultados* se expondrán los volúmenes de desmonte y terraplén correspondientes a cada una de las motas.

Para finalizar con el proceso de eliminación de motas es necesario unir ambas superficies. El objetivo es obtener una única superficie donde estén presentes todas las motas retranqueadas, por lo que el procedimiento para ello ha consistido en crear una nueva superficie en la que se unan la superficie de la obra lineal con el terreno original. La superficie creada para este fin se ha denominado TM\_Nº (Terreno Modificado\_nº de mota). Cuando la superficie se pega a la existente, el comando ajusta el área solapada a la elevación y la curva de nivel de la superficie base. De esta forma, la mota original queda eliminada y, por tanto, el terreno, modificado.

A continuación, se muestra un perfil transversal del terreno original, previo a su modificación, y el perfil del terreno una vez se ha implantado la obra lineal, para dar una idea de cómo quedaría finalmente la superficie del terreno.



Figura 4.13 Comparación de terreno original (izquierda) con terreno modificado (derecha). Mota 1

Como se puede comprobar, la mota, con una elevación inicial de 19 metros, ha quedado eliminada, adquiriendo toda la superficie una forma más o menos llana, aunque el terreno más allá de la superficie de la obra lineal no se ha visto modificado, cumpliendo con el objetivo que se buscaba. El procedimiento que se ha explicado es análogo para todas las motas del tramo de estudio.

Tras modificar las motas originales, se deberán trasladar hasta su ubicación final, lo cual se explica en el siguiente apartado.

### 4.3.3 Retranqueo de las motas

Como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, el objetivo que se pretende realizar es el retranqueo de las motas de protección contra inundaciones dispuestas en las márgenes del río Segura.

Por ello, una vez eliminadas las motas originales, el siguiente paso será retranquear dichas motas desde su posición inicial hasta los espacios que en décadas pasadas pertenecían a los meandros del propio cauce. Esta decisión se ha tomado con el fin de recuperar el espacio natural del antiguo río, el cual fue finalmente encauzado, lo que ha tenido ciertos efectos negativos durante los episodios de avenida.

Antes de realizar el retranqueo ha sido preciso llevar a cabo un análisis del terreno para determinar el área que finalmente será ocupada por las motas, ya que se han implantado vías en los terrenos adyacentes al cauce, lo que implica que las motas no podrán ser trasladadas por detrás de dichas vías. Asimismo, existe una estación depuradora de aguas residuales ubicada en el espacio de un antiguo meandro, lo cual impide que en este caso se lleve a cabo la actuación, pues la instalación anterior quedaría directamente expuesta ante las crecidas del río.

Para lograr una mayor exactitud en la implantación de las nuevas motas, se ha servido de mapas en línea presentes en AutoCAD Civil 3D, de manera que se visualice el terreno y, así se pueda realizar el retranqueo sobre las áreas que ocuparían realmente. Además de esto, las curvas de nivel obtenidas mediante Global Mapper han ayudado a esta tarea, ya que, de manera más o menos aproximada, queda definida la forma de los antiguos meandros, tal como se muestra en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16

Posteriormente se mostrará la superficie finalmente obtenida, la cual se corresponde con el terreno original, pero con las motas reubicadas en su posición final. Al igual que se realizó en el apartado anterior, se explicará a continuación el procedimiento seguido en la implantación de las motas en su nueva ubicación. La enumeración de las motas es la misma que la representada anteriormente en la Figura 4.1.

Se parte del terreno modificado con las motas originales ya eliminadas.

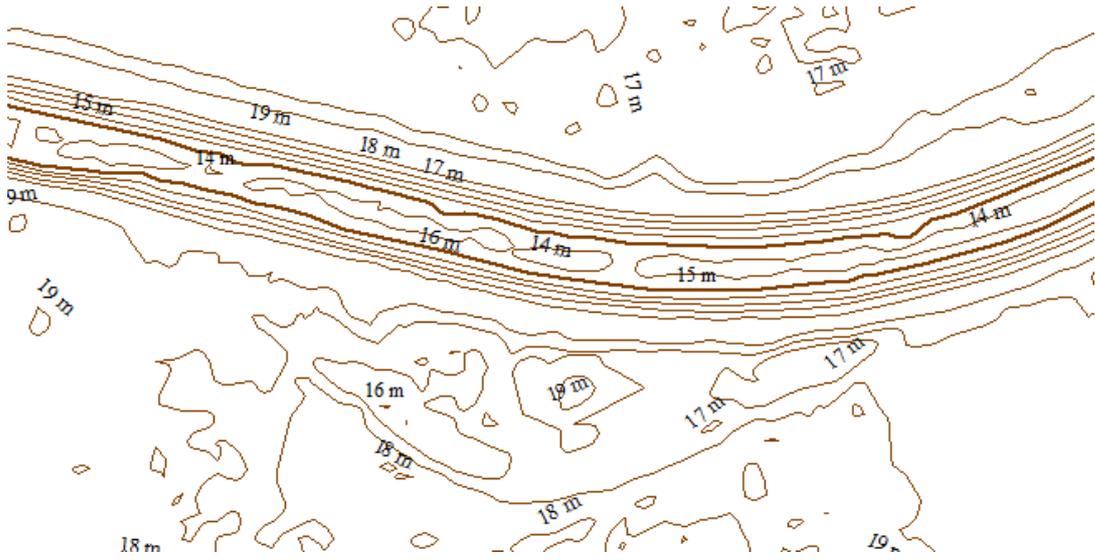


Figura 4.14 Antiguo meandro. Mota 1



Figura 4.15 Antiguos meandros. Motas 2 y 3



Figura 4.16 Antiguo meandro. Mota 5

Siguiendo el contorno de las curvas de nivel mostradas es posible conocer la forma aproximada de los meandros y, por consiguiente, la de las motas retranqueadas.

Tal como ocurría a la hora de eliminar las motas, es necesario implantar una obra lineal, aunque en este caso presentará un ensamblaje diferente, con una forma trapezoidal, similar a la de las motas originales.

Por tanto, el primer paso para realizar las nuevas motas es establecer las alineaciones de las obras lineales. A partir de estas alineaciones se crean los perfiles de superficie, a fin de establecer las rasantes a una profundidad adecuada relativa a la superficie del terreno. Puesto que las obras lineales tendrán una elevación en torno a 1.5-2 metros por encima del terreno, las rasantes se han impuesto a una profundidad aproximada de 1 metro por debajo de éste. De esta forma, se asegura la correcta adaptación de las motas cuando se unan con la superficie base. A continuación, se muestran algunos de los perfiles longitudinales más característicos, en los que se puede observar lo explicado anteriormente.

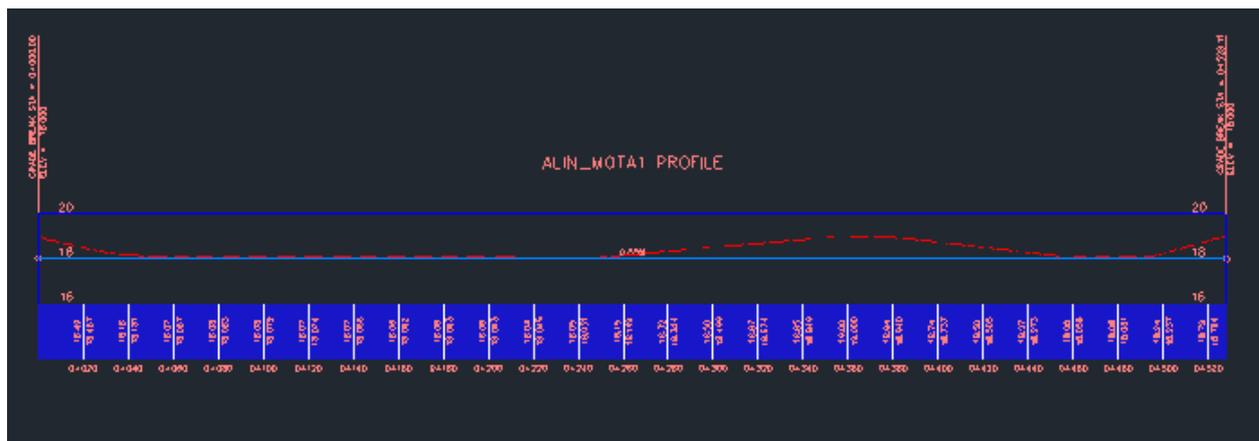


Figura 4.17 Perfil de superficie y rasante. Mota 1

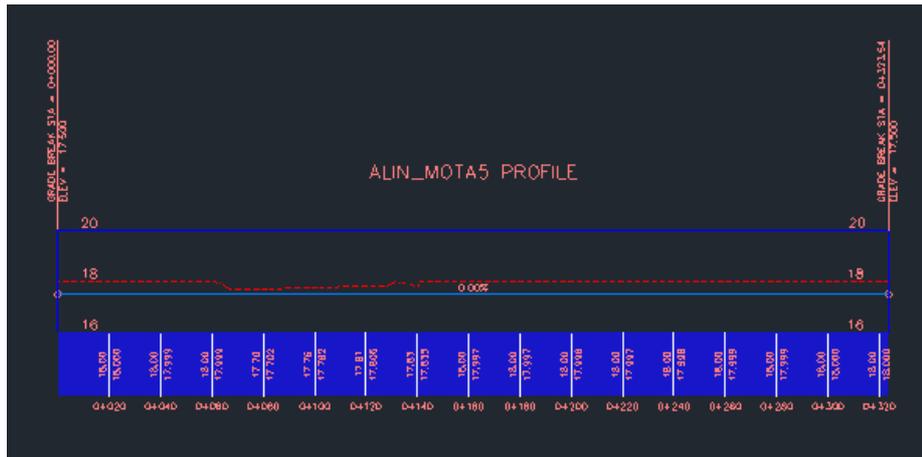


Figura 4.18 Perfil de superficie y rasante. Mota 5

No obstante, cabe remarcar que no todos los perfiles presentan las mismas condiciones, pues existen algunos casos en los que el terreno presenta una depresión considerable. Esta situación es fácilmente resuelta cuando se establece la nueva mota y se unen ambas superficies, pues Civil 3D se encarga de rellenar el terreno de manera automática. Tal es el caso de la mota 4, mostrado en la Figura 4.19.

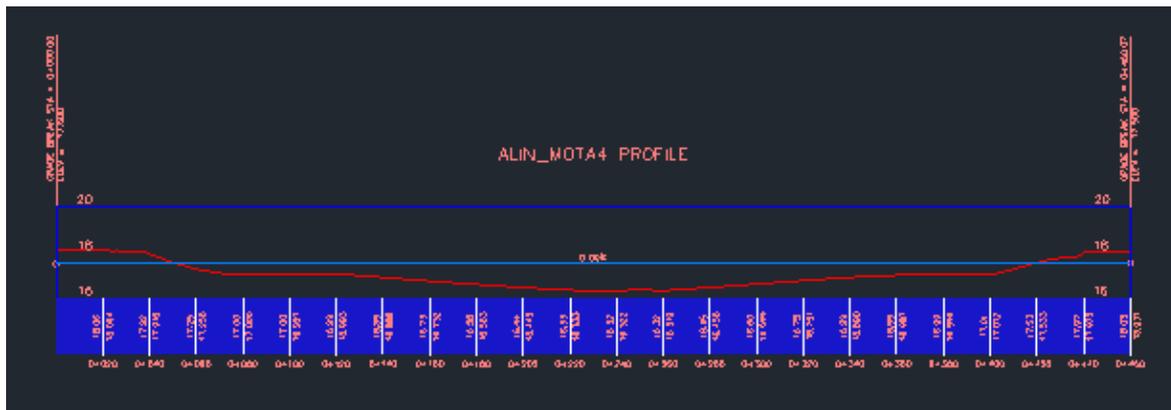


Figura 4.19 Perfil de superficie y rasante. Mota 4

Tras establecer las alineaciones se crean las obras lineales. En este caso, se ha impuesto un tipo de subensamblaje que se asemeje a la sección de las motas, es decir, una superficie elevada con su parte superior plana y con un determinado talud. En AutoCAD Civil 3D existe un subensamblaje denominado *Barrera acústica simple*, el cual se ajusta perfectamente a las características buscadas.

Para este subensamblaje es necesario introducir, los parámetros principales que es necesario introducir son la anchura superior, la elevación y los taludes de la obra lineal.

El ancho de la mota se ha decidido teniendo en cuenta las dimensiones de las motas eliminadas, a fin de reproducir las medidas originales. De esta forma, se ha medido directamente en Civil 3D el ancho de las áreas más elevadas del terreno, correspondientes con las motas, y se ha considerado el mismo valor en los parámetros de la nueva estructura. Dicho valor oscila en torno a 10-12 metros, según cada caso. Al contrario de lo que se realizó con las motas originales, el ancho de las obras lineales se ha considerado constante a lo largo de la misma.

Por otra parte, la elevación sí se ha visto algo alterada con respecto al terreno original, ya que las nuevas motas presentan una elevación de entre 1.5 y 2 metros por encima de la superficie. Esta altura se ha establecido en base a las cotas que presentaban las antiguas motas en las márgenes del río, de manera que el terreno modificado no presente una variación muy marcada con respecto a la situación original.

Asimismo, el talud de la obra se ha dejado el que viene por defecto en AutoCAD, 0.67:1, ya que se asimila al talud original de las motas y produce una transición adecuada con el terreno base.

Por tanto, atendiendo a lo expuesto anteriormente, las dimensiones de las motas retranqueadas se han establecido de manera que reproduzcan las de las motas previamente eliminadas.

Definidos los parámetros de la obra lineal se proceder a la creación de la misma, de forma análoga a como se realizó en la eliminación de las motas originales. La superficie objetivo de las obras será el terreno modificado obtenido de la eliminación de las motas, explicado en el apartado anterior.

De nuevo, para unir la obra lineal con el terreno, es preciso añadir el datum de la propia obra, para crear la superficie de la mota retranqueada. El procedimiento descrito es el mismo para todas las motas.

Por último, recordando el proceso de las motas originales, se han de unir las motas retranqueadas con el terreno base, de manera que se obtenga un modelo del terreno con las motas retranqueadas.

A continuación, se muestra algunos de los resultados obtenidos, pudiéndose diferenciar con claridad las motas retranqueadas ocupando los antiguos meandros, así como su unión con la superficie base.

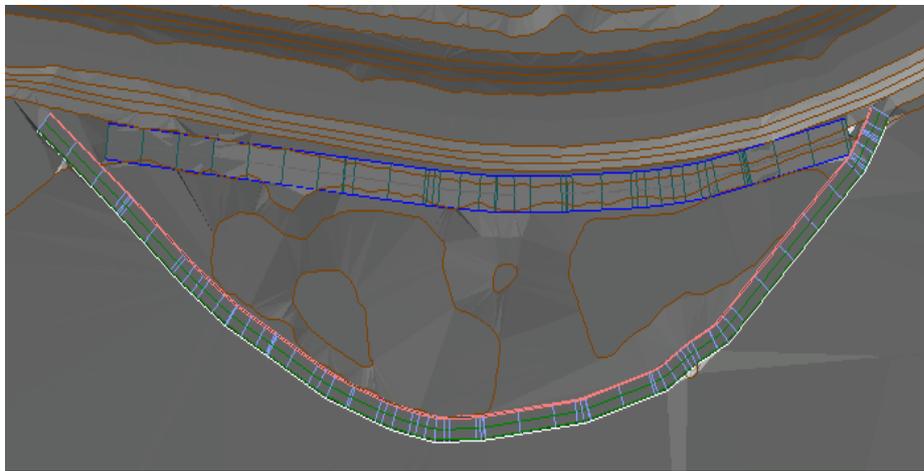


Figura 4.20 Vista en planta. Mota 1 retranqueada

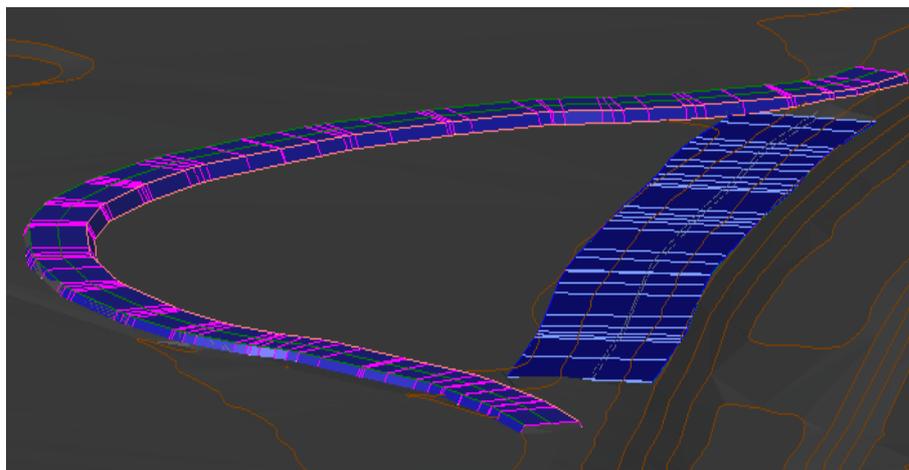


Figura 4.21 Mota 4 retranqueada

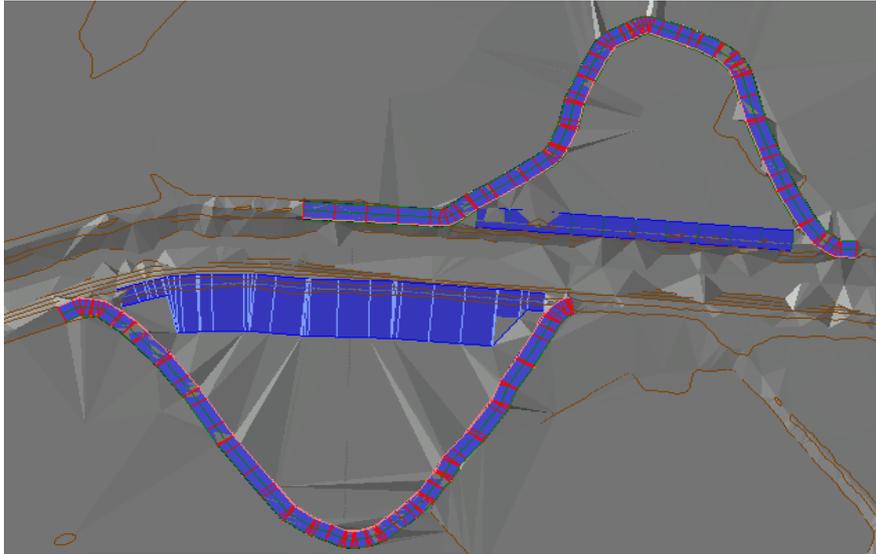


Figura 4.22 Vista en planta. Motas 12 y 13 reancladas

#### 4.3.4 Errores de triangulación en la superficie final

Resumiendo lo anteriormente descrito, finalmente se ha obtenido una superficie del terreno modificado, en la que las motas originales han sido trasladadas desde su posición inicial, eliminando por tanto la forma encauzada que presentaba el río en el tramo de estudio, y recuperando parte del espacio natural del río.

Sin embargo, durante los procesos descritos en los apartados anteriores, cuando se han unido las superficies de las obras lineales con la superficie base, en algunos casos se han originado ciertos espacios vacíos o huecos dentro en dicha superficie, a consecuencia de una triangulación incorrecta por parte del propio software. En la Figura 4.23 se muestra un ejemplo de los errores de triangulación que se han cometido.

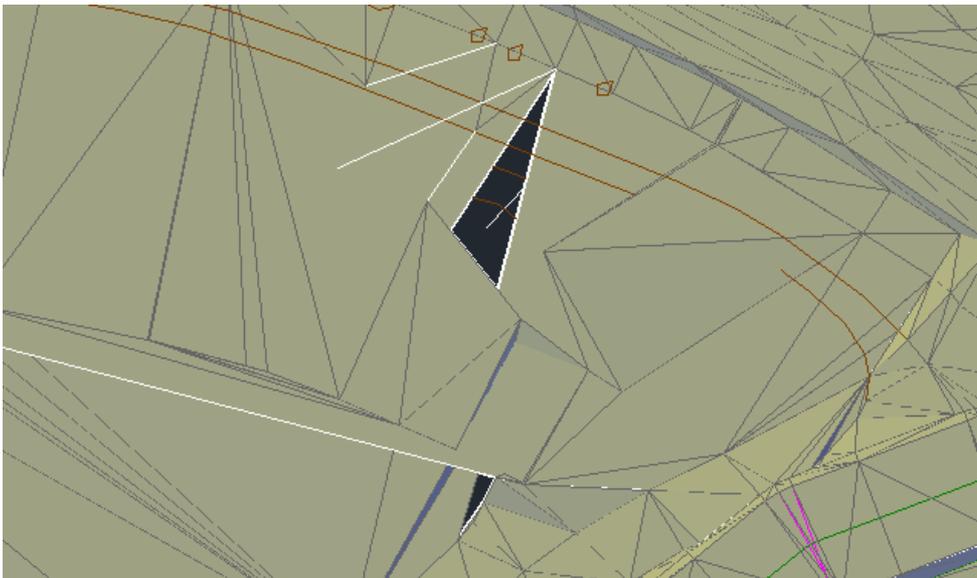


Figura 4.23 Error de triangulación. Mota 11

Esta situación puede desembocar que, posteriormente, cuando la superficie se exporte a HEC-RAS, se originen problemas durante las simulaciones, ya que el flujo encontraría espacios que no pertenecen al terreno insertado, pudiendo dar lugar a errores en los resultados obtenidos.

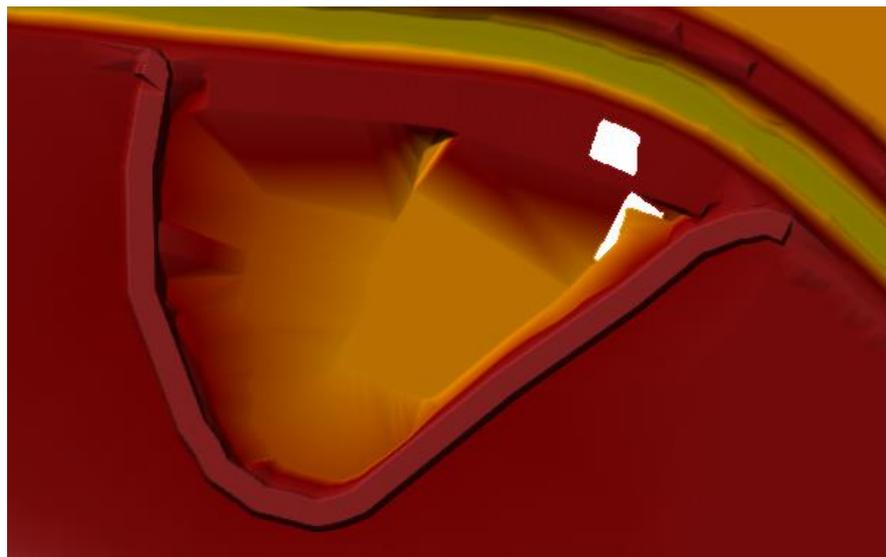


Figura 4.24 Espacio vacío en el terreno, mota 11. HEC-RAS

Por esta razón, estos fallos han de ser corregidos, para lo que Civil 3D presenta una serie de herramientas para solucionarlo.

En primer lugar, se encuentra la herramienta *Añadir línea*. Introduciendo nuevas líneas en la superficie existente se consigue eliminar los huecos de ésta pueden eliminarse, ya que Civil 3D realiza una regeneración automática del terreno.

Además de la anterior, se encuentra la herramienta *Suprimir línea*, con la que se consigue eliminar las aristas de los triángulos y se crea un borde interior a continuación de las líneas TIN adyacentes, o bien se modifica el borde exterior para seguir las nuevas líneas TIN. Posteriormente, utilizando de nuevo *Añadir línea*, ha resultado en la eliminación de espacios vacíos, resolviendo el problema en cuestión.

Además de éstas, existe otra herramienta para editar la superficie, *Intercambiar arista*, presente en el mismo menú que las anteriores. Es preciso mencionar que su uso no resuelve el problema de triangulación mencionado, aunque sí permite ajustarla de manera más correcta, como ha sucedido en la unión entre las motas y el terreno.

Por último, existe la herramienta *Añadir línea de rotura*. Las líneas de rotura resultan imprescindibles para generar un modelo de superficie preciso, pues permiten que la triangulación de la superficie se produzca a lo largo de estas líneas realizando una interpolación de los datos.

A través de las herramientas anteriores, se ha conseguido eliminar los errores presentes en la superficie del terreno modificado y, por tanto, no derivará en posibles problemas durante las simulaciones hidráulicas, por lo que el modelo obtenido puede ser exportado para ser introducido en HEC-RAS.

#### 4.3.5 Exportación del terreno modificado desde Civil 3D a HEC-RAS

Tras retranquear todas las motas presentes en el tramo, se puede exportar la superficie del terreno modificado a un archivo GeoTIFF (.tif), para posteriormente ser introducido en HEC-RAS.

Para realizar la exportación de la superficie, se hace clic en la ficha *Superficie* y, dentro del grupo *Herramientas de superficie*, se encuentra la pestaña *Exportar a DEM*. Civil 3D establece dos tipos de formato para exportar: tipo USGS (.dem) o GeoTIFF (.tif). En este caso, se ha decidido exportar a formato GeoTIFF, ya que con el formato USGS la superficie perdía más información, pues en ciertas partes no representaba con exactitud las elevaciones intermedias, mostrando principalmente elevaciones de valores enteros.

Asimismo, es necesario especificar el sistema de coordenadas de la superficie exportada, el cual resulta ser la proyección ETRS89/ UTM zona 30 N.

Otro aspecto importante en la exportación es el intervalo de rejilla. Se ha considerado un valor de 0.25, para conseguir una mayor resolución de la superficie del terreno.

Por último, es preciso especificar cómo se determinan las elevaciones del archivo exportado. Civil 3D establece

dos criterios:

- Muestrear superficie en punto de rejilla. Esta forma asegura que para cada punto a lo largo de un perfil DEM, la elevación se muestra a partir de la superficie que se ha seleccionado.
- Media. Asegura que, para cada punto, el valor de su elevación se corresponde con la elevación media de una región del tamaño de una celda de rejilla centrada en dicho punto.

Se ha optado por el primer criterio, pues de esta forma la exportación puede resultar más exacta, perdiéndose menor cantidad de información.

Una vez se han introducido las condiciones de exportación se procede a la misma, obteniendo finalmente el archivo *.tif*, siendo éste el terreno base de la situación futura en HEC-RAS

# 5 MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

---

Los caudales punta de los hidrogramas obtenidos anteriormente suponen uno de los puntos de partida en la simulación hidráulica mediante el software HEC-RAS, ya que introduciendo dichos hidrogramas se obtendrán los resultados correspondientes a los episodios de inundación que se pretende simular.

En este apartado se detallará el proceso que se ha seguido para llevar a cabo la simulación hidráulica. Cabe destacar que será necesario analizar dos situaciones distintas dentro del área de estudio:

- Situación 1: correspondiente con la situación actual, en la cual el terreno aún no ha sido modificado, por lo que las motas no se han visto trasladadas hacia su emplazamiento final.
- Situación 2: correspondiente con la situación futura, donde el terreno ha sufrido las modificaciones oportunas para poder llevar a cabo el retranqueo de las motas.

La importancia de plantear la simulación hidráulica para ambos escenarios radica en comparar los resultados obtenidos para cada caso y, de esta forma, analizar la influencia que las motas de protección supondrían durante episodios de avenidas en los terrenos colindantes al cauce.

## 5.1 Software HEC-RAS

Como se ha mencionado, para realizar las simulaciones hidráulicas se ha utilizado el software HEC-RAS (versión 5.07). Éste permite modelar el comportamiento del flujo a lo largo de un determinado tramo de estudio. Las últimas versiones de este software han desarrollado la capacidad de realizar simulaciones hidrodinámicas bidimensionales. La capacidad de modelado en dos dimensiones presenta un sistema de solución de volumen finito, el cual se consigue mediante la implantación de elementos de área de flujo 2D, generando un área de almacenamiento del flujo (*storage area*), con un determinado tamaño de celda. Se establecerá, por tanto, una malla computacional, a la cual se le impondrán unas determinadas condiciones de contorno.

Por tanto, a fin de esclarecer el procedimiento que es preciso realizar para generar la simulación hidráulica, se expondrá, a modo de resumen, los distintos pasos y parámetros que se deben introducir en el modelo, para posteriormente, en los siguientes apartados, describir estos aspectos con mayor detalle.

1. Introducción del modelo digital de elevaciones (MDE)
2. Georreferenciación del MDE
3. Definición del área de estudio: polígono y tamaño de celda
4. Definición de la capa de rugosidad (capa de Manning)
5. Imponer las condiciones de contorno
6. Establecer las opciones de la simulación hidráulica
7. Realizar la simulación para cada escenario considerado

En la Figura 5.1 se muestra la interfaz de HEC-RAS. Como se puede observar, existen distintos módulos en los que se pueden desarrollar diferentes aspectos de la simulación, tales como imponer las condiciones de contorno, geometría...

Cada uno de estos módulos, así como los parámetros introducidos en cada uno de ellos serán descritos en los siguientes apartados.

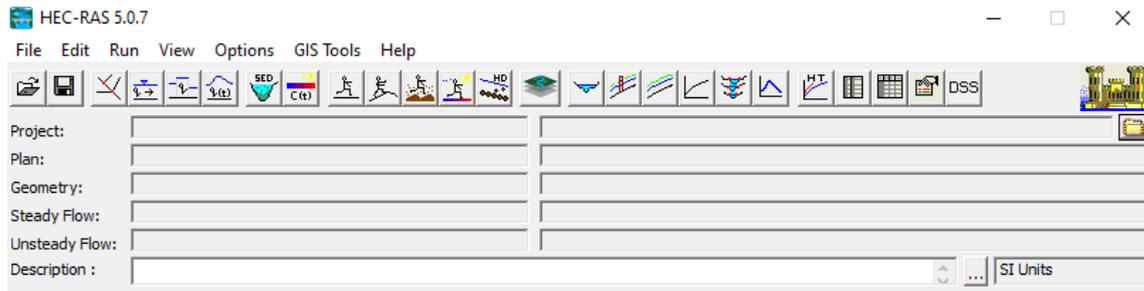


Figura 5.1 Interfaz HEC-RAS (5.0.7)

En este caso únicamente se han utilizado cuatro de los módulos que existen, que son los siguientes:

- *RAS Mapper*. Herramienta que permite representar los resultados de una simulación sobre el terreno insertado previamente.
- *Geometric Data*. En este módulo se crea el área 2D, compuesta por celdas de un determinado tamaño, y también se añaden las líneas de las condiciones de contorno a dicha área.
- *Unsteady Flow Data*. Sirve para establecer los parámetros del flujo en las condiciones de contorno impuestas.
- *Unsteady Flow Simulation*. Aquí se establecen las condiciones de análisis de la simulación hidráulica.

### 5.1.1 Modelo Digital de Elevaciones

En primer lugar, para realizar la simulación hidráulica es necesario disponer un terreno base sobre el cual llevarla a cabo. Éste deberá ser lo más detallado y preciso posible para crear un modelo hidráulico que también lo sea. Puesto que se considerarán dos situaciones distintas, es decir, la actual, con las motas en su ubicación inicial, y la futura, en la cual las motas han sido retranqueadas, existirán dos modelos de terreno base.

Previo a la inserción del terreno en HEC-RAS es necesario establecer la proyección geográfica del terreno. En este caso, se ha considerado la ETRS89/ UTM zona 30N para que coincida con la proyección que establece el IGN para los Modelos Digital de Elevaciones para esta zona de estudio.

Asimismo, es preciso cambiar las unidades al Sistema Internacional (metros) antes de continuar con el modelado, pues en caso contrario los resultados de la simulación no presentarían las unidades adecuadas.

Para obtener el modelo de terreno de la situación inicial se ha acudido al Instituto Geográfico Nacional y se han seleccionado, dentro del Centro de Descargas, los Modelos Digitales de Elevación correspondientes a las parcelas que conforman el área de estudio que se está considerando. A fin de obtener una superficie base más detallada, el tamaño de pixel es de 5 metros por 5 metros (MDE05).

HEC-RAS puede presentar ciertos problemas en caso de que el terreno base sea de un tamaño demasiado grande, además de que aquellas zonas muy alejadas del cauce no presentan relevancia alguna, ya que no se verán afectadas por los efectos de las inundaciones. Por esta razón, se ha decidido recortar el terreno, de manera que únicamente se muestre el área de interés.

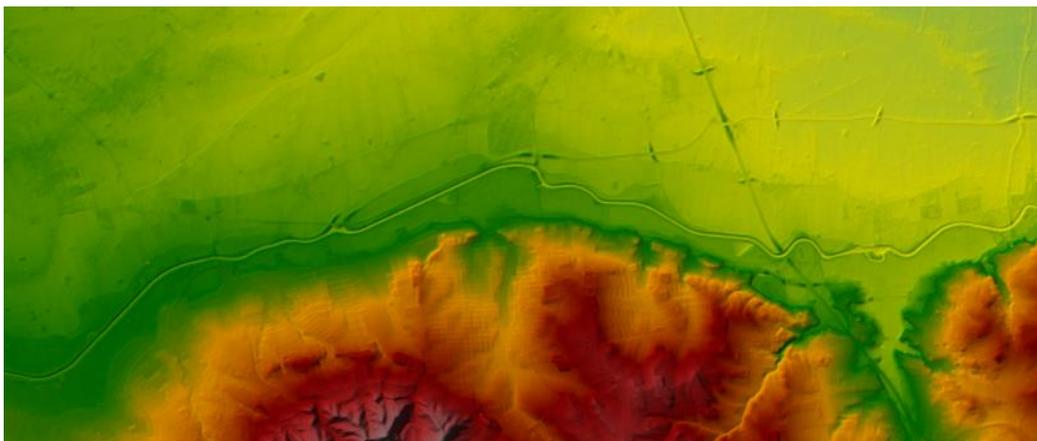


Figura 5.2 Superficie del terreno original

Por otra parte, respecto al terreno de la situación futura, éste ha sido obtenido por medio del tratamiento de la superficie original, en la cual primero se han eliminado las motas y posteriormente se han retranqueado, obteniendo así el terreno base para la simulación futura. Esto se ha explicado anteriormente en el capítulo dedicado a AutoCAD Civil 3D. En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran algunos detalles del terreno modificado, en el que se puede comprobar la superficie de las motas retranqueadas.

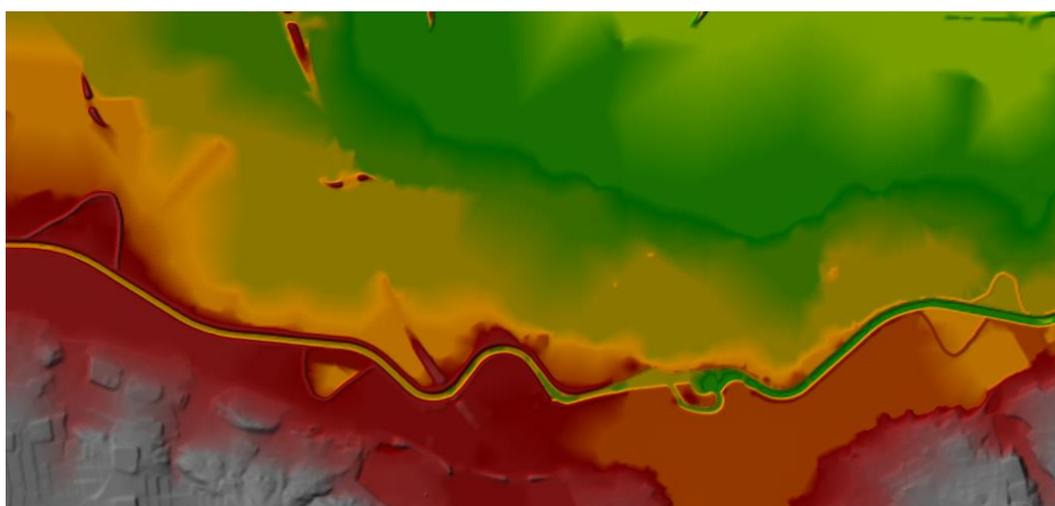


Figura 5.3 Detalles terreno modificado

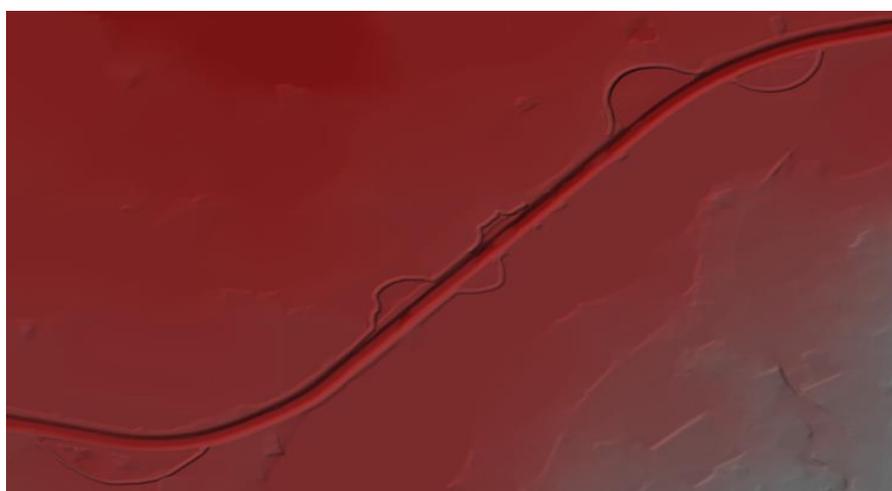


Figura 5.4 Detalles terreno modificado

Finalmente, tras obtener los modelos de terreno se introducen en HEC-RAS. De esta forma, se establecen los terrenos base para cada situación, por lo que se puede comenzar a introducir el resto de los parámetros para llevar a cabo la simulación hidráulica.

Es preciso aclarar que los siguientes apartados son análogos para ambos terrenos, por lo que los parámetros que se introducirán son los mismos para los dos escenarios. En caso de existir algún aspecto específico para una situación, se comentará cuando corresponda.

El siguiente paso será introducir la geometría de las mallas 2D, que supondrán el dominio sobre el que se realizarán los cálculos de las simulaciones hidráulicas.

### 5.1.2 Definición de la malla computacional 2D

Como se mencionó anteriormente, HEC-RAS utiliza un modelo de solución de volumen finito, el cual permite el desarrollo de una malla computacional, con un determinado tamaño de celda especificado por el propio usuario. Esta malla representará los límites del área 2D para el flujo que se introducirá más adelante.

Para generar dicha malla, se utiliza el módulo *Geometric Data*, dentro del cual aparecerá el terreno anteriormente introducido en RAS Mapper.

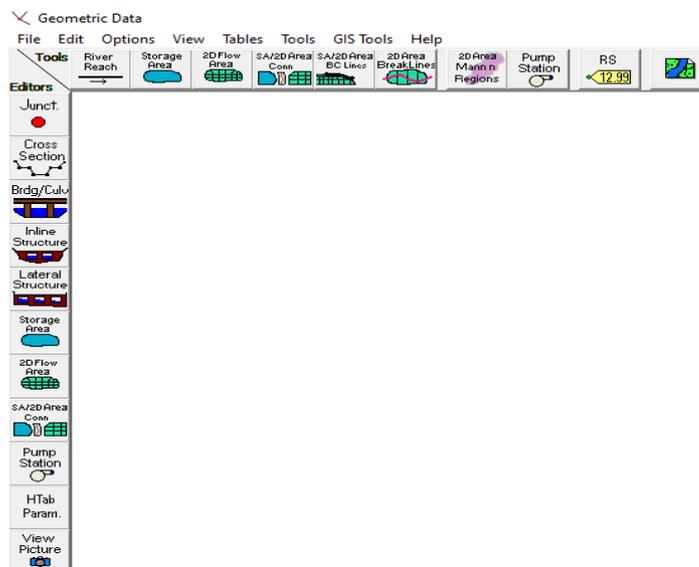


Figura 5.5 Geometric Data. HEC-RAS

Se selecciona la herramienta *2D Flow Area* y se dibuja el contorno. Una vez hecho esto, se introduce el nombre del área creada. Para diferenciar las mallas para cada caso se han denominado como *Area\_Actual* y *Area\_Modificada*, que corresponden a la situación inicial y futura, respectivamente.

La malla estará conformada por celdas con un determinado tamaño. En este caso, se ha considerado un valor por defecto de 15x15 en toda la geometría. Sin embargo, posteriormente en RAS Mapper se refinará la malla, de manera que en el cauce y las áreas adyacentes a él presente un tamaño de celda menor, con objeto de obtener una mayor precisión en estas zonas.

Además de esto, en el menú *Edit 2D Area Flow* se definen las propiedades de la malla.

- *Cell Volume Filter Tol.* Se ha considerado el valor por defecto, 0.003 m.
- *Face Profile Filter Tol.* Se ha considerado el valor por defecto 0.003 m.
- *Face Area-Elev.* Se ha tomado el valor por defecto 0.003 m.
- *Face Conveyance Tol Ratio.* Se ha dispuesto el valor por defecto de 0.02.

Tras establecer las propiedades de la malla, es preciso imponer las líneas donde posteriormente se añadirán las condiciones de contorno, *2D AREA BC Lines* (Boundary Conditions). Se ha dispuesto una condición de contorno al comienzo del tramo y otro al final del mismo, que correspondería con la entrada y la salida del flujo del río, respectivamente. Además de éstas dos líneas, en este caso se ha considerado disponer dos líneas de contorno adicionales a lo largo del perímetro de la malla, donde más tarde se impondrá la condición de *Normal Depth*, para evitar que el caudal desbordado no se acumule en el terreno, pues esto no sería una situación real.

En aquellas zonas donde se introducirán las condiciones de contorno de entrada y salida del flujo del cauce el contorno de la malla se ha dispuesto perpendicular al río, ya que esto puede ayudar a evitar la aparición de fallos en la simulación.

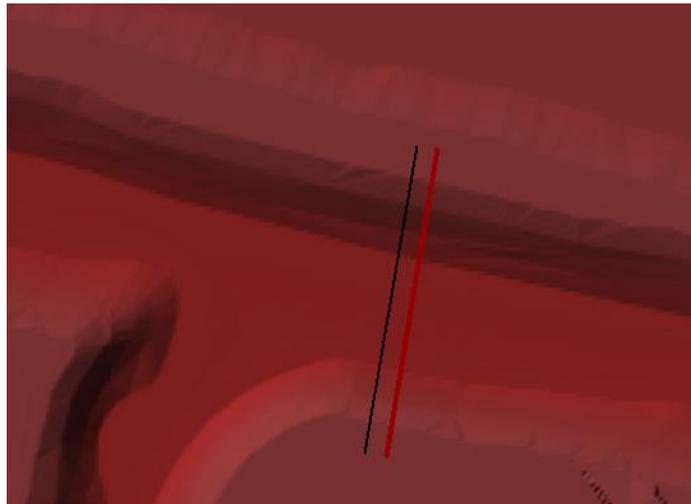


Figura 5.6 Línea de condición de contorno aguas arriba

Otro elemento fundamental que introducir en la malla son las líneas de rotura (*Break Lines*). Son un conjunto de polilíneas utilizadas principalmente en elementos lineales, como pudieran ser las motas en las márgenes de los cauces. De esta forma, se consigue dirigir el movimiento del flujo a través del dominio 2D. En general, éstas deben ser añadidas en cualquier lugar que suponga una barrera para el flujo, o bien que controle el comportamiento de éste, como puede ser el cauce en sí mismo. En el terreno modificado esto se ha realizado de igual manera, aunque dibujando las líneas de rotura sobre las motas retranqueadas.

Una vez establecidas las líneas de rotura, es necesario ajustarlas a la malla computacional, la cual quedará modificada automáticamente.

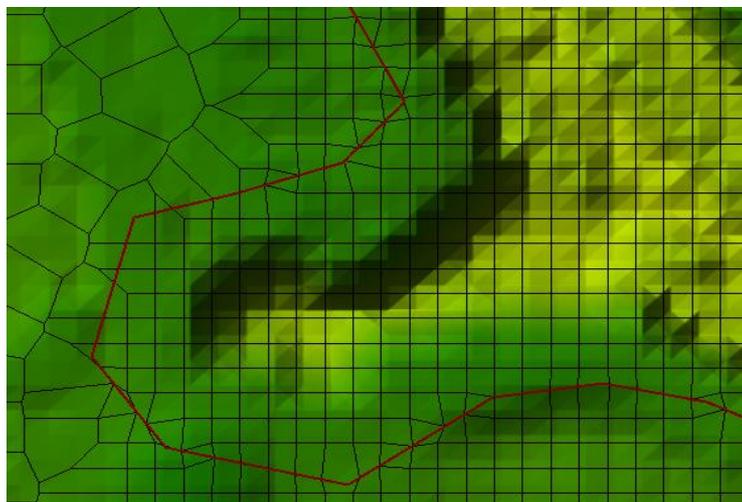


Figura 5.7 Ajuste de línea de rotura a la malla 2D

Así quedarían definidas las mallas 2D que actuarán como base de la simulación hidráulica. La nueva geometría creada podrá visualizarse en RAS Mapper, donde además se podrá editar algunas de sus propiedades, como se verá a continuación.

Como se mencionó anteriormente, se realizará un refinamiento de las mallas 2D. Con esto se pretende conseguir resultados más precisos en el cauce y las márgenes, pues son las zonas donde se quiere obtener un conocimiento mayor del comportamiento del flujo, observando la influencia de las motas. Por el contrario, en las zonas más alejadas del río no es necesario obtener resultados tan precisos. Además, con esto se consigue un mayor rendimiento de las simulaciones.

De esta forma, para las zonas más alejadas del cauce se mantiene el tamaño de celda introducido anteriormente, 15x15, y para aquellas zonas del cauce y parcelas contiguas a él las celdas tendrán un tamaño de 5x5 y 10x10, respectivamente. En la Figura 5.8 se pueden diferenciar las distintas regiones de refinamiento que se han dispuesto sobre las mallas.

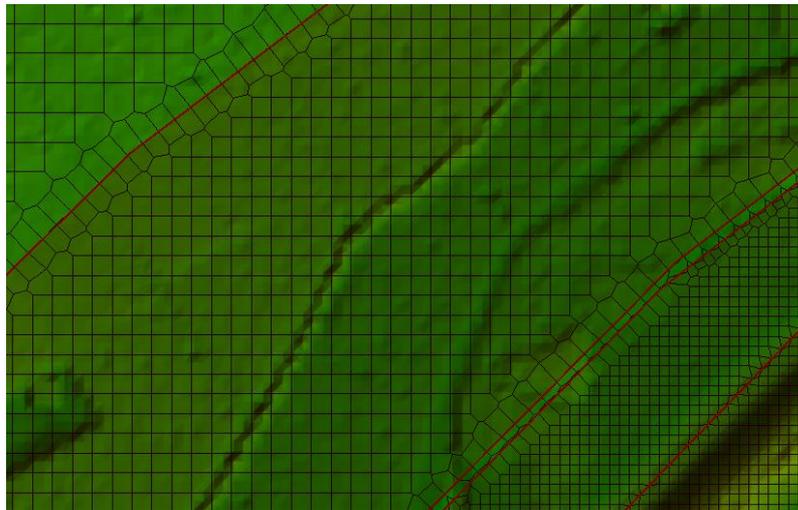


Figura 5.8 Malla 2D refinada

Finalmente, estas son las mallas 2D que se han establecido para las dos situaciones que se analizarán.

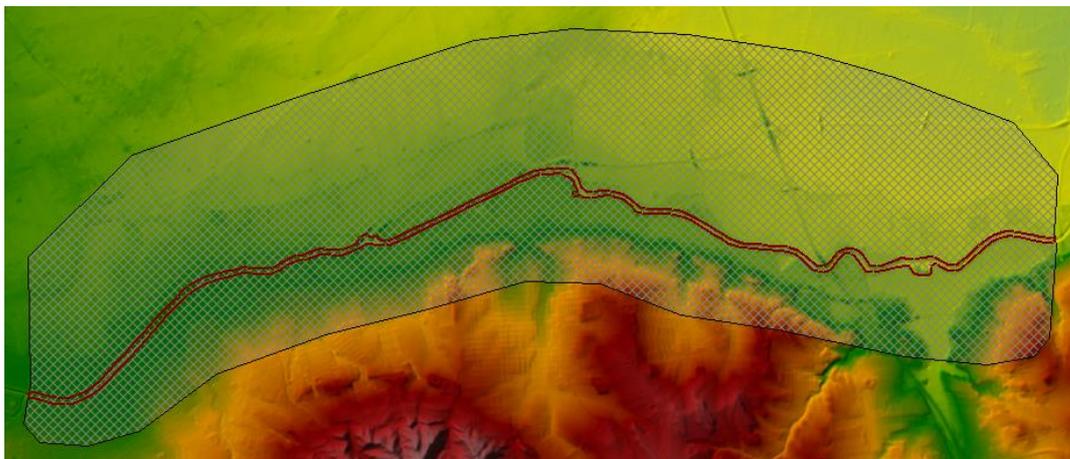


Figura 5.9 Malla 2D. Situación Actual

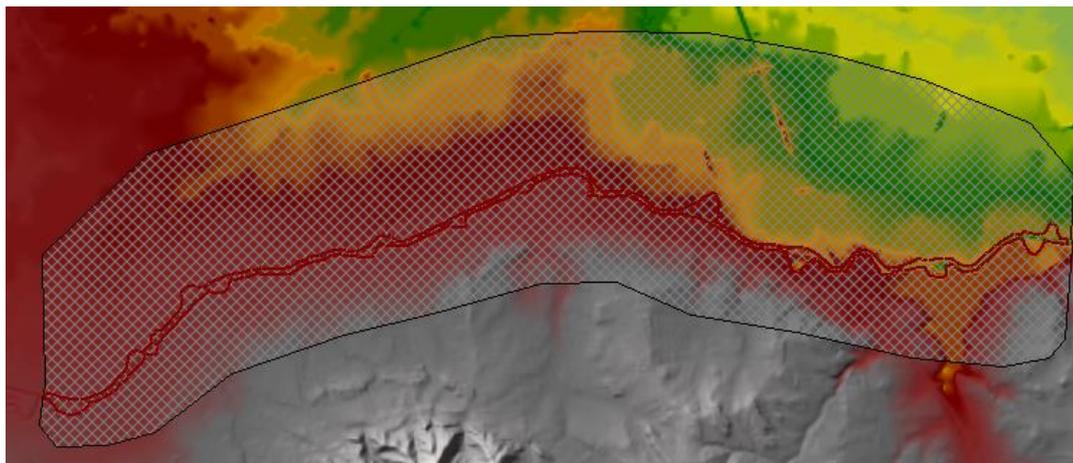


Figura 5.10 Malla 2D. Situación Futura

La diferencia más relevante entre ambas radica en la línea de rotura en torno al cauce, pues ésta varía de un caso a otro, debido a la presencia de las motas retranqueadas. Asimismo, como se comentará en apartados posteriores, debido a la pérdida de información en el terreno modificado, ha sido necesario introducir en el modelo correspondiente a la situación futura elementos denominados como *weir* (vertederos), a fin de rellenar aquellos huecos presentes en las motas situadas en las márgenes del río y así reproducir de la manera más exacta posible la morfología de las barreras colocadas alrededor de dicho cauce.

### 5.1.3 Capa de Manning

Como cabe esperar, el flujo entrará en contacto con diferentes tipos de cobertura terrestre, ya que en torno al cauce existe gran diversidad de usos de suelo, ya sean cultivos, cascos urbanos, entre otros. Por ello, es preciso asociar al terreno creado una capa de Manning, en la que cada una de las parcelas presente un coeficiente específico. RAS Mapper permite introducir una capa de Manning a partir de un fichero *shape*. El proceso que se ha llevado a cabo para ello se describe a continuación.

El primer paso consiste en obtener el archivo que permita visualizar los diferentes usos de suelo de las parcelas de la zona de estudio. En este caso se ha utilizado la información proporcionada por el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE), el cual permite descargar una base de datos de la ocupación del suelo, en archivo tipo Geopackage (*.gpkg*), de una determinada Comunidad Autónoma, en este caso la Comunidad Valenciana. Este archivo presentaba una clasificación de usos de suelos, teniendo cada uso un código identificatorio y una leyenda, permitiendo visualizar la actividad de cada parcela. Posteriormente, este archivo ha sido exportado a formato *shape* (*.shp*) para poder ser introducido en HEC-RAS, y además ha sido recortado para ajustarlo al área de estudio, reduciendo su tamaño. En dicho archivo aparece el código identificativo para cada uso de suelo. No obstante, aún es preciso introducir los coeficientes de rugosidad específico para cada actividad.

Para ello se ha utilizado la *Guía Metodológica para el Desarrollo de Zonas Inundables* (Anexo V), a partir del cual se ha establecido el número de Manning para cada una de las parcelas, a excepción del cauce, para el que se ha utilizado el manual de HEC-RAS. Este manual asocia un determinado coeficiente de rugosidad según las características del cauce. En este caso, se ha estimado un valor de 0.04, pues el río presenta un aspecto limpio y sinuoso, debido a la presencia de meandros de gran tamaño y de piscinas y bajíos a lo largo del curso del cauce.

A continuación, en la Tabla 5.1 se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning para los usos de suelos presentes en la zona de estudio. La columna CODIIGE corresponde al código identificativo de cada uso.

Tabla 5.1 Valores del coeficiente de rugosidad de Manning

Usos de suelo	CODIIGE	Nº Manning
Casco (municipio)	111	0.1
Ensanche	112	0.1
Tejido Urbano Discontinuo	113	0.09
Zona Verde Urbana	114	0.09
Instalación agrícola y/o ganadera	121	0.035
Extracción minera	123	0.04
Industrial	130	0.1
Servicio Dotacional	140	0.1
Asentamiento agrícola y huerta	150	0.04
Red Viaria	161	0.1
Puerto	162	0.1
Aeropuerto	163	0.1
Infraestructura de suministro	171	0.015
Infraestructura de residuos	172	0.1
Cultivo herbáceo	210	0.04
Invernadero	220	0.04
Frutal cítrico	231	0.06
Frutal no cítrico	232	0.06
Viñedo	233	0.05
Olivar	234	0.06

Combinación de cultivos leñosos	236	0.06
Combinación de cultivos	250	0.05
Combinación de cultivos con vegetación	260	0.05
Bosque de frondosas	311	0.07
Bosque de coníferas	312	0.07
Bosque mixto	313	0.07
Pastizal o herbazal	320	0.035
Matorral	330	0.055
Combinación de vegetación	340	0.05
Playa, duna o arenal	351	0.025
Roquedo	352	0.025
Temporalmente desarbolados por incendios (zonas quemadas)	353	0.04
Suelo desnudo	354	0.03
Marisma	413	0.04
Salina	414	0.04
Curso de agua (río)	511	0.04
Lago o laguna	512	0.025
Embalse	513	0.025
Lámina de agua artificial	514	0.025
Mar	515	0.025

Una vez hecho esto, el siguiente paso es introducir la capa de Manning en HEC-RAS, para lo cual simplemente se introduce el archivo *shape* obtenido anteriormente. Finalmente, el resultado obtenido es que se muestra en la

Figura 5.11.

Es preciso mencionar que el archivo *.gpk* descargado del IGN es del año 2014, por lo que fue preciso verificar si el uso de las parcelas había cambiado con respecto a la actualidad o no, por lo que se realizó una comparación mediante ortofotos aéreas y también con Google Earth. Tras esto se pudo comprobar que la mayor parte de las parcelas no habían visto modificados sus usos, aunque algunos de los campos de cultivos ahora formaban parte de un casco urbano o de una parcela industrial, por lo que en estos casos su coeficiente de rugosidad fue modificado para ajustarlos a sus usos actuales.

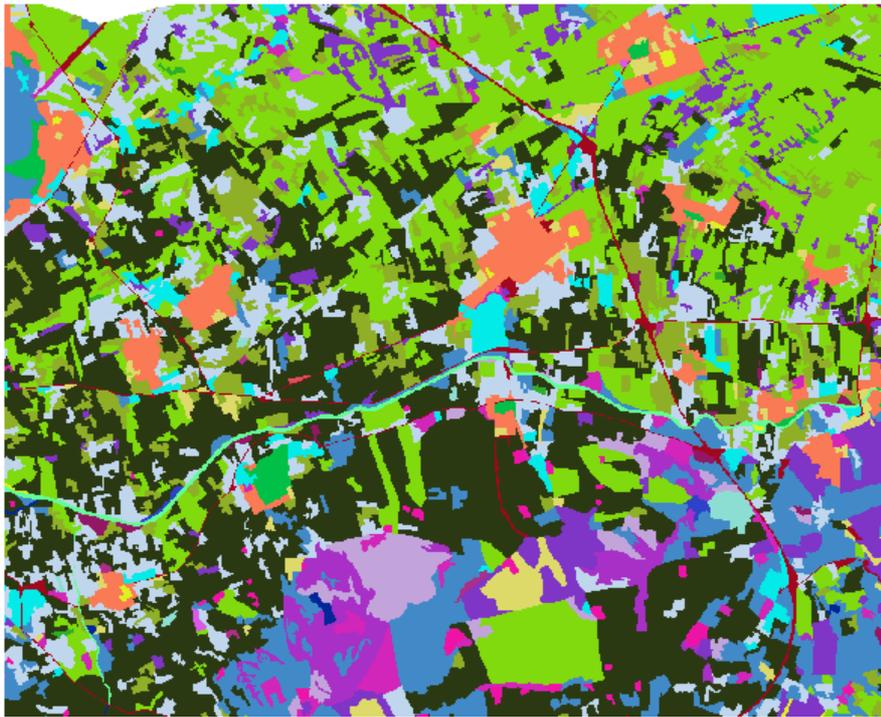


Figura 5.11 Capa de coeficiente de rugosidad de Manning

Tras obtener la capa de Manning hay que asociarlo al terreno y a la malla computacional previamente introducidos.

#### 5.1.4 Condiciones de contorno

El siguiente paso es imponer las condiciones de contorno de la simulación hidráulica. Como se ha mencionado en la generación de la malla 2D, se ha considerado disponer 4 condiciones de contorno, denominadas como:

- *Entrada\_Segura*. Condición al comienzo del tramo, en el que se han introducido los hidrogramas obtenidos a partir del tratamiento estadístico de caudales, desarrollado anteriormente.
- *Salida\_Segura*. Condición impuesta al final del tramo, con el objetivo de que el flujo salga de la malla computacional, estableciendo la condición de *Normal Depth*. El flujo saldrá del dominio de la malla de forma paralela a la superficie del terreno.
- *Salida\_Norte* y *Salida\_Sur*. Condiciones impuestas a lo largo de todo el perímetro de la malla 2D. Al igual que la condición anterior, se ha impuesto la condición de *Normal Depth*.

Para imponer las condiciones de contorno existe el módulo *Unsteady Flow Data* (Figura 5.12). Se considera dicho módulo en lugar de otros ya que los parámetros del flujo, tales como la velocidad o el caudal, varían en el tiempo y en el espacio, ya que la sección del cauce varía a lo largo del curso del río.

En primer lugar, mediante el módulo mencionado, se introduce al comienzo del tramo el valor de los caudales punta que se obtuvieron a partir del tratamiento estadístico, estableciendo la condición *Flow Hydrograph*.

Como se explicó anteriormente, se han considerado hidrogramas con tiempos base de 12, 24 y 48 horas. Basándose en los hidrogramas característicos de la zona de estudio, se ha considerado disponer el caudal punta aproximadamente a mitad del tiempo base. Así, si el tiempo base es de 48 horas, la punta del hidrograma se ha establecido en torno a las 22 horas y, para los casos de 12 y 24 horas, se ha dispuesto a las 4 y 10 horas, respectivamente. Puesto que únicamente se tienen los caudales punta y un caudal de la rama descendente del hidrograma, será necesario introducir el resto de los valores de la curva. HEC-RAS automáticamente se encarga de interpolar los valores intermedios, a través de la pestaña *Interpolate Missing Values*, de manera que no existen valores vacíos en la condición de contorno. Asimismo, es preciso definir la pendiente de la línea de energía (*EG Slope for distributing Flow along BC line*) a la entrada de la malla, la cual depende de la velocidad del flujo, el coeficiente de rugosidad de Manning y del radio hidráulico. Por ello, al tratarse de régimen no permanente, los parámetros anteriores pueden presentar gran variabilidad, por lo cual se ha considerado un valor promedio, coincidente con la pendiente media del terreno en el área de estudio, la cual resulta ser de 0.001.

Para las restantes condiciones de contorno se ha impuesto *Normal Depth*, según el cual el flujo sale de la malla de forma paralela a la superficie del terreno. Se ha establecido un valor de *Friction Slope* de 0.001 para todos los casos pues, como se ha podido comprobar mediante mapas topográficos, la pendiente en el tramo de estudio presenta valores muy bajos, en torno al 0.1%. De nuevo, es preciso remarcar que las condiciones denominadas como *Salida\_Norte* y *Salida\_Sur* han sido impuestas con el fin de garantizar la salida del flujo de la malla 2D, pues de lo contrario el flujo se acumularía en la superficie, dando resultados de calados y velocidades erróneos, ya que en realidad el flujo desbordado discurre por todo el terreno, en lugar de quedar acumulado dentro de la malla.

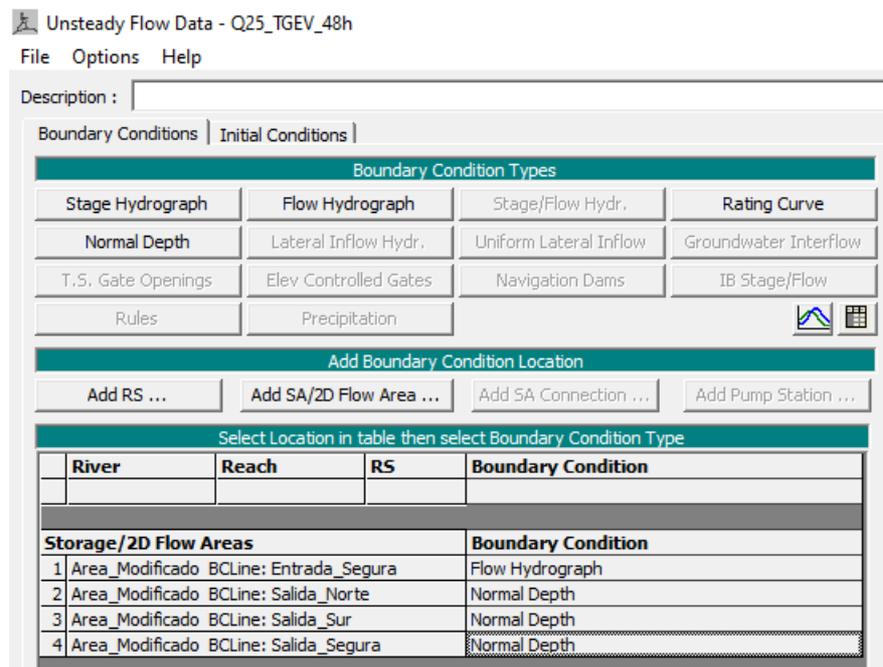


Figura 5.12 Unsteady Flow Data

### 5.1.5 Condiciones de análisis de la simulación hidráulica

Otro aspecto fundamental en la simulación hidráulica son las condiciones de análisis del modelo. Al tratarse de flujo no permanente, se ha utilizado el módulo de *Unsteady Flow Analysis*. En este apartado se describirán los distintos parámetros que es necesario introducir.

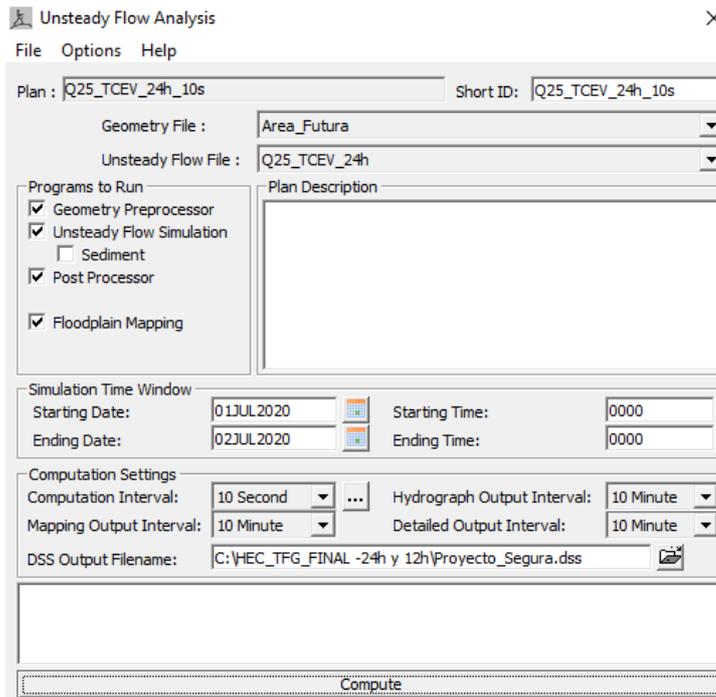


Figura 5.13 Unsteady Flow Analysis

Uno de los factores más determinantes en las condiciones de análisis son las ecuaciones de cálculo que seguirá el programa durante la simulación. HEC-RAS presenta dos opciones posibles: las ecuaciones de Saint-Venant y las ecuaciones de Onda Difusiva.

Las ecuaciones de Onda Difusiva proporcionan una mayor velocidad de cálculo y mayor estabilidad. No obstante, no suponen una buena opción para el estudio de inundaciones, como es el caso, ya que la Onda Difusiva no tiene en cuenta la aceleración local (cambio de velocidad con respecto al tiempo) ni la aceleración convectiva (cambios de velocidad con respecto a la distancia).

Por el contrario, las ecuaciones de Saint-Venant (*Full Momentum*) son más complejas y sí consideran los cambios de velocidad tanto espacialmente como en el tiempo, por lo que suponen una opción más adecuada para el estudio que se está realizando. Ello implica un mayor tiempo de simulación, ya que la velocidad de cálculo disminuye considerablemente respecto a la Onda Difusiva, aunque los resultados que se obtienen son más precisos. Además, el uso de estas ecuaciones puede acarrear problemas de inestabilidad durante la simulación.

Con respecto a lo anterior, es muy importante definir correctamente el intervalo de tiempo de cálculo, pues este parámetro, junto el tamaño de las celdas de la malla computacional, determinan la estabilidad del modelo, así como la buena precisión de los resultados. La estabilidad computacional viene determinada por la condición de Courant.

Puesto que se considerarán las ecuaciones de Saint-Venant como base de cálculo de la simulación, el intervalo de tiempo ha de ser tal que se cumpla la siguiente condición:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v} \quad (\text{con } C = 1)$$

C: número de Courant

Dt: tiempo de cálculo

Dx: tamaño de las celdas de la malla 2D

V: velocidad del flujo

Para los ríos grandes y medianos, como es el caso, se pueden producir pasos de tiempo demasiados restrictivos, es decir, se podría utilizar pasos de tiempo mayores y aun así mantener la estabilidad y exactitud del modelo. Un intervalo de tiempo aceptable y práctico podría ser:

$$\Delta t \leq \frac{T_p}{20}$$

El objetivo es conseguir un modelo en el que exista un cierto equilibrio entre la exactitud de cálculo y el tiempo de simulación, de manera que ésta no presente una duración excesiva. El intervalo de tiempo, así como el tamaño de celda, han sido modificados en reiteradas ocasiones, presentando en algunos casos problemas de inestabilidad. Finalmente, se obtuvo una solución estable con un espaciamiento de celda de 15x15, teniendo en cuenta también las regiones refinadas, y un intervalo de tiempo de 10 segundos. De esta forma, se ha conseguido una simulación hidráulica cuyo tiempo computacional aproximado oscila en torno a 5-6 horas lo cual, para un tiempo base de 48 horas y un período de retorno de 25 años, puede suponer una duración aceptable, considerando que el caudal punta presenta un valor relativamente alto.

Por otra parte, existen otros parámetros temporales que han de ser introducidos, como se puede observar en la Figura 5.13

- *Hydrograph Output Interval.* Se utiliza para definir con qué intervalo se escribirán los hidrogramas y el flujo computados en HEC-DSS. Debe ser introducido teniendo en cuenta el tiempo base del hidrograma, de manera que no se pierda información sobre la punta de éste. Se ha considerado un intervalo de 10 minutos.
- *Detailed Output Interval.* Permite escribir perfiles de elevación de la superficie del agua y del flujo en un intervalo especificado por el usuario. No es conveniente realizar perfiles para cada paso de tiempo, ya que implicaría demasiado tiempo de cálculo. Se ha impuesto un intervalo de 10 minutos.
- *Mapping Output Interval.* Este campo se utiliza para introducir el intervalo en el que se podrá visualizar la información de los resultados del flujo. Se ha considerado un intervalo de 10 minutos.

Además de los datos anteriores, es necesario introducir otros parámetros, relacionados con las tolerancias de cálculo. En el módulo *Unsteady Flow Analysis* se encuentra la pestaña *Calculation Options and Tolerances*, donde se ajustarán las opciones y las tolerancias de cálculo, utilizadas en la solución de las ecuaciones de flujo no permanente. A continuación, se explican brevemente las opciones presentes en dicha pestaña, así como los valores introducidos para cada uno de los parámetros.

- *2D Flow Options.*
  - *2D wáter Surface calculation.* Esta es la tolerancia de la solución de la superficie del agua en 2D para las iteraciones. En este caso, se ha considerado el valor por defecto de 0.1.
  - *Maximum Number of iterations.* Se ha dejado el valor por defecto de 20 iteraciones.
  - *Equation Set.* En esta pestaña se elige el conjunto de ecuaciones que regirán el cálculo hidráulico. Como se mencionó anteriormente, dada su precisión para estudios de inundación, se ha considerado utilizar la ecuación de Saint-Venant, *Full Momentum*.

- *Advanced Time Step Control*

En este apartado se establecen los parámetros para utilizar el método del número de Courant, explicado anteriormente.

- *Maximum Courant.* Este es el máximo número de Courant permitido en cualquier celda de la malla 2D o sección transversal 1D. En caso de exceder este valor, el *time step* se divide a la mitad para el siguiente intervalo de tiempo. Se ha considerado un valor máximo de 1.0, pues este valor es recomendable para aquellos casos en los que la velocidad y profundidad pueden variar rápidamente, como puede tener lugar durante el desbordamiento del cauce.

- *Minimum Courant*. Es el límite inferior del número de Courant para las celdas de la malla 2D y secciones transversales 1D. En caso de que el número de Courant adquiere un valor por debajo de este umbral, el *time step* se duplicará. Se ha considerado un valor mínimo de 0.1.
- *Number of steps below Minimum before doubling*. En relación con el parámetro anterior, este campo se utiliza para introducir el número de pasos de tiempo en los que número de Courant queda por debajo del límite inferior establecido. De esta forma, se evita que el modelo aumente el paso de tiempo demasiado rápido. Se ha establecido un valor de 4 para este parámetro.
- *Maximum number of doubling base time step*. Se utiliza para introducir el número máximo de veces que se puede duplicar el paso de tiempo base. Se ha impuesto un valor de 4.

Tras establecer los parámetros anteriores, las condiciones de análisis quedarían completas, por lo que se puede realizar la simulación hidráulica. Es preciso destacar que no se ha establecido ninguna condición inicial para la simulación, ya que inicialmente se considera que el terreno está seco. Esta condición es considerada por defecto por HEC-RAS, por lo que no es necesario añadir ningún parámetro adicional.

### 5.1.6 Adición de elementos *weir* en el terreno base

Cabe destacar, como se ha comentado anteriormente, que el modelo del terreno modificado por AutoCAD Civil 3D presenta cierta pérdida de información que, si bien no es pronunciada, puede generar que las simulaciones hidráulicas proporcionen resultados inexactos.

En el terreno original, previo a la modificación del mismo, es posible observar que las motas en las márgenes de los ríos son elementos más o menos lineales, sin apenas huecos en su estructura, garantizando que, bajo ciertos caudales, el flujo permanezca en el cauce y no se desborde por las áreas adyacentes. Por el contrario, las inexactitudes presentes en el modelo del terreno modificado han supuesto que, para los mismos caudales, el flujo desborde por aquellas zonas donde el terreno se encuentra menos elevado, como se puede comprobar mediante la Figura 5.14. Este hecho provoca que no sea posible analizar con exactitud el efecto del retranqueo de las motas ya que, en algunos casos, debido al desbordamiento del flujo que se ha producido previamente, las motas no se ven afectadas por el flujo.

Asimismo, existe una acequia, la cual desemboca en el río Segura, cuya presencia afecta enormemente durante episodios de avenida, pues por su canal se produce el mayor desbordamiento en la simulación hidráulica, como se pudo comprobar tras realizar una de ellas. De esta forma, se podría considerar la salida de la acequia como una compuerta, únicamente abierta durante las horas de riego y cerrada durante episodios de avenida, disminuyendo el riesgo de inundación de algunas de las parcelas.

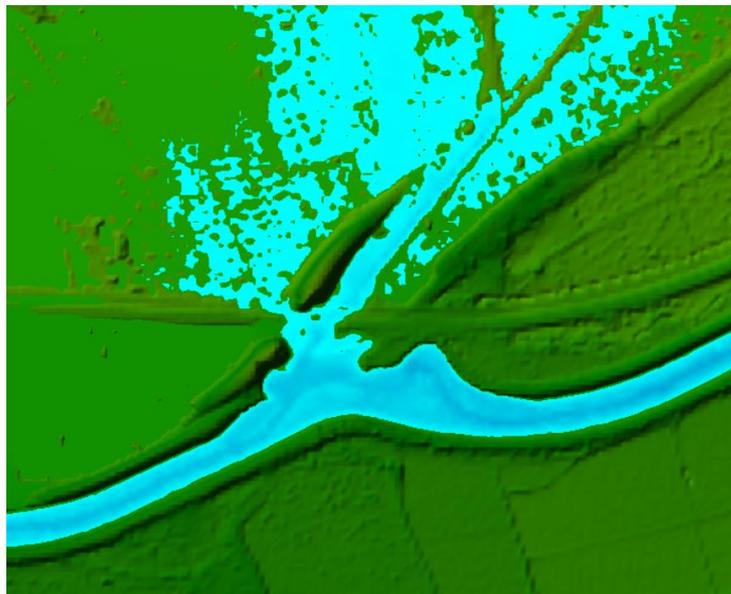


Figura 5.14 Acequia desbordada

Por esta razón, se ha decidido añadir al modelo modificado ciertos elementos denominados como *weir* (vertederos), dispuestos con el objetivo de reproducir las motas del terreno original, sin la presencia de huecos que pudieran afectar al desbordamiento, a fin de conocer mejor los efectos que las motas retranqueadas presentarían en fenómenos de avenidas. Se ha intentado, en la medida de lo posible, que estos elementos presenten una continuidad adecuada y las mismas elevaciones que los terrenos adyacentes a las mismas. Esto no supone un planteamiento erróneo, pues en el modelo actual las motas son elementos continuos, por lo que simplemente se ha pretendido reproducir esta realidad, con lo que se consiguen dos modelos de terreno más similares entre sí.

Para añadir estos elementos, dentro del módulo de *Geometric Data*, se clicca sobre la pestaña *2D Area Conn* (Connection) situada en la parte superior de la pantalla. Así se establece el eje principal del elemento. Seguidamente, se introducen los parámetros de la estructura, tales como el ancho y las coordenadas de los puntos que conformarán su superficie. Al igual que se hizo con las márgenes del río, estas estructuras se deberán considerar como líneas de rotura, ya que suponen un obstáculo para el flujo, por lo que deberán ser forzados al terreno. A modo de ejemplo, a continuación, se muestra en la Figura 5.15 un ejemplo de una de las estructuras que se han dispuesto sobre el terreno modificado.

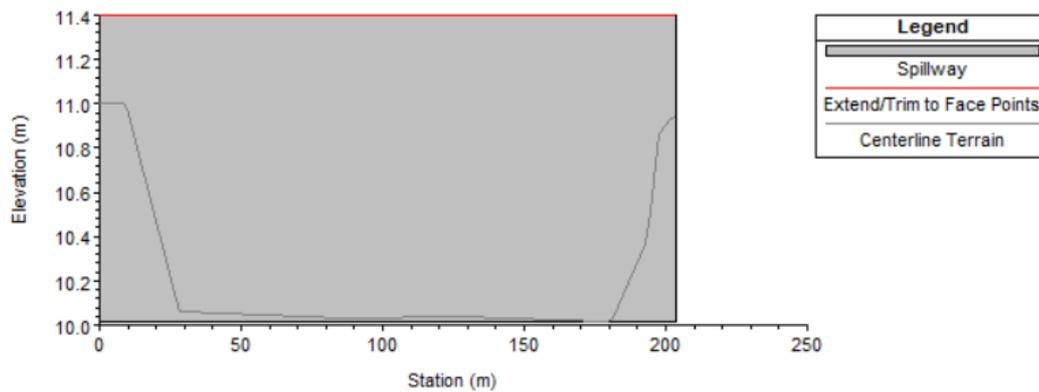


Figura 5.15 Perfil de vertedero (*weir*)

Se puede apreciar una diferencia de elevación entre el terreno base y las cotas superiores, ya que en caso de ajustar dichas cotas a la superficie pueden generarse errores durante las simulaciones hidráulicas.

De esta forma, se ha conseguido lidiar con las inexactitudes del terreno obtenido mediante AutoCAD Civil 3D. A pesar de ello, algunos de los huecos no han podido ser cubiertos del todo, por lo que las inundaciones no se han podido controlar. Asimismo, tras implantar estas estructuras sobre el terreno se pudo comprobar la disminución de áreas inundadas y la retención de flujo por parte de las motas retranqueadas, cumpliendo con el cometido para el que fueron dispuestas.



## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

**T**ras llevar a cabo la modificación del terreno original mediante Autocad Civil 3D, así como las simulaciones hidráulicas a partir de HEC-RAS, cabe ahora analizar los resultados obtenidos de estas últimas, para comprobar los efectos que el retranqueo de las motas supondría ante episodios de avenidas.

Antes de ello será preciso también estudiar y comparar los distintos hidrogramas que se han tenido en cuenta a la hora de realizar las simulaciones, es decir, con un tiempo base de 48, 24 o 12 horas, para comprobar qué tiempo base presenta mayor relevancia en el tramo de estudio.

Por último, se presentarán los resultados relacionados con el movimiento de tierras que habría que realizar para la eliminación de las motas y su posterior retranqueo, así como la superficie de terreno que sería necesario expropiar para llevar a cabo esta tarea.

### 6.1 Comparación de los modelos de terreno

Como se ha explicado anteriormente, mediante Civil 3D se realizó la modificación del terreno original, a fin de eliminar las motas dispuestas en las márgenes de los ríos y retranquearlas hasta una nueva ubicación, la cual se corresponde con los espacios que ocupaban los antiguos meandros del cauce, antes de su encauzamiento.

El terreno original, denominado como Terreno Actual en las simulaciones, se ha obtenido a partir de Modelos Digitales de Elevación del Instituto Geográfico Nacional, por lo que presentará una gran precisión. Sin embargo, el terreno modificado, en el que se ha realizado el retranqueo de las motas, presenta unas ciertas inexactitudes. A esta superficie se le ha denominado como Terreno Futuro en las simulaciones de HEC-RAS.

Esto se debe a que en Civil 3D la superficie generada presenta una cierta pérdida de información que, si bien no es muy significativa, supone una distorsión del terreno respecto del original. Con la interpolación que realiza Civil 3D para conformar la superficie del terreno a partir de las curvas de nivel no resulta posible conseguir una superficie del terreno tan exacta a cómo se obtendría con el uso de los MDTs.

Por esta razón, es necesario mostrar las diferencias que se han obtenido en la formación de los terrenos base. En la Figura 6.1 se puede observar un perfil transversal de la sección del cauce para ambos terrenos.

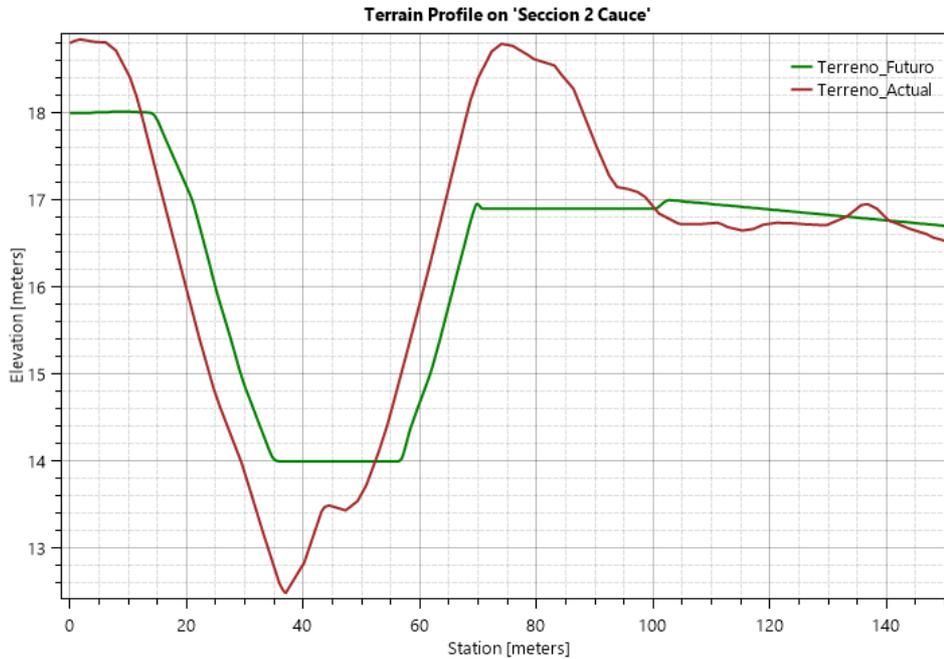


Figura 6.1 Comparación Terreno Actual y Terreno Futuro

Se puede comprobar cómo las motas del terreno original han sido eliminadas, tomando una morfología plana en los terrenos más próximos al cauce, tal como se pretendía conseguir. No obstante, se pueden apreciar cierta diferencia en las cotas del canal del cauce y del terreno, aunque en algunos puntos ésta no resulta relevante.

Además de lo anterior, en el caso del terreno modificado se observan ciertos huecos en la estructura de la mota, los cuales no están presentes en el terreno original. Esto supone que durante las simulaciones el terreno se inunde de manera diferente, ya que el flujo encuentra huecos más bajos por los que desbordar del río. Para solucionar esto ha sido necesario disponer de vertederos (*weir*), elementos añadidos mediante HEC-RAS. Dichos elementos son un obstáculo al flujo, por lo que tratan de impedir que se desborde el cauce por los defectos del propio terreno, haciendo que ambas situaciones sean más parecidas entre sí. Es preciso destacar que la elevación de estos elementos ha sido lo más próxima posible a la que presentaban las motas del terreno original, a fin de conseguir modelos de terreno más similares entre sí.

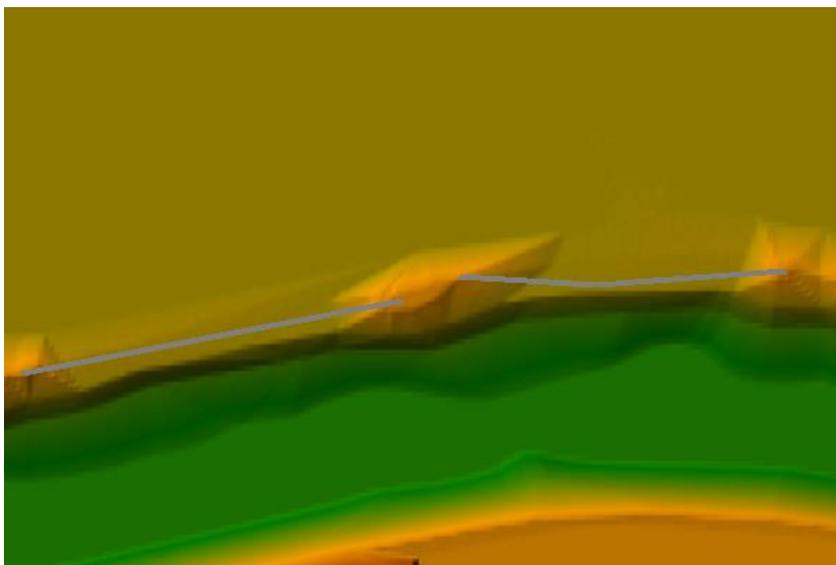


Figura 6.2 *Weir* dispuestos sobre el terreno modificado

De esta forma, quedarían resueltos los errores presentes en el terreno modificado, pudiendo entonces comparar ambos escenarios.

A pesar de estos errores en la superficie modificada, cabe destacar que el terreno presenta una morfología lo bastante aproximada al terreno original. Los posibles efectos que esto pudiera generar durante las simulaciones de las avenidas se deberán tener en cuenta a la hora de comparar la situación inicial con la futura.

## 6.2 Condiciones de contorno

Antes de analizar los resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidráulicas, es necesario prestar atención a las condiciones de contorno que se han impuesto en las mallas 2D. Éstas son idénticas en los dos escenarios que se han planteado, actual y futuro. Recordando el apartado 5 *Modelo de simulación hidráulica*, las condiciones que se impusieron fueron las siguientes:

- *Entrada\_Segura*. Aguas arriba del tramo de estudio se impone la entrada del flujo en el cauce, por lo que se introducen los hidrogramas.
- *Salida\_Segura*. Condición aguas abajo del río. En este caso, se impone calado normal a la salida del flujo de la malla computacional. El flujo circulante deberá presentar una lámina de agua más o menos paralela a la superficie del terreno.
- *Salida\_Norte* y *Salida\_Sur*. Al igual que la anterior, se ha impuesto la condición de calado normal a lo largo de todo el perímetro de la malla, con el objetivo de evitar que el flujo se acumule en el terreno y salga de la malla, acercándose a lo que ocurriría realmente.

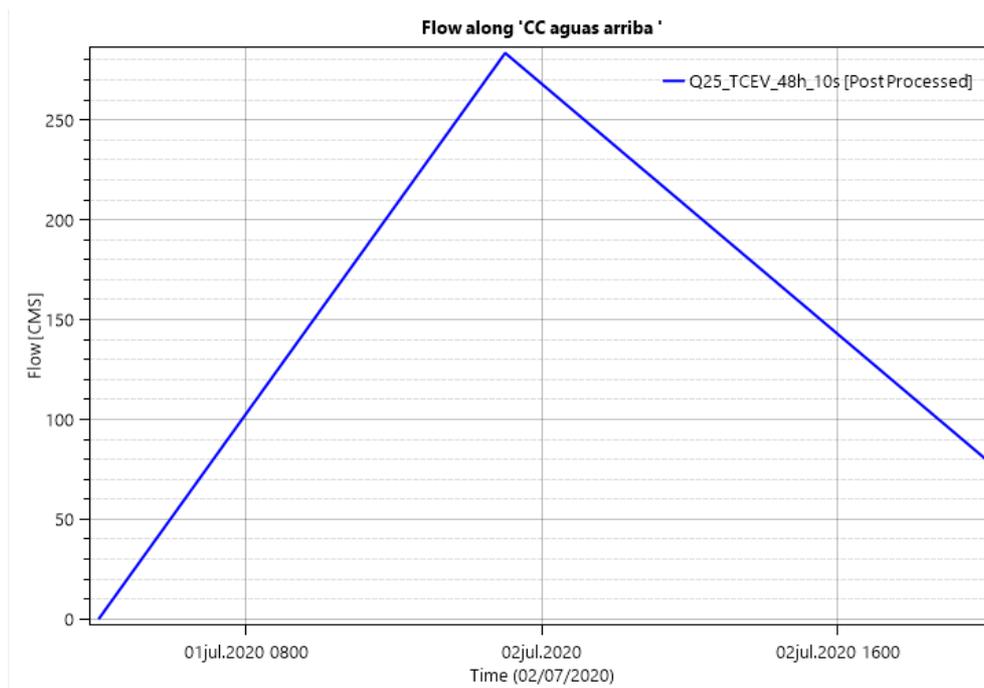
Comenzando por la condición aguas arriba del río, se muestra a continuación la serie de caudales que conforman los hidrogramas de entrada. Estos valores se han obtenido a partir de HEC-RAS, el cual se encarga de interpolar a partir de los caudales punta que se han introducido previamente: caudal en el instante inicial, caudal punta y un tercero de la rama descendente de la curva.

Tabla 6.1 Hidrograma de entrada. Q25. Tiempo base: 48h

t (h)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0	0
1	12.89
2	25.79
3	38.68
4	51.57
5	64.47
6	77.36
7	90.26
8	103.15
9	116.04
10	128.94
11	141.83
12	154.72
13	167.62
14	180.51
15	193.4
16	206.3
17	219.19
18	232.09
19	244.98

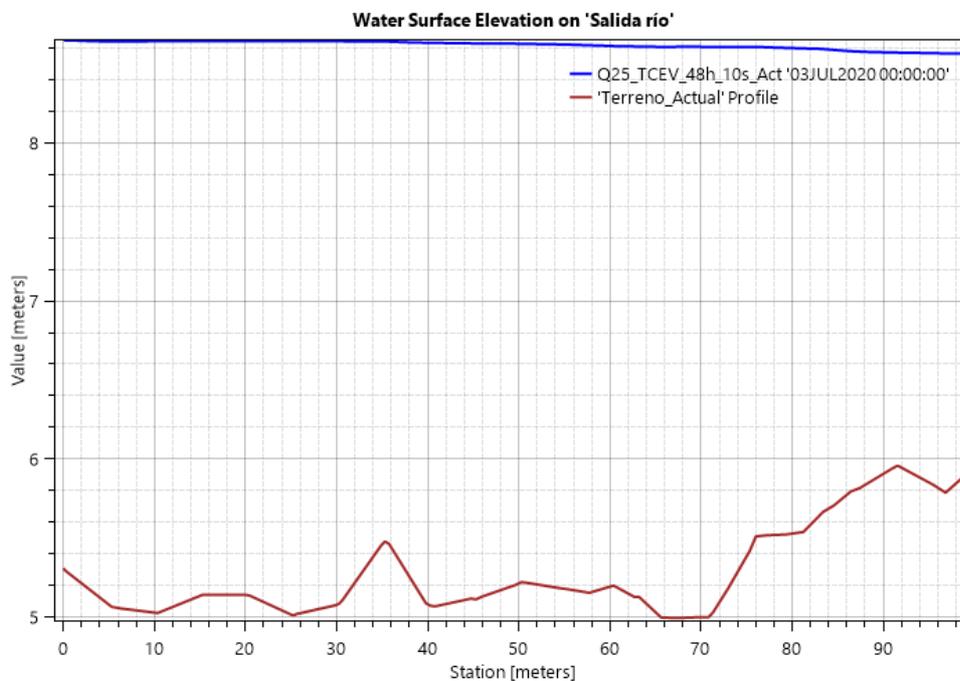
20	257.87
21	270.77
22	283.66
23	275.83
24	268
25	260.18
26	252.35
27	244.52
28	236.69
29	228.86
30	221.04
31	213.21
32	205.38
33	197.55
34	189.72
35	181.9
36	174.07
37	166.24
38	158.41
39	150.58
40	142.75
41	134.93
42	127.1
43	119.27
44	111.44
45	103.61
46	95.79
47	87.96
48	80.13

Impuesta la condición de contorno en la malla 2D y estudiando el flujo a través de una línea de perfil dispuesta en la condición de contorno aguas arriba se puede obtener el flujo que circula a través de dicha línea.

Figura 6.3 Hidrograma de entrada. Q25.  $T_{base}:48h$ 

Como se puede comprobar, la condición de contorno aguas arriba está correctamente introducida. Igualmente, para el resto de los hidrogramas, se ha comprobado esta condición, cumpliéndose en todos los casos.

Por otra parte, aguas abajo y también a lo largo de todo el perímetro del área de estudio se ha impuesto la condición de calado normal.

Figura 6.4 Condición de contorno aguas abajo. *Normal depth*

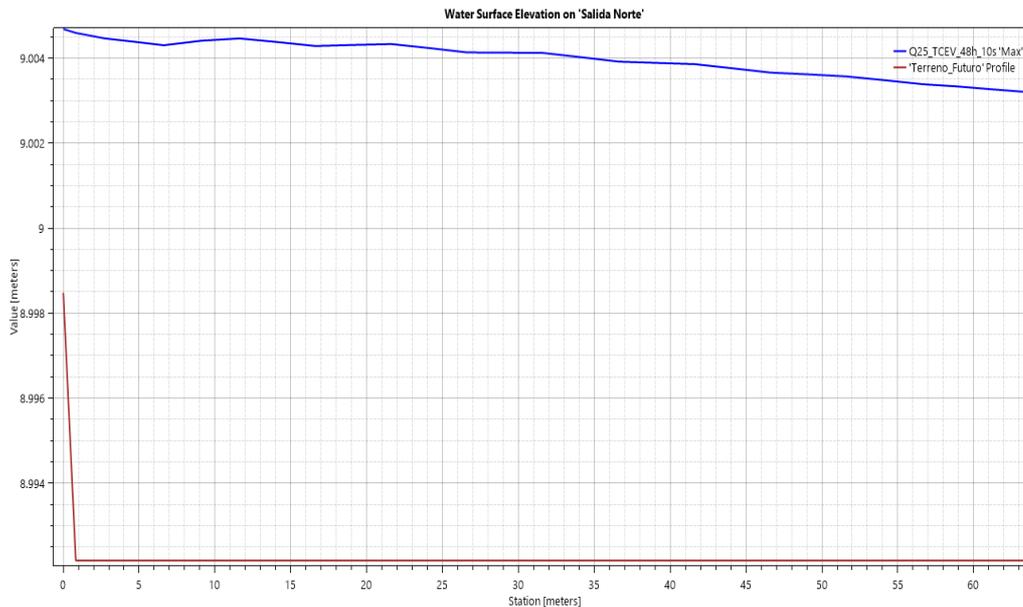


Figura 6.5 Condición de contorno. Salida Norte. *Normal Depth*

Se puede observar que las condiciones de contorno aguas abajo del cauce y las dispuestas en torno a la malla se encuentran bien definidas, ya que el flujo sale paralelo a la superficie del terreno.

Comprobadas las condiciones de contorno, se puede comenzar con los distintos análisis hidráulicos.

### 6.3 Comparativa de hidrogramas con distintos tiempos base

El área comprendida bajo la curva de un hidrograma corresponde con el volumen de agua que ha circulado por la estación de aforo durante un determinado intervalo de tiempo.

Antes de comenzar el análisis de resultados, es preciso aclarar ciertos conceptos. Los aspectos más característicos de un hidrograma son:

- Tiempo de crecida: aquel período comprendido entre el comienzo de las aportaciones por escorrentía superficial al caudal del río, hasta que llega al caudal punta.
- Tiempo base: tiempo transcurrido entre el inicio y el final de las aportaciones por escorrentía superficial.
- Tiempo de respuesta: tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del hidrograma hasta la punta del hidrograma, representando el retardo de la escorrentía.

En este trabajo no se han considerado las características de las precipitaciones para llevar a cabo un hidrograma del cual posteriormente obtener el hidrograma, sino que a partir de uno propio de la cuenca se ha establecido la forma del hidrograma del tramo. Esto se ha realizado de esta manera considerándolo como una simplificación, debido a que el objeto principal de este trabajo no es el estudio hidrológico de la cuenca, sino analizar el efecto del retranqueo de las motas en una determinada zona del río Segura.

Existen diversos factores que pudieran afectar a la forma del hidrograma, tales como factores climáticos y físico-geográficos, que influyen considerablemente en la forma de la curva del hidrograma. Como se pudo observar en el apartado 3.2, los hidrogramas característicos de la comarca Vega Baja del Segura presentaban un tiempo base de 48 horas aproximadamente.

No obstante, a partir de los datos recogidos de las estaciones de aforo no es posible determinar con exactitud el tiempo base en el curso bajo del Segura. Por esta razón, en este apartado se analizará la influencia del tiempo base, el cual dependerá de la duración de la lluvia y del tiempo de concentración de la cuenca. A priori, cabría pensar que es el mismo que el mostrado en la figura del apartado 3.2, con un tiempo base próximo a 48 horas.

Sin embargo, debido a que la duración de la lluvia resulta un factor muy influyente en la forma del hidrograma, se analizará los casos considerando un tiempo base de 12 y 24 horas, bajo la suposición de que la variación de la lluvia entre un caso y otro no resulta más allá de las 12 horas de duración. Dicha hipótesis se ha tenido en cuenta en base al hidrograma característico de la zona.

De esta forma, se han llevado a cabo en HEC-RAS diferentes simulaciones en la situación actual, previa a la modificación del terreno, a fin de comparar los resultados obtenidos para cada hidrograma y poder establecer cuál resulta más significativo para el tramo de estudio.

En primer lugar, se muestran los perfiles de profundidades a lo largo de una línea presente en la margen derecha del cauce, zona afectada por el desbordamiento del río, como queda reflejado en la Figura 6.6.

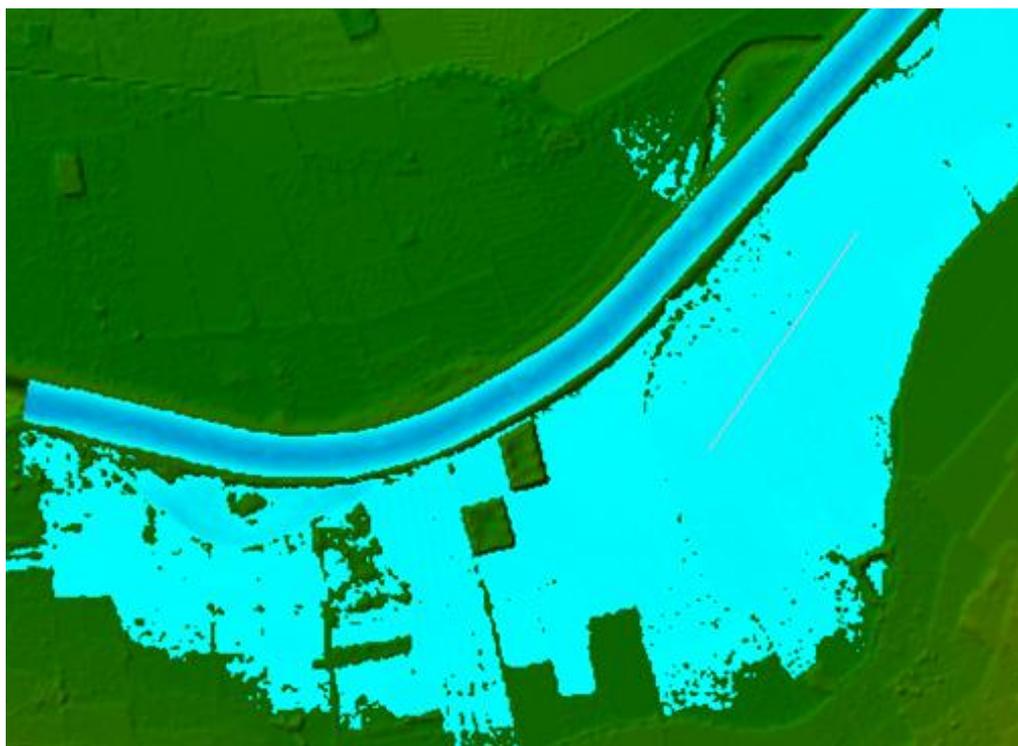


Figura 6.6 Vista en planta de la línea “Inicio Tramo”

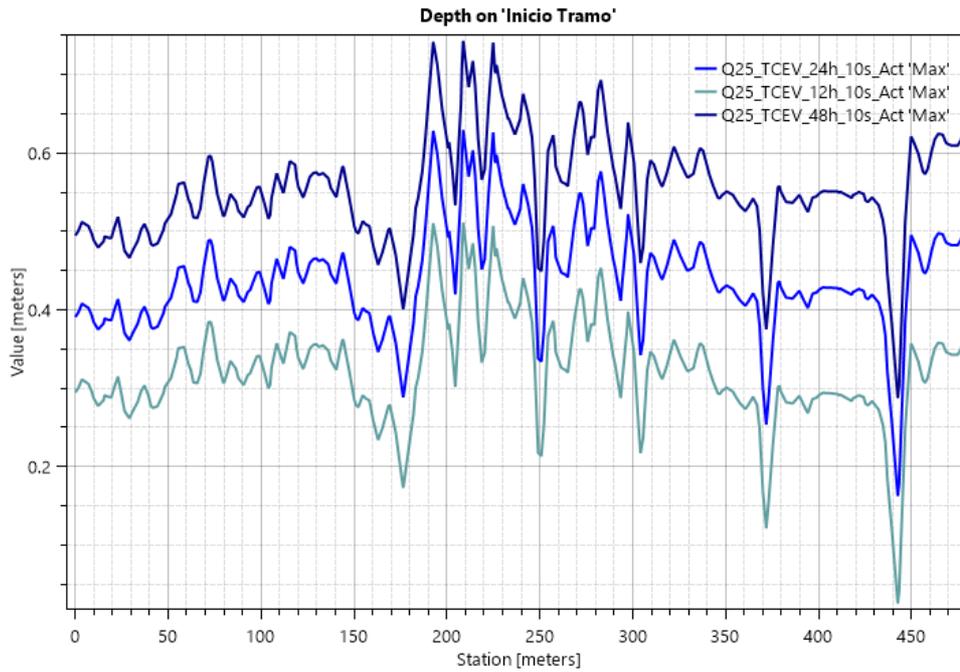


Figura 6.7 Profundidad para Q25. Tiempo base de 48h, 24h y 12h

La Figura 6.7 corresponde con el momento de máxima profundidad para cada uno de los tiempos base considerados. Se han tomado diferentes puntos del terreno para comparar los resultados obtenidos. Así, observando la figura anterior, se puede comprobar que para el hidrograma de 12h de duración los calados máximos que tienen lugar oscilan en torno a 0.5 metros como máximo, mientras que el hidrograma de 48h supondría un aumento del calado del orden de 0.25 metros respecto al primero, pues se llega a alcanzar un valor próximo a 0.75 metros.

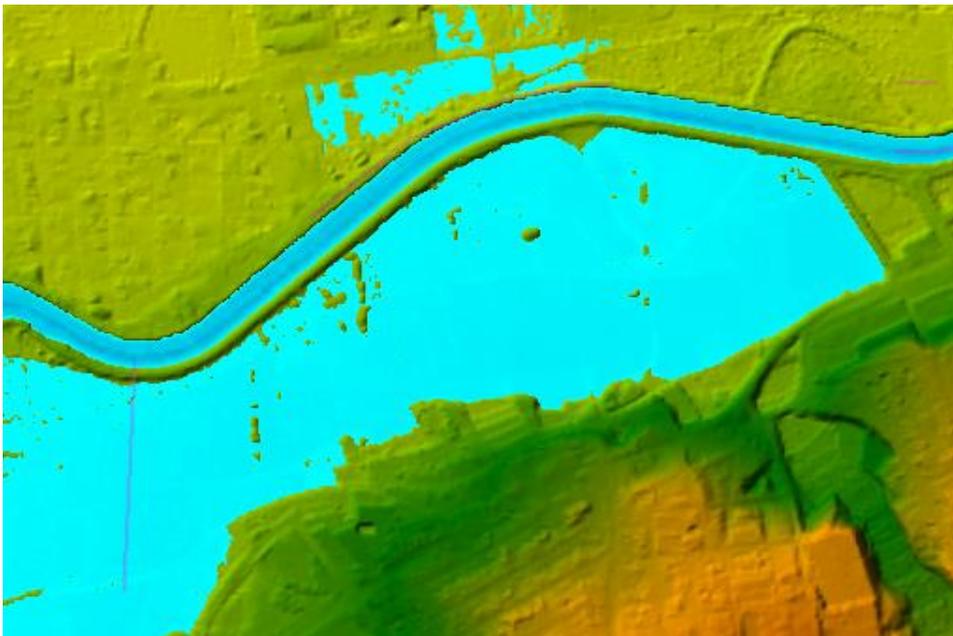


Figura 6.8 Vista en planta de la línea “Tramo final”

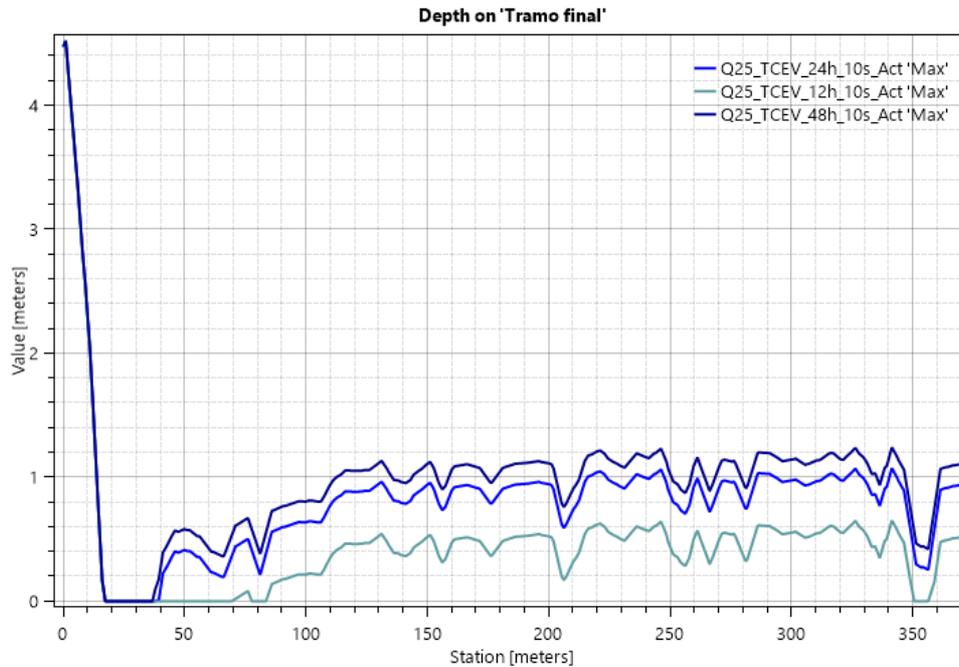


Figura 6.9 Calados para Q25. Tiempos base de 48h, 24h y 12h. Tramo final

La Figura 6.9 corresponde con un línea de perfil próximo al tramo final del área de estudio. De nuevo, se puede comprobar que existe una cierta diferencia de calados, sobre todo entre el hidrograma de 48h y 12h, la cual en este caso es más pronunciada, ya que para el primero presenta calados con valores superiores a 1 metro. Por el contrario, para el hidrograma de 12 horas, apenas superaría 0.5 metros, por lo que la diferencia de calados entre un caso y otro es bastante importante. Para el hidrograma de 24h, los calados oscilan en valores situados entre los otros dos restantes, aunque más próximos a los de 48h.

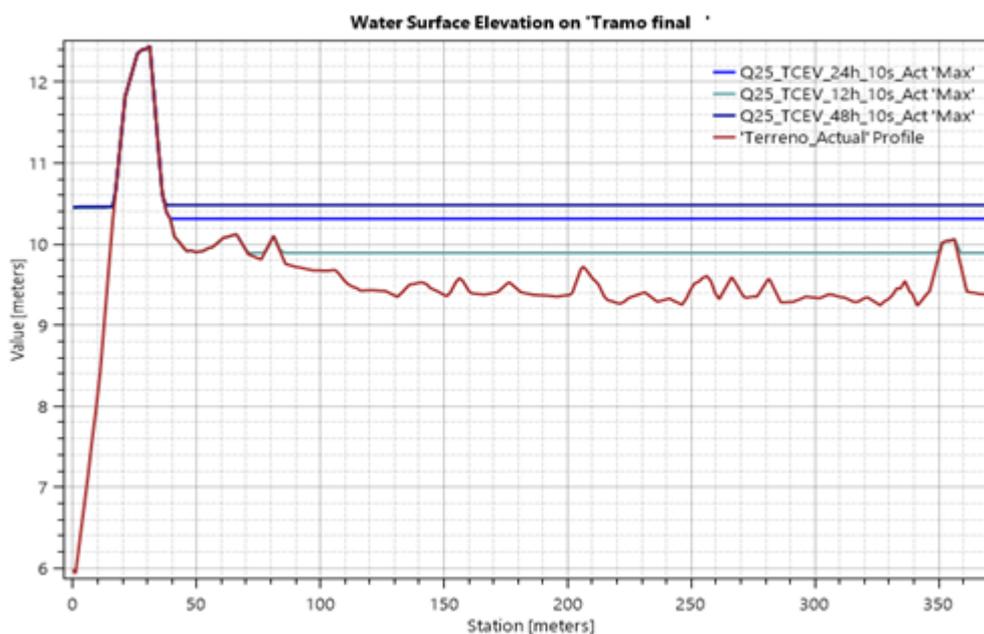


Figura 6.10 Elevación de la Superficie del agua. Tramo final

En la Figura 6.10 se puede visualizar la elevación que alcanzaría el agua con respecto al terreno. Para el hidrograma de 48h, se puede comprobar que el flujo alcanzaría una elevación superior a 1 metro, lo cual es un

valor considerable, aunque para un tiempo base de 24 horas, los calados no presentarían gran diferencia con respecto al primer caso. Para el hidrograma de 12 horas, el nivel del agua no alcanzaría una altura superior a 0.5 metros por encima del terreno.

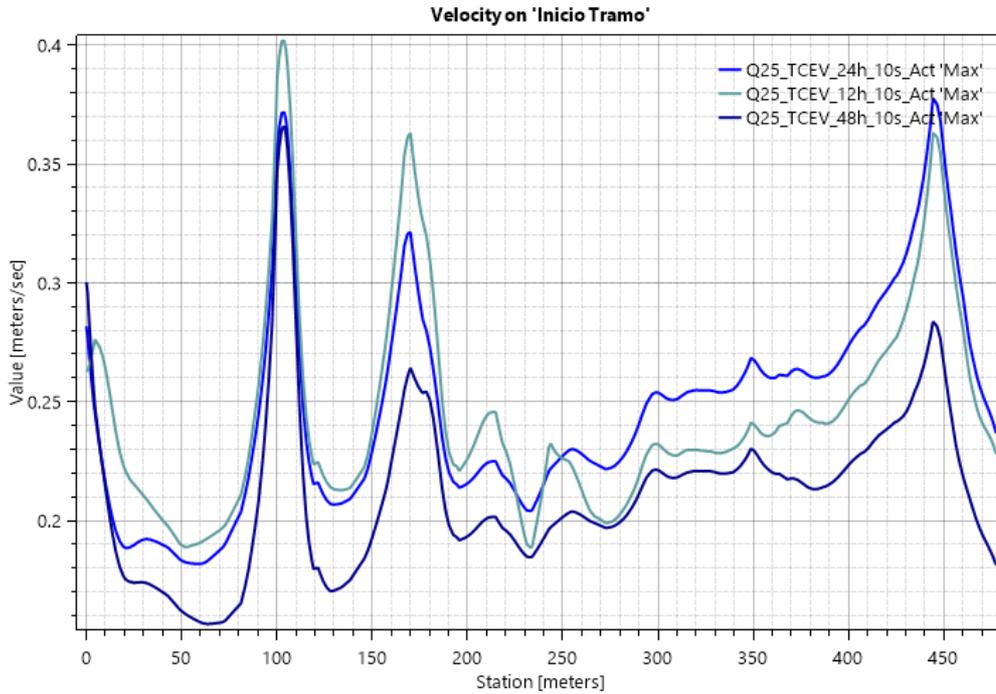


Figura 6.11 Velocidades máximas. Inicio tramo

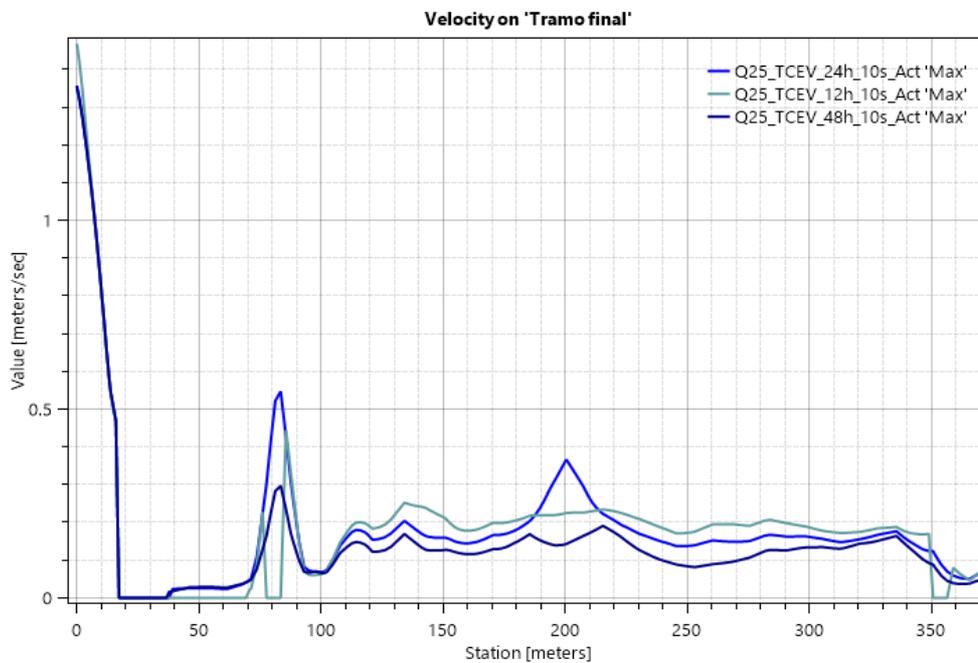


Figura 6.12 Velocidades máximas. Tramo final

La principal diferencia entre los hidrogramas considerados radica en los calados que se han presentado anteriormente, ya que, como se puede comprobar en las Figuras 6.11 y 6.12, la velocidad no presenta valores

muy distintos entre sí en la mayoría de los puntos, pues solamente varían en torno a 0.03-0.04 m/s entre un caso y otro, por lo que esta variación en la velocidad no presenta relevancia. Sin embargo, con respecto a los calados, sí podían encontrarse diferencias a 0.5 metros o superior, lo que puede ser considerable durante un episodio de inundación.

En conclusión, basándose en los resultados mostrados en las figuras anteriores, se puede determinar que el hidrograma más representativo del tramo estudiado corresponde con el que tiene un tiempo base de 48 horas, ya que con éste se obtiene una mayor cota de inundación en el terreno en comparación con los otros dos considerados. La velocidad finalmente no ha resultado ser un factor determinante para determinar el hidrograma más característico, pues los valores obtenidos no presentan una diferencia significativa entre ellos. El hecho de que el tiempo base de 48 horas sea el más representativo del curso bajo del río Segura concuerda con los datos recopilados por la Confederación Hidrográfica del Segura, ya que ésta tomó información de diversas estaciones de aforo y todas las curvas presentaban un tiempo base aproximado de 2 días. Por ello será este tiempo base el que se considerará también para el estudio posterior del período de retorno de 10 años.

#### 6.4 Influencia de la presencia de dos puntas en el hidrograma característico de la cuenca

Una vez analizados los efectos de los distintos hidrogramas y seleccionar aquel que resulte más característico del tramo de estudio, es preciso estudiar la influencia de los dos caudales punta que aparecen en los hidrogramas recopilados por la Confederación Hidrográfica del Segura. Recordando la figura mostrada en el apartado 3.2, se muestra un hidrograma típico del tramo final del Segura.

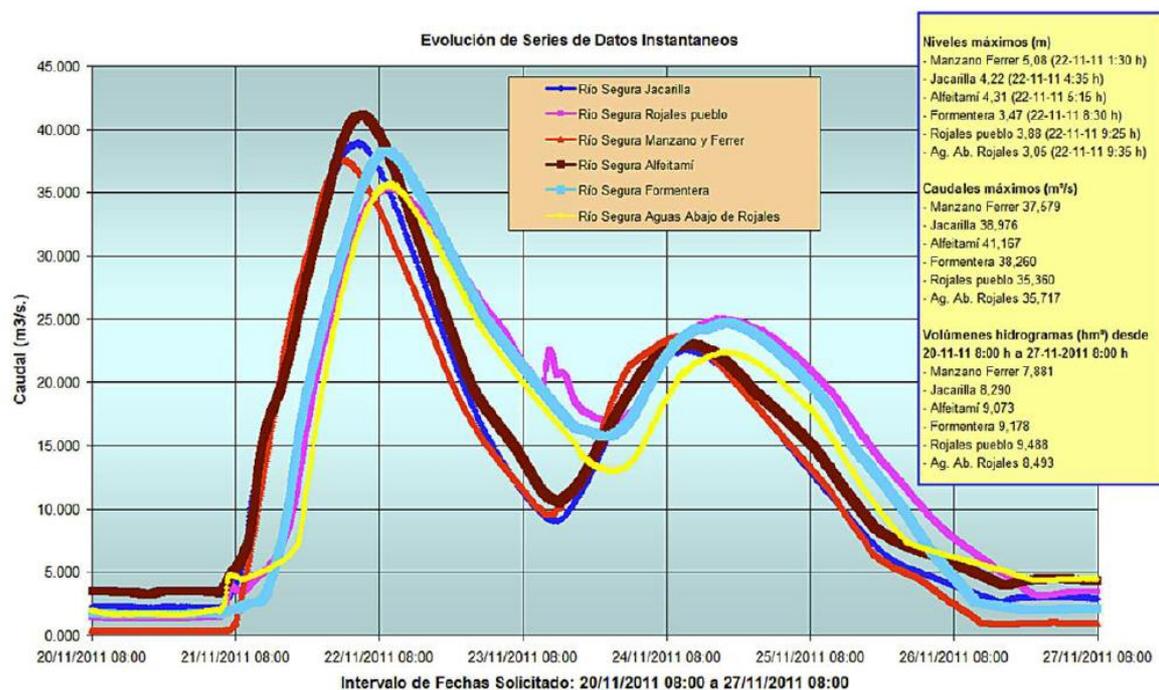


Figura 6.13 Hidrogramas de avenida. Comarca Vega Baja del Segura. Fuente: CHS

En la Figura 6.13 se puede comprobar que la segunda punta del hidrograma presenta un desfase de 48 horas con respecto al primero y un valor considerablemente menor, tomando incluso valores próximos a la mitad del anterior. El hecho de existir dos caudales punta puede deberse a la presencia de la denominada Rambla Salada, la cual desemboca en el río Segura tras su paso por la ciudad de Orihuela. Según la Confederación Hidrográfica del Segura, en la fecha en las que se obtuvieron datos de aforo del curso bajo del Segura, se registraron además caudales en algunas de las ramblas de la cuenca, tales como la Rambla Salada, la cual desemboca en el río principal tras su paso por la ciudad de Orihuela. Por ello, debido a la proximidad de dicha rambla al tramo de

estudio, es por lo que aparece un segundo caudal punta, procedente del agua recogida por ella.

Cabe entonces analizar la influencia de la existencia de esta rambla, a fin de comparar si el caudal aportado por ésta presenta una relevancia significativa durante los episodios de avenidas o, por el contrario, el caudal punta inicial es el que mayor efecto produce en el desbordamiento del cauce. Por ello, se compararán los resultados obtenidos considerando únicamente el hidrograma con un único pico de caudal y los correspondientes al hidrograma completo, teniendo en cuenta el segundo caudal punta.

Puesto que en el apartado 6.3 se pudo concluir que el tiempo base de 48 horas era el más representativo del tramo de estudio, el nuevo hidrograma se ha dispuesto teniendo en cuenta esta duración de la primera rama del mismo, por lo que finalmente, tendrá un tiempo base total de 120 horas: las primeras 48h de la primera rama de la curva, más las 24h correspondiente al tiempo de crecida del segundo pico y las 48 horas restantes de su rama descendente. De nuevo, se ha escalado el hidrograma teniendo en cuenta las mismas relaciones entre los caudales del hidrograma modelo. Los valores de los cinco puntos principales de este hidrograma son los siguientes:

Tabla 6.2 Caudales hidrograma con 2 puntas

t (h)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0	0
22	283.66
48	80.13
72	160.26
120	29.14

Hidrograma con dos caudales punta

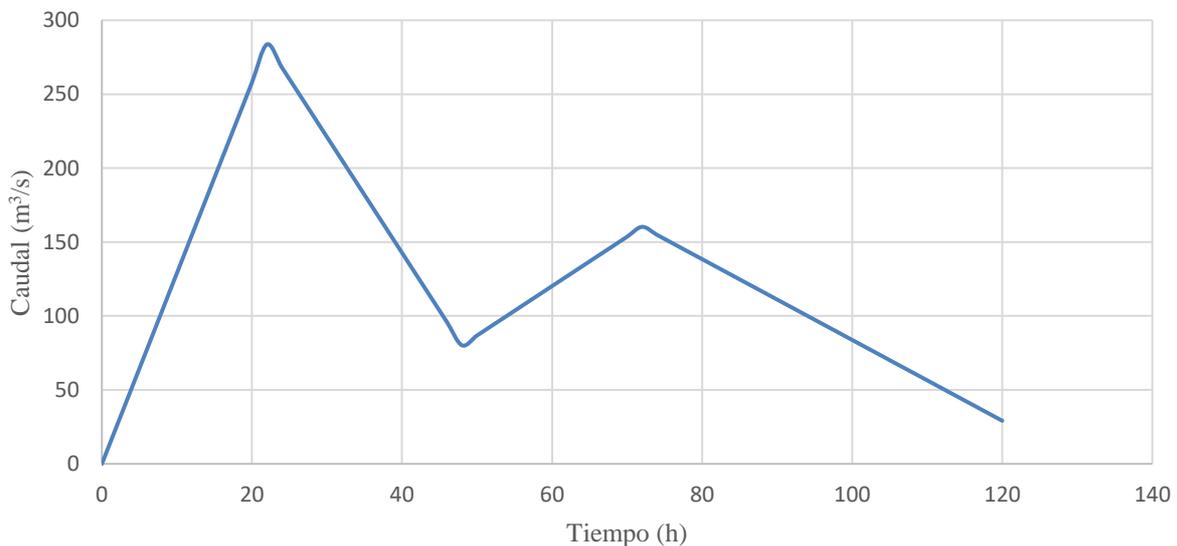


Figura 6.14 Hidrograma con dos caudales punta

A continuación, se muestran los calados pertenecientes al hidrograma de 48h y al de 120h de tiempo base.

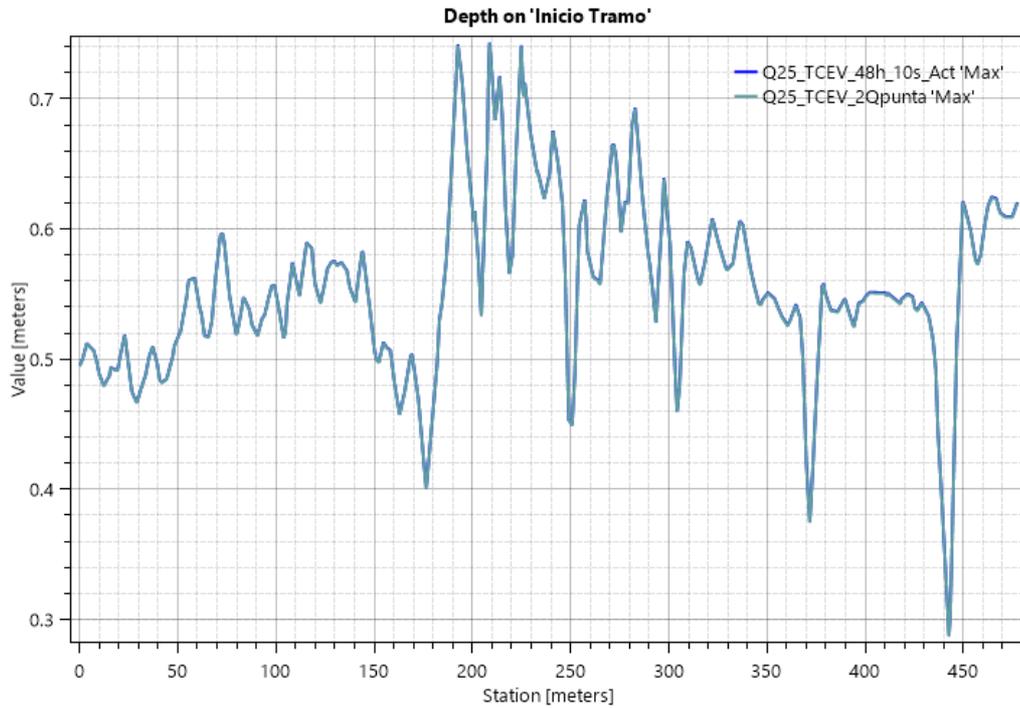


Figura 6.15 Calados correspondientes a los dos hidrogramas. Tramo inicial

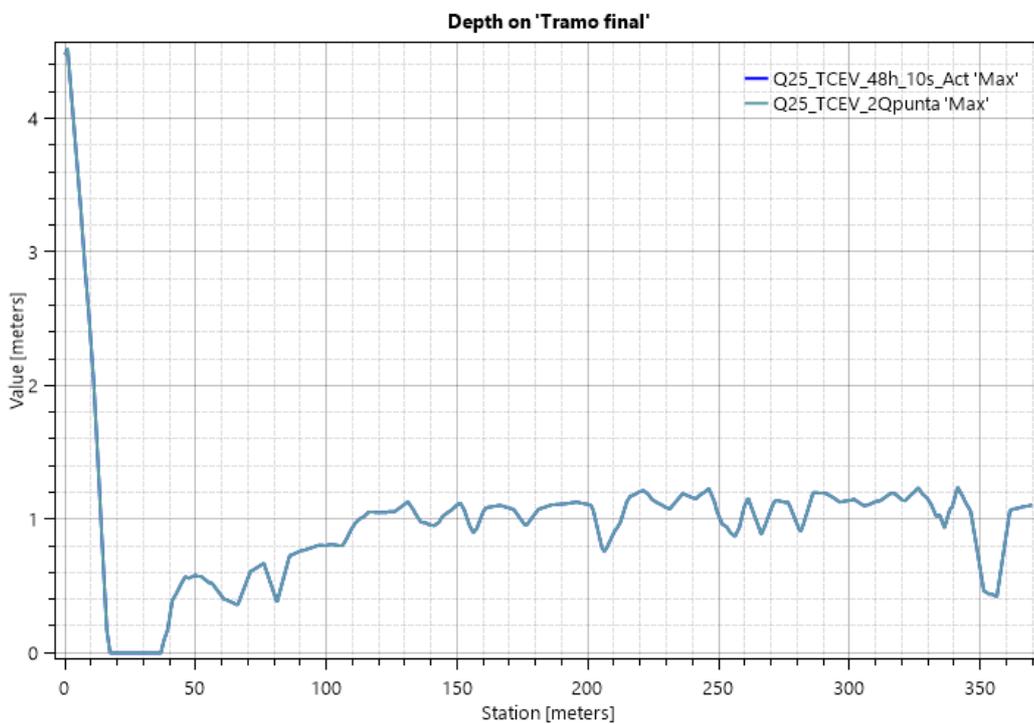


Figura 6.16 Calados correspondientes a los dos hidrogramas. Tramo final

Como cabría esperar, inicialmente los calados coinciden para ambos casos, ya que la situación máxima corresponde al mismo caudal punta.

Por el contrario, si se comparan los instantes finales de ambas simulaciones a lo largo de un perfil situado en la llanura de inundación se puede apreciar una cierta diferencia de calados entre ambos hidrogramas.

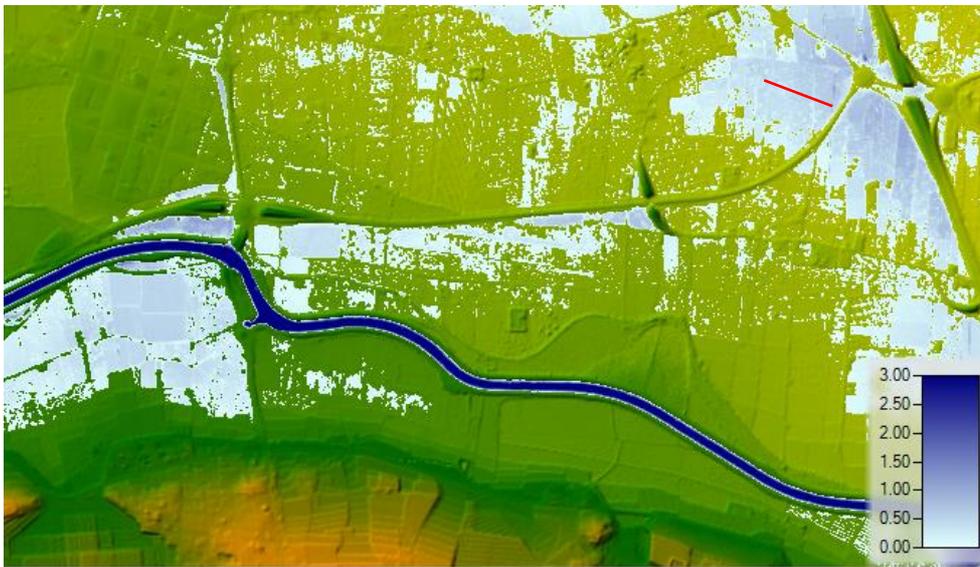


Figura 6.17 Vista en planta de la línea “Llanura de inundación 2”

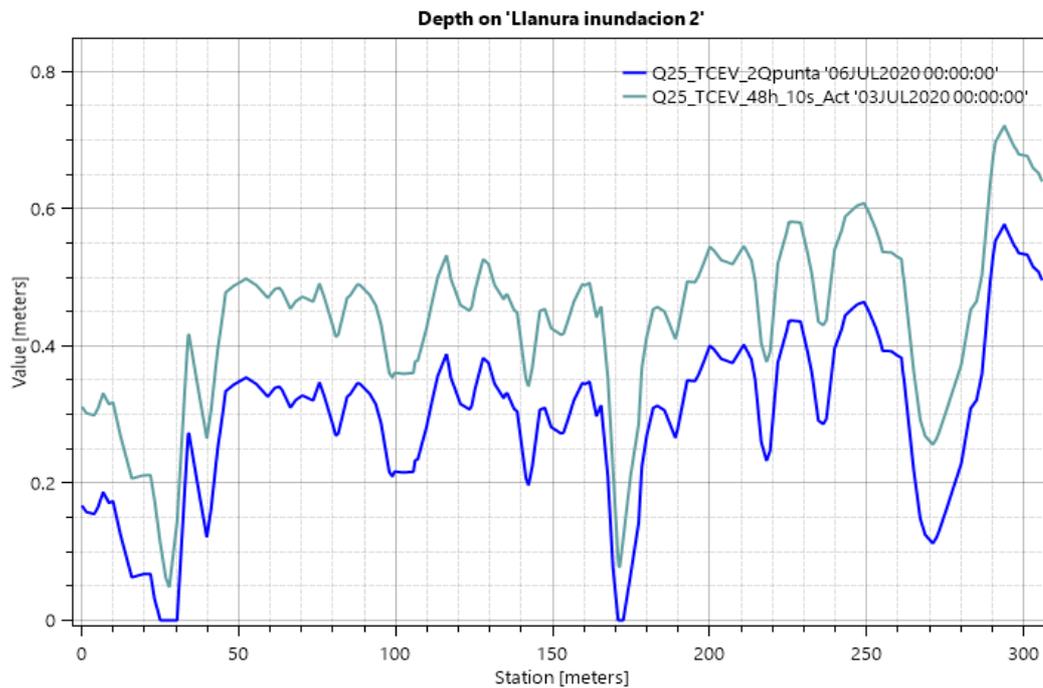


Figura 6.18 Calados en la llanura de inundación

No obstante, los calados que se obtienen del hidrograma de 120h de tiempo base son ligeramente inferiores al hidrograma inicial. De manera general, las profundidades alcanzadas en este último caso son del orden de 0.15 metros mayor comparados con el primero. Los resultados ponen de manifiesto que el segundo pico del hidrograma no contribuye de manera significativa a aumentar el calado durante el desbordamiento del río, ya que el caudal punta en esta curva no supera la capacidad de desagüe del río Segura, al contrario de lo que ocurre con la primera punta, que sí provoca el desborde brusco del cauce. En este segundo caso, a pesar de que sigue produciéndose el desbordamiento del río, éste no se produce de la misma forma que en el caso anterior, ya que

el río sí es capaz de retener la mayor parte del flujo circulante.

En la Figura 6.19 se muestra una de las secciones del río en las que se produce el desbordamiento del flujo.



Figura 6.19 Vista en planta de la línea “Sección desborde”

Los instantes capturados corresponden al final de la simulación del hidrograma de 48h, en la que éste ya ha inundado las llanuras adyacentes, y al período de tiempo en el que se produce la segunda punta del hidrograma de 120h. Como se puede observar en las Figuras 6.20 y 6.21, la lámina de agua que se origina por el desborde de este último no presenta una gran elevación con respecto al terreno, manteniéndose prácticamente a nivel del mismo.

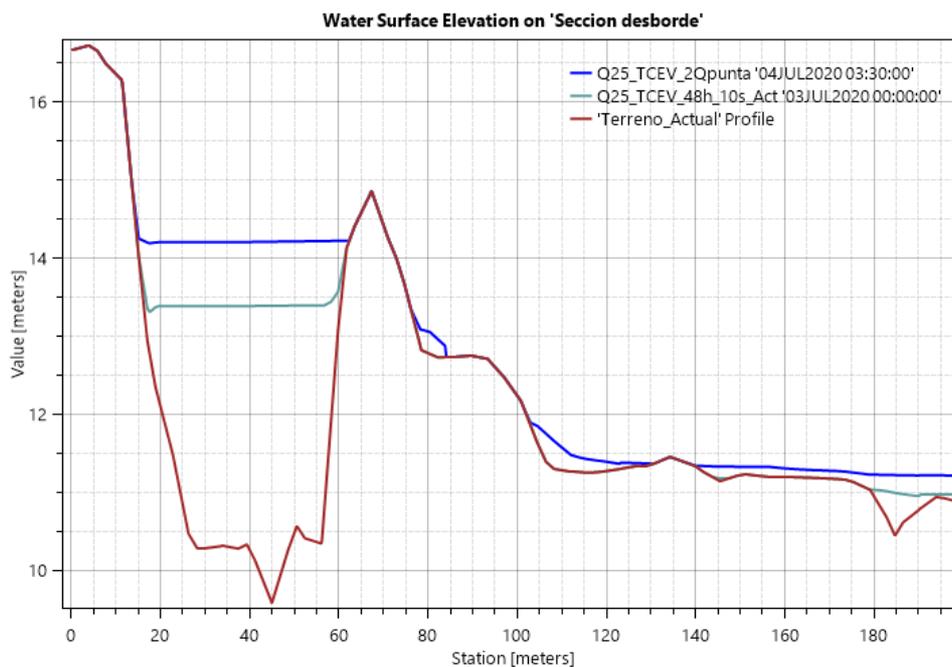


Figura 6.20 Superficie del agua. Sección desbordada

A medida que transcurre el tiempo, la superficie del agua apenas no sufre una variación relevante, sino que toma

valores muy pequeños.

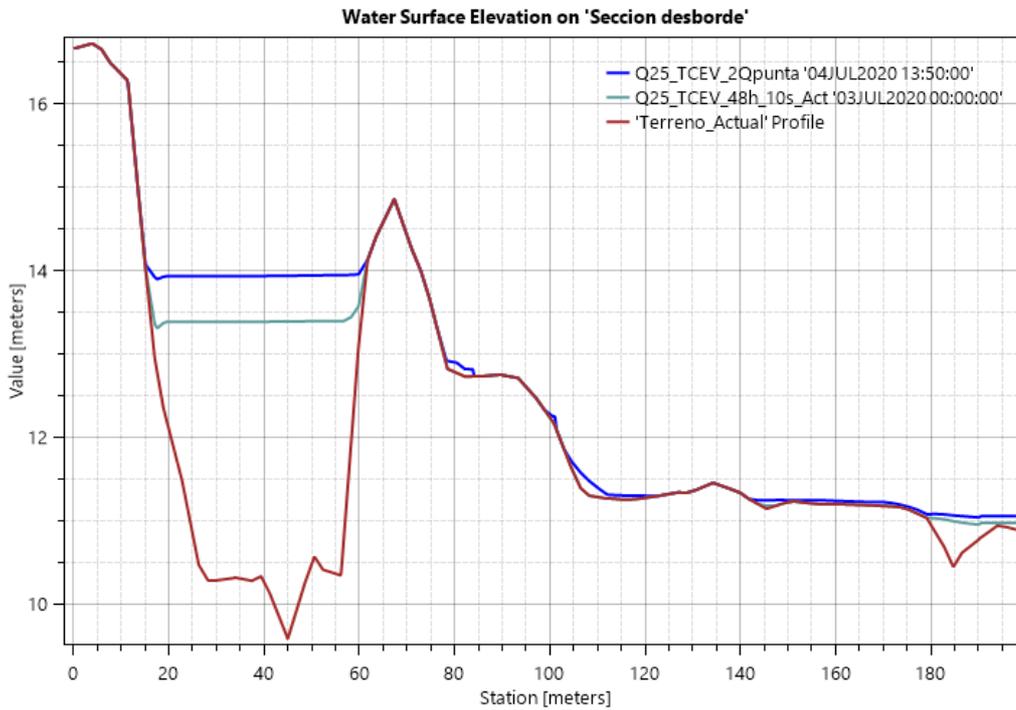


Figura 6.21 Superficie del agua. Sección desbordada

Por último, en la Figura 6.22 se muestra un instante correspondiente a la rama descendente de la segunda punta del hidrograma, la cual presenta una duración en torno a 48h. Como se puede comprobar, llega un momento en el que el flujo del río no desborda, ya que la capacidad de éste no se ve superada. Lo más destacable sería el leve aumento del nivel del cauce que, como cabría esperar por el aumento del flujo, es consecuencia del segundo pico del hidrograma.

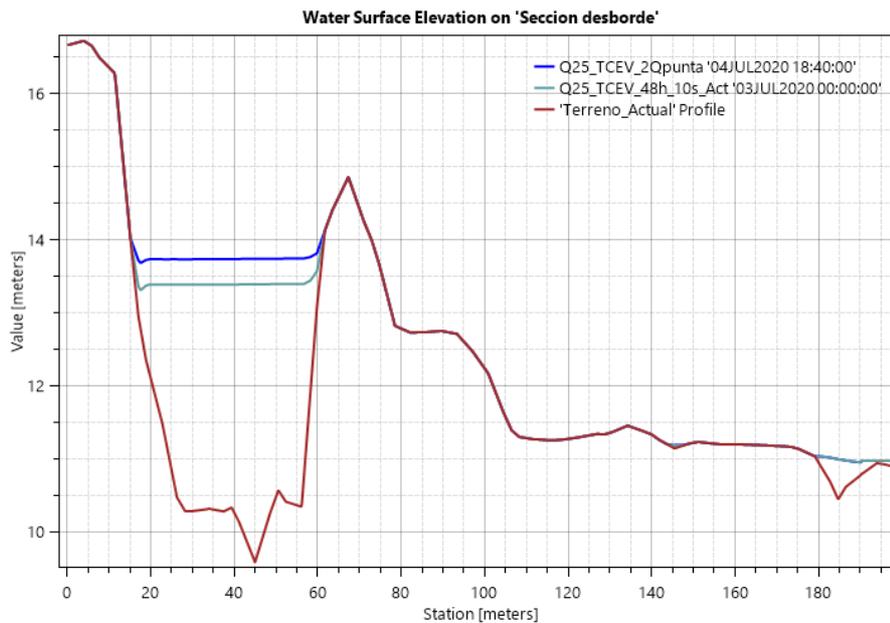


Figura 6.22 Superficie del agua. Sección desbordada

En conclusión, se puede afirmar, a partir de los resultados anteriores, que el hidrograma que presenta dos caudales punta no presenta gran importancia en el desbordamiento del cauce ni en la consecuente inundación del terreno. Por tanto, el caudal aportado por la Rambla Salada al río Segura no plantea un problema en la llanura de inundación.

Como se recordará del apartado 2, inicialmente se diseñó el encauzamiento del curso del río Segura a su paso por la comarca de la Vega Baja, con una capacidad de desagüe de unos 400 m<sup>3</sup>/s y un período de retorno de 50 años. Sin embargo, como se pudo comprobar durante diversos episodios de avenida, el río sufre desbordamientos con caudales menores a su supuesta capacidad de desagüe. Algunos expertos afirman que la capacidad del encauzamiento oscila entre 150 y 200 m<sup>3</sup>/s, lo cual parece concordar con el hecho de que para la primera punta el terreno quede inundado por el desbordamiento del río. Por el contrario, si bien el caudal punta de la segunda curva se encuentra dentro del rango mencionado, apenas parte del flujo discurre por la llanura de inundación, debido a que no ha visto superada aún la capacidad del encauzamiento. El flujo que sale es menor, lo que supone una variación importante de la superficie de la lámina de agua respecto a la ya existente, derivada de la primera punta.

Por esta razón, aludiendo a la escasa relevancia que este segundo hidrograma supone en los episodios de inundación del terreno, no se considerará para análisis posteriores, tales como el efecto del retranqueo de las motas, pues se ha visto el escaso flujo que se desborda en la segunda curva. Esto a su vez supondrá una mayor rapidez en las simulaciones hidráulicas, ya que el segundo hidrograma presenta un tiempo base de 120h, lo cual implica simulaciones hidráulicas que pueden conllevar demasiado tiempo.

## 6.5 Influencia de las motas. Período de retorno de 25 años

Una vez se ha determinado cuál es el hidrograma más representativo para el tramo de estudio, se dispuso a realizar las simulaciones hidráulicas para un período de retorno de 25 años. Hasta ahora las simulaciones realizadas se han llevado a cabo sobre el terreno original, ya que únicamente se pretendía comparar los distintos hidrogramas, con el fin de obtener aquel cuyos efectos presentasen una mayor relevancia.

No obstante, en este caso se han realizado simulaciones sobre la situación futura, en la que las motas originales han sido eliminadas y posteriormente retranqueadas hasta su ubicación final en los antiguos meandros del cauce. De esta forma, se podrán comparar los resultados correspondientes para cada situación y así se analizará el efecto que el retranqueo puede suponer durante las crecidas extraordinarias del río Segura.

Como se ha mencionado en otras ocasiones, se ha planteado el estudio del retranqueo para un período de retorno de 25 y 10 años únicamente, siendo ambos períodos de retorno bajos. Este último será analizado posteriormente. Para períodos superiores, como podrían ser 100 y 500, o incluso para 50 años, no se ha llevado a cabo simulaciones hidráulicas por diversas razones.

En primer lugar, la serie de caudales temporales obtenida a partir de los registros de la estación de aforo de Jacarilla abarcaba un período de 25 años, por lo que dicha serie resulta adecuada para estimar los caudales máximos asociados a períodos de retorno iguales o inferiores a éste. Por el contrario, para una probabilidad de ocurrencia menor, es decir, períodos de retorno mayores a 25 años, la incertidumbre que presenta la estimación de los caudales máximos adquiere una importancia cada vez mayor, a medida que el período de retorno aumenta. De esta forma, los caudales punta considerados son los correspondientes a 10 y 25 años.

Considerando lo anterior, tampoco sería demasiado relevante analizar el efecto de las motas para períodos de retorno superiores, ya que el régimen hidrológico tan extremo que presenta la cuenca del Segura hace que las inundaciones que tienen lugar sean de una magnitud tal que se produzca el desbordamiento completo del cauce y el terreno quede completamente anegado, por lo que el retranqueo de las motas ante estas situaciones resulta ineficaz. Por ello, se ha planteado esta actuación contra inundaciones como una medida para corto y medio plazo.

Una vez aclarados los aspectos anteriores, se dispone a realizar el análisis de resultados.

Primeramente, se muestran las llanuras de inundación correspondientes a la situación inicial y a la situación futura, a fin de proporcionar una idea de la extensión que alcanzaría el desbordamiento del río Segura sobre el territorio. Asimismo, en el terreno modificado, se han señalado las motas retranqueadas, para facilitar la ubicación de las mismas.

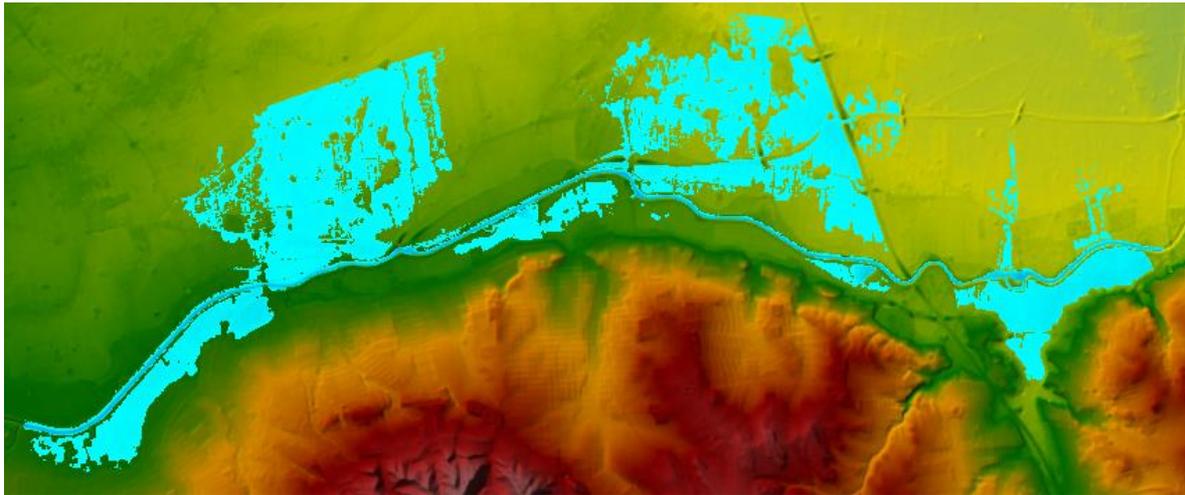


Figura 6.23 Llanura de inundación. Situación inicial

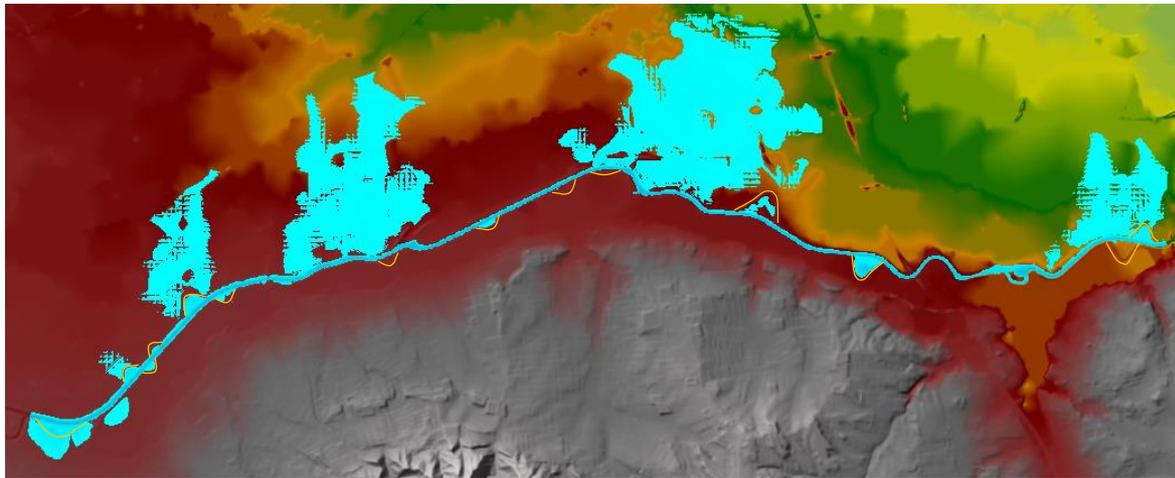


Figura 6.24 Llanura de inundación. Situación futura

Como se puede observar existen muchas similitudes entre los dos escenarios planteados, aunque varían en ciertos aspectos debido a que el terreno base ha sido modificado. Las motas originales han sido eliminadas a fin de rebajar la cota del terreno, favoreciendo así que el flujo del canal del río desborde por las márgenes en aquellos lugares donde se encuentran las motas retranqueadas. En total han sido 14 las motas que han sido trasladadas hacia una nueva ubicación. Para facilitar la comprensión de los resultados posteriores, es preciso recordar la enumeración de las motas retranqueadas, así como su localización dentro del tramo de estudio, lo cual se muestra en la Figura 6.25.



Figura 6.25 Ubicación de las motas retranqueadas en el tramo de estudio

El inicio del desbordamiento del río se produce a las siete horas del comienzo de la simulación, instante en el que algunas de las motas son capaces de retener el flujo del río, evitando que se inunde directamente el terreno. No obstante, como se comprobará en la Figura 6.26, existen otras motas que no influyen en el desbordamiento del río.

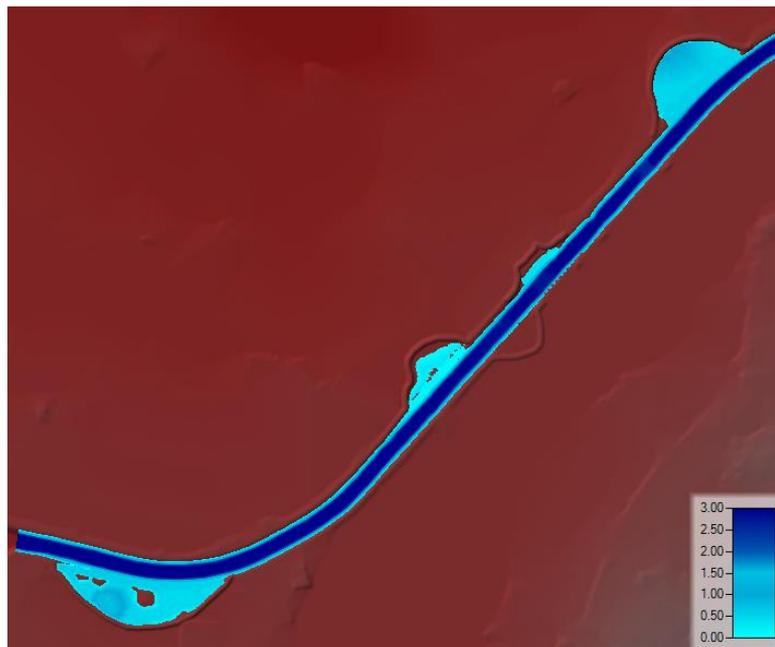


Figura 6.26 Motas inundadas. Comienzo de la simulación. Tramo inicial

Aguas abajo del río, gracias a la disposición de las motas en su nueva ubicación, éstas consiguen contener la mayor parte del caudal desbordado.

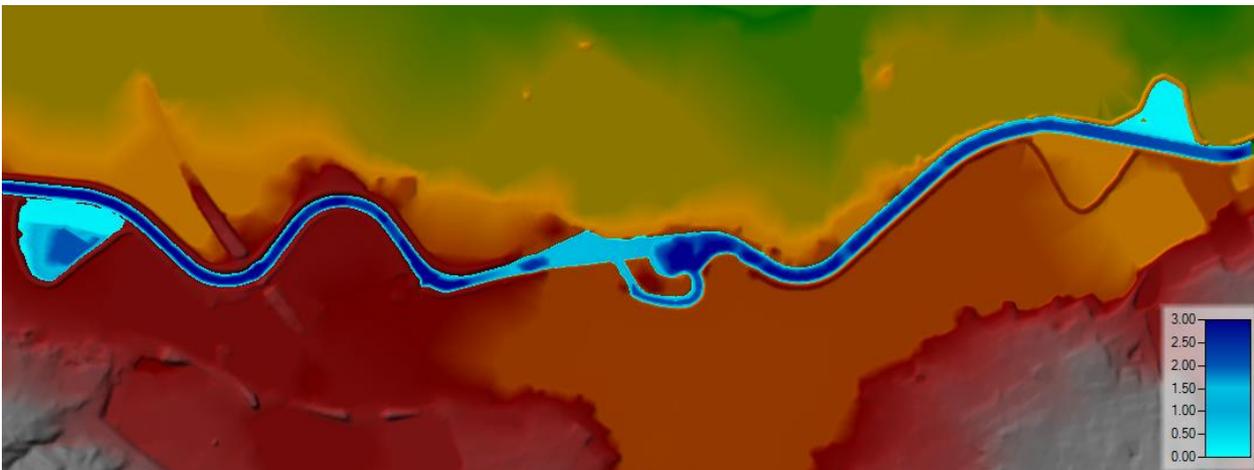


Figura 6.27 Motas inundadas. Comienzo de la simulación. Tramo final

Como se observa en las Figuras 6.26 y 6.27 se puede comprobar que durante las primeras horas de la simulación, muchas de las motas son capaces de retener el flujo que desborda, el cual llega a alcanzar en algunos casos valores por encima de 1 metro.

A medida que la simulación avanza, el caudal circulante aumenta y se produce el desbordamiento por distintos puntos del cauce, lo que conlleva la inundación del terreno contiguo al río. La mota situada al comienzo del área de estudio, mota 1, se inunda completamente, ya que las características del terreno y del flujo producen que el canal se desborde con más facilidad por esa zona, llegando a alcanzar calados superiores a 1 metro en los terrenos próximos a esta mota. De esta forma, se puede determinar que dicha mota no tendría gran influencia ante las crecidas del río.

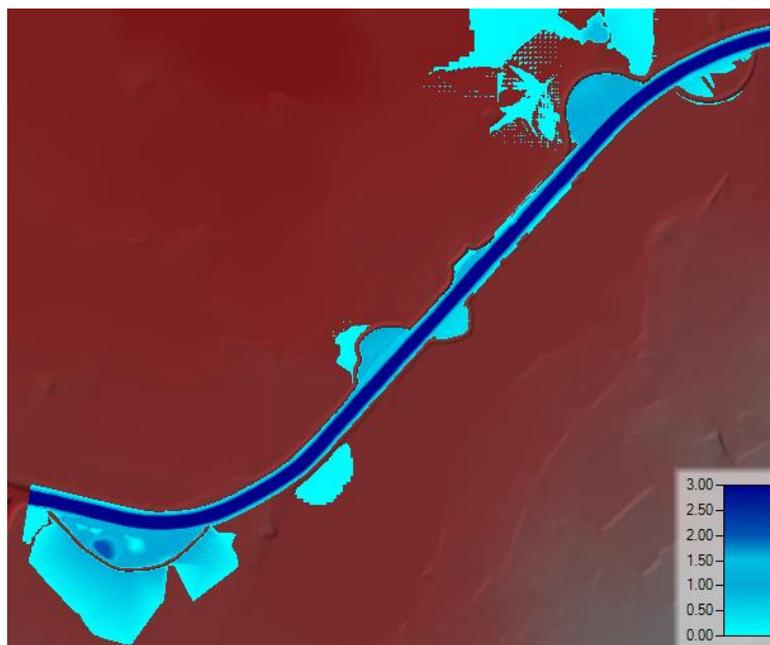


Figura 6.28 Motas inundadas. Tramo inicial

Sin embargo, en la Figura 6.28 se puede comprobar que aguas abajo, las motas dispuestas, motas 2, 3, 4, 5 y 14, en general retienen gran parte del flujo del río. En especial, las motas situadas en la margen izquierda consiguen que, a pesar de que el agua sobrepase su coronación, en la llanura de inundación el nivel no alcance valores relevantes, incluso por debajo de 0.1m, por lo que estarían cumpliendo eficazmente la función para las que fueron dispuestas. Esta situación se mantendrá durante toda la simulación.

En las Figuras 6.29 y 6.30 se muestran los perfiles de las motas 2 y 4, situadas en la margen izquierda del río. Se observa que el agua que pasa a la llanura de inundación no presenta valores significativos, permaneciendo la lámina de agua casi al mismo nivel que el terreno.

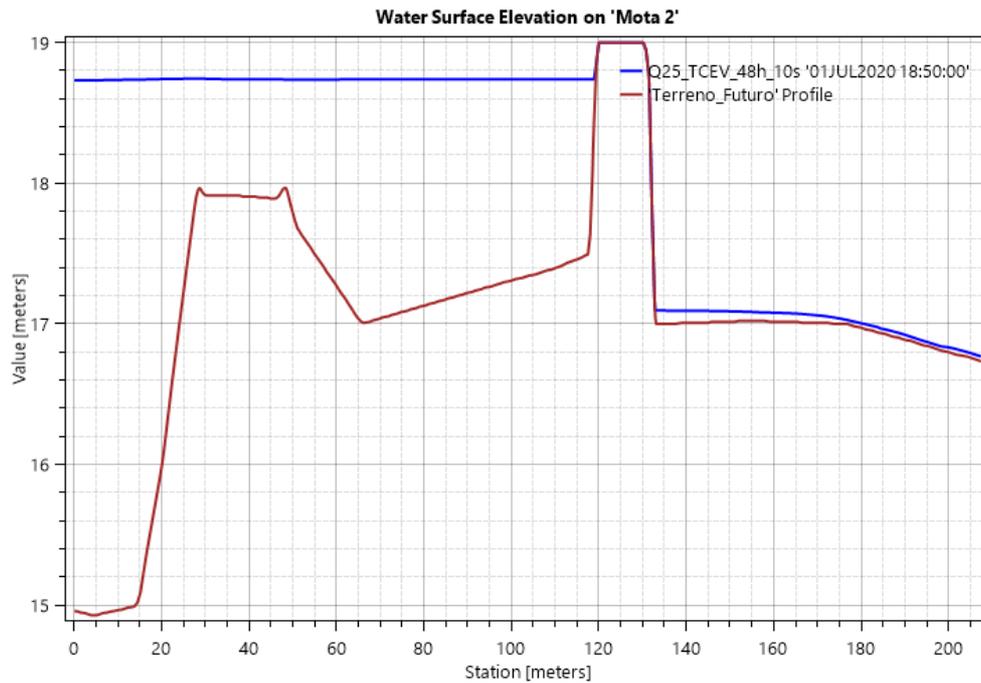


Figura 6.29 Mota 2

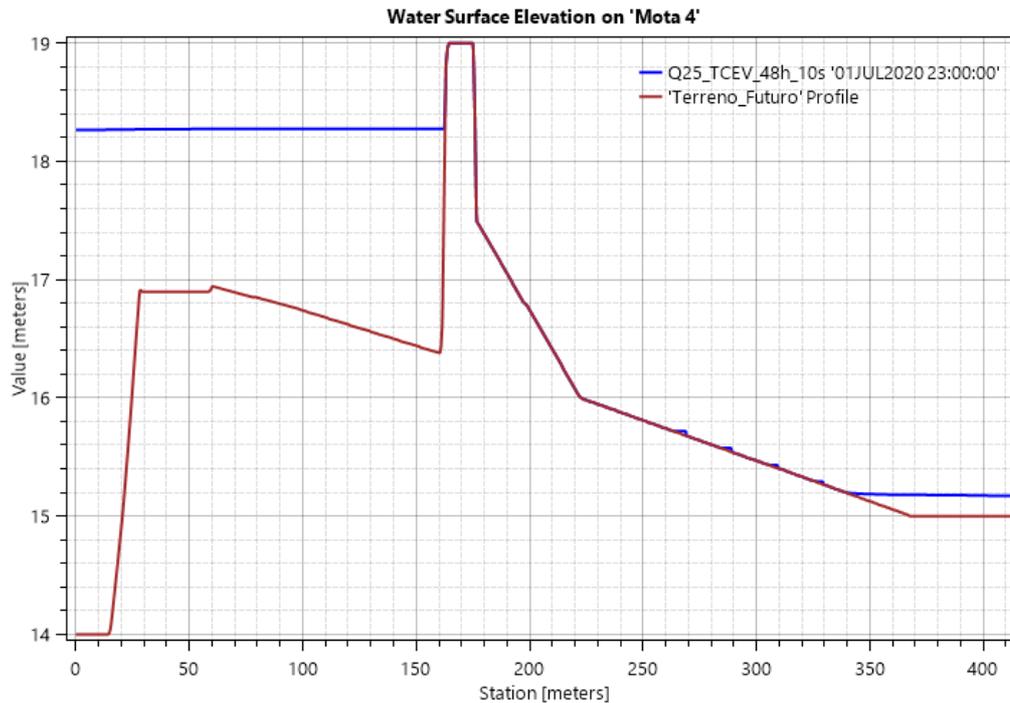


Figura 6.30 Mota 4

No obstante, es inevitable la inundación del terreno, principalmente en la margen derecha del cauce, donde la cota de coronación de las motas no presenta un obstáculo para el caudal circulante, finalmente desbordando cuando el hidrograma va alcanzando su pico.

Por tanto, el hecho de retranquear la mota 1 no supone una mejora respecto a la situación inicial, ya que finalmente se produce el desbordamiento por las zonas próximas a él. Por el contrario, el resto de las motas presentes al comienzo del tramo de estudio sí plantean una posible solución ante las crecidas del río, a pesar de que, como se ha comentado, la inundación de las parcelas más próximas al cauce no es posible evitarla debido a que el terreno presenta una pendiente muy baja y favorece el desborde del río, pero sí se consigue que los calados no tomen valores muy significativos, del orden de 0.25 m como máximo.

Por otra parte, en la Figura 6.31 se observan las velocidades que se dan en la llanura de inundación, pudiendo observar que éstas alcanzan valores en torno a 0.25-0.4 m/s como máximo, disminuyendo a medida que el flujo se aleja del río.

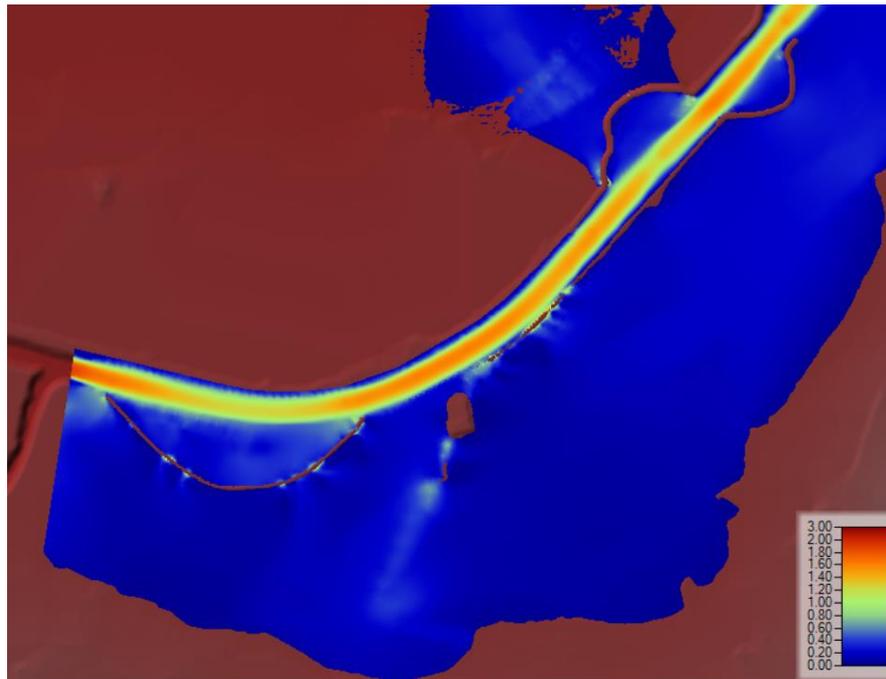


Figura 6.31 Velocidades. Tramo inicial

Teniendo en cuenta los valores de los calados y las velocidades que se dan en esta zona, la inundación que tiene lugar en esta zona no generaría afecciones graves en el terreno.

No obstante, el retranqueo de estas motas al comienzo del tramo contribuye a que el río tenga un espacio mayor para su desbordamiento durante las crecidas y además concentre durante ciertas horas el caudal en el área por delante de los muros de las motas, evitando la inundación del terreno.

Además de lo anterior, si se compara con la situación inicial (Figura 6.32), previo al retranqueo de las motas, existen numerosos puntos por los que el flujo encuentra una salida del cauce, mientras que una vez se han retranqueado las motas, parte del caudal circulante se acumula por delante de ellas, lo cual favorece que el flujo desborde y se concentre en un área en concreto. Un ejemplo claro de esto sería la zona en torno a la mota 1, que es por donde se produce el mayor desborde al comienzo del tramo, como se muestra en la Figura 6.28. Esto a su vez podría plantear una posible solución futura, en la cual en aquellas zonas donde se prevea un desbordamiento más acusado se dispongan más medios de contención ante las inundaciones, tales como un recrecimiento de las motas o un refuerzo de las mismas.

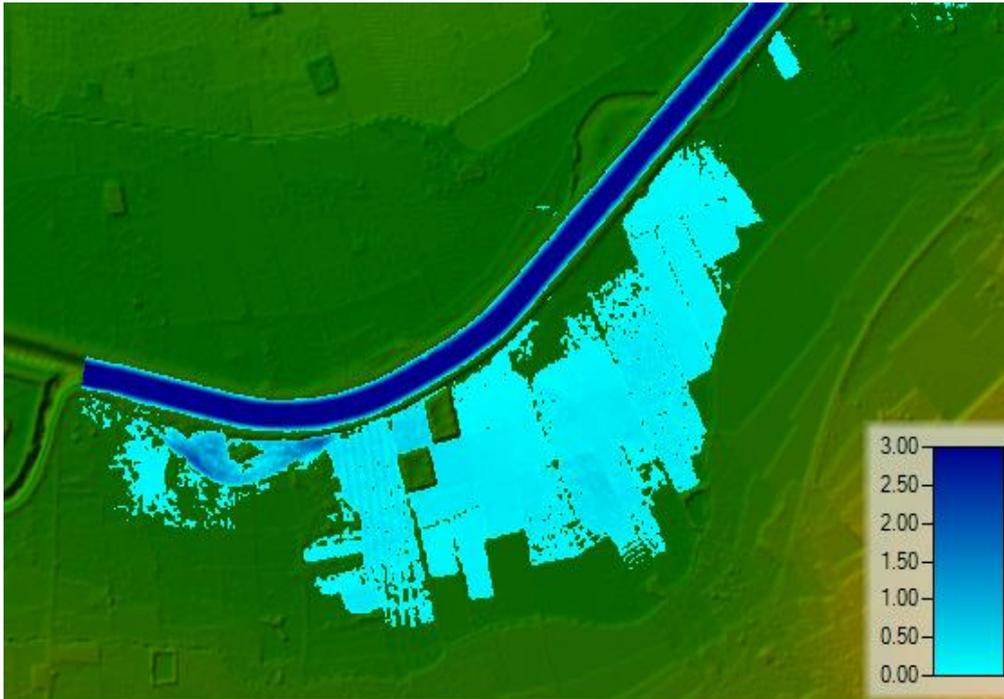


Figura 6.32 Desbordamiento zona inicial del tramo. Situación actual

Avanzando en el tramo de estudio se encuentran otras áreas donde el desbordamiento del río también se produce.

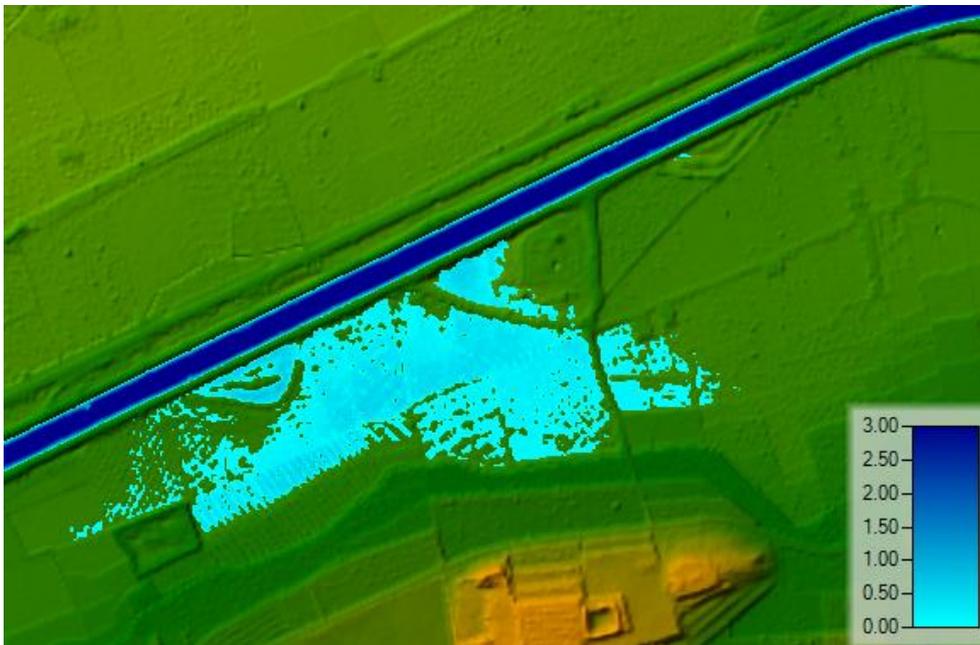


Figura 6.33 Terreno original. Tramo medio

Como se observa en la Figura 6.33, los espacios que ocupaban los antiguos meandros del cauce quedan afectados por el desbordamiento del río. Cabe destacar también que en el meandro de mayor tamaño se ha dispuesto una estación depuradora de aguas residuales, perteneciente al municipio de Algorfa, situado muy cerca del río Segura. La mota original no ha sido trasladada en este caso, ya que entonces la planta depuradora quedaría expuesta completamente durante las crecidas.

En este caso, el hecho de disponer las motas más lejos del canal del cauce supone una mejora considerable respecto a la situación inicial.

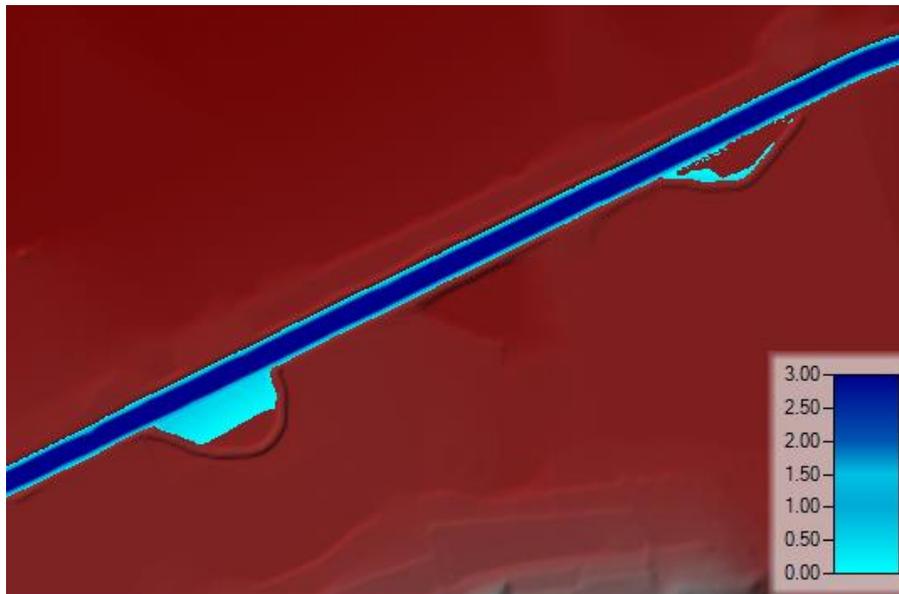


Figura 6.34 Terreno futuro. Tramo medio

Las motas que se muestran en la Figura 6.34 son las motas número 7 y 8. A diferencia del terreno original, aquí se puede comprobar que estas dos motas retranqueadas provocan que el río se desborde por los espacios situados por delante de ellas, produciendo que el resto del terreno, incluyendo la estación depuradora, no se vea afectado por el flujo desbordado.

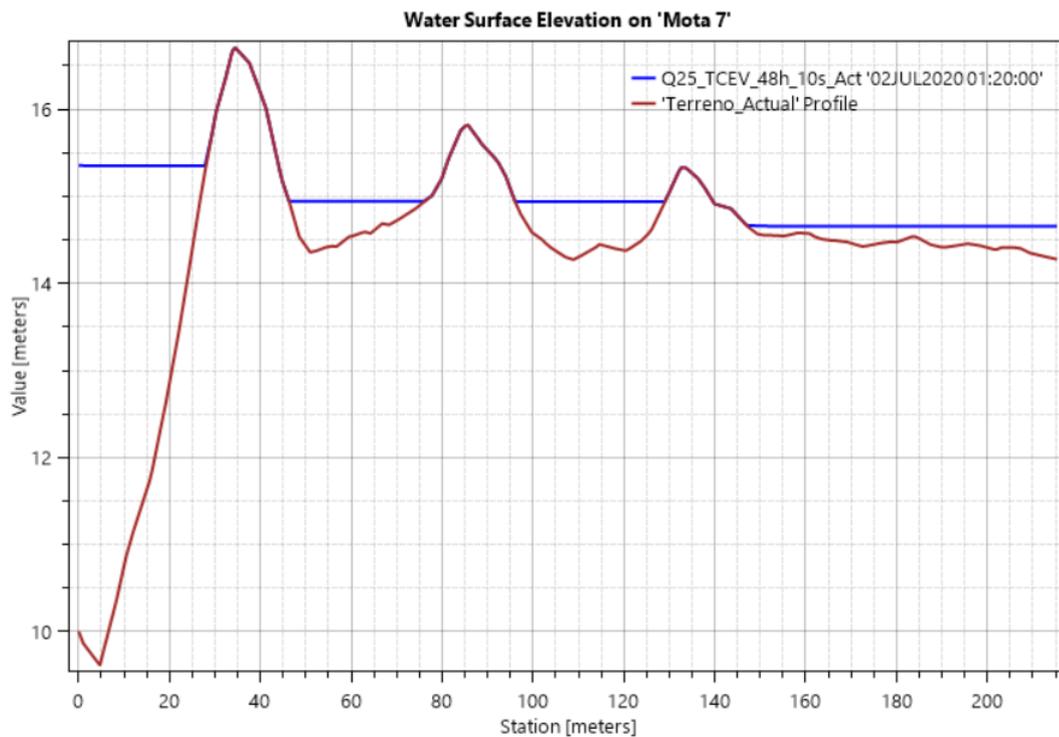


Figura 6.35 Elevación de la superficie del agua. Mota 7. Situación actual

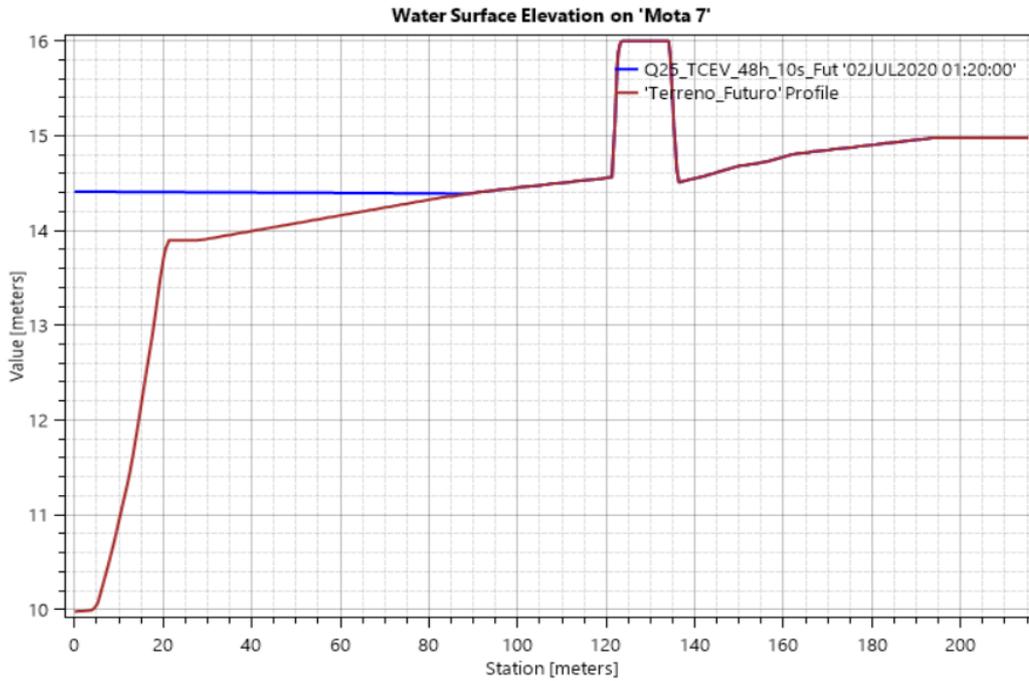


Figura 6.36 Elevación de la superficie del agua. Mota 7. Situación futura

Además, comparando con la situación inicial, se consigue reducir el calado del flujo, como se aprecia en la Figura 6.37. En la situación inicial, el calado alcanza un valor cercano a 6 metros, mientras que en la situación futura se reduce a los 4.5 aproximadamente, lo cual es considerable. Por tanto, el retranqueo de estas motas supondría una medida adecuada ante episodios de avenidas, evitando, a su vez, daños mayores para la localidad de Algorfa.

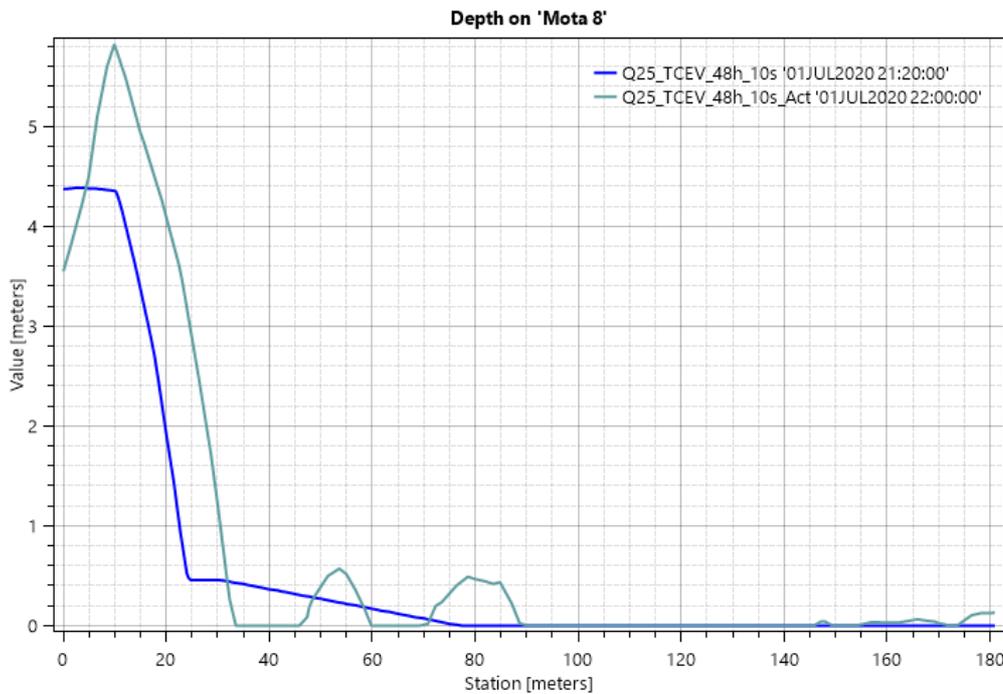


Figura 6.37 Calados. Mota 8

Aguas abajo de estas motas se encuentra el cruce entre las vías CV-91 y la CV-935, siendo éste zona el punto por donde se produce uno de los desbordamientos más importantes del cauce.

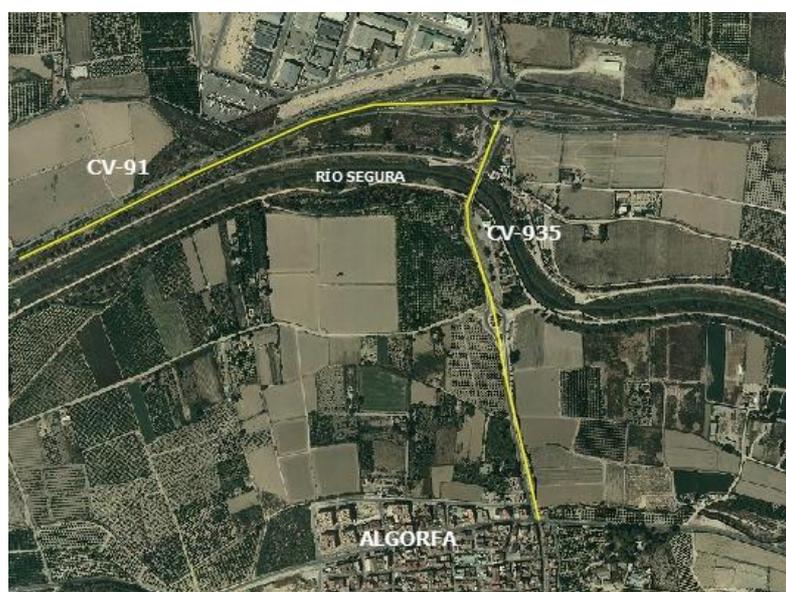


Figura 6.38 Cruce CV-91 y CV-935

En este tramo, la presencia de estas carreteras autonómicas no posibilita el retranqueo de las motas, ya que las vías, en especial la CV-91, quedaría afectada directamente ante cualquier leve desbordamiento que tuviera lugar. Debido a esto, se puede observar cómo la situación en ambos escenarios es similar, anegando completamente la llanura de inundación.

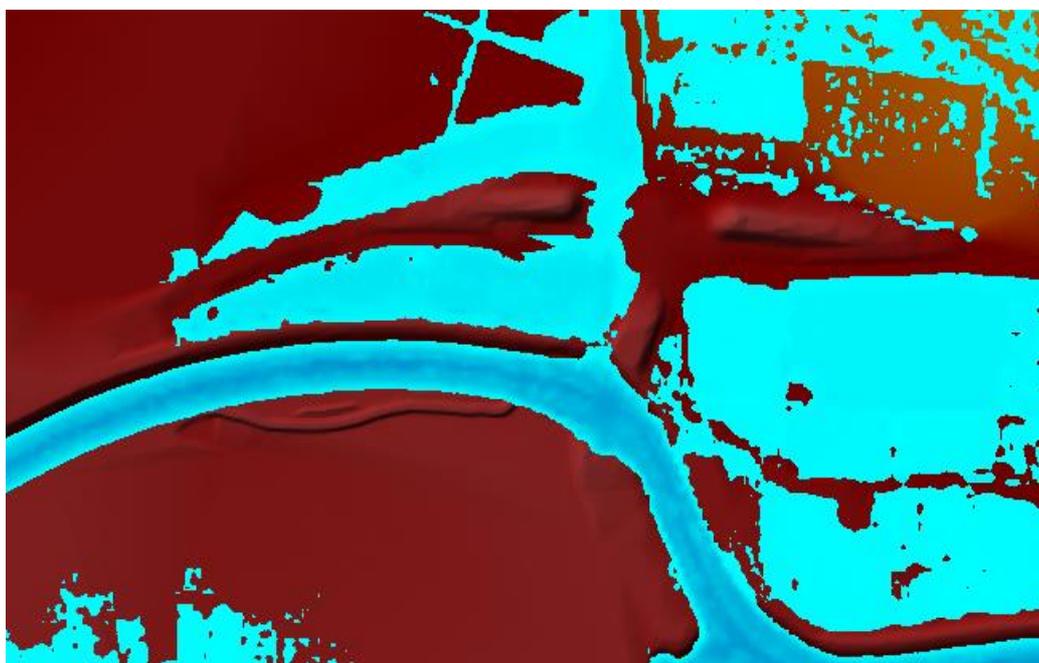


Figura 6.39 Desbordamiento en cruce CV-91 y CV-935

Tras este cruce, siguiendo el curso del río se encuentran las motas 10 y 11, las cuales, como se podrá comprobar en la Figura 6.40, quedan completamente inundadas.

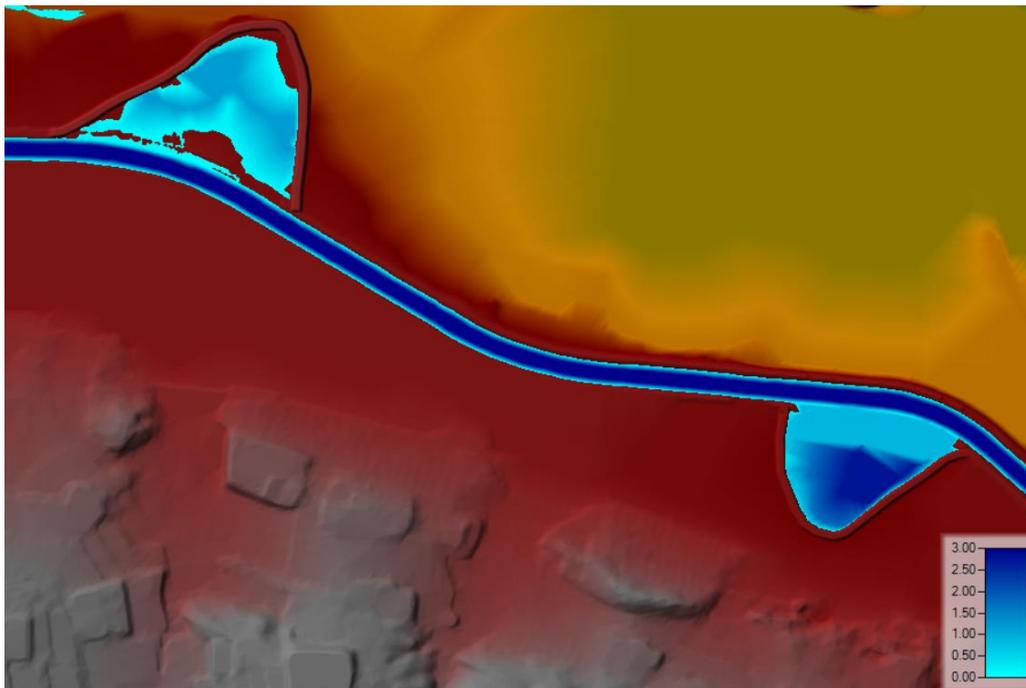


Figura 6.40 Motas 10 y 11 inundadas

La mota 10 comienza a inundarse de manera considerable a medida que la simulación se aproxima al pico del hidrograma y en las horas posteriores. El terreno tras esta mota se inunda debido al desbordamiento que tiene lugar en el cruce aguas arriba, mostrado anteriormente. Por tanto, si bien esta mota no evitaría que las tierras se vieran afectadas por la inundación, sí mitiga los efectos de la misma, ya que evita que parte del flujo del río no desborde, lo que contribuiría a una mayor elevación de la lámina de agua en el terreno.

Con respecto a la mota 11, ésta queda inundada rápidamente durante las primeras horas de la simulación, mucho antes de que el hidrograma alcance su punta. Esto se debe a que el terreno en esta zona presenta cotas más bajas que las parcelas contiguas a ella, por lo que el proceso inicial de eliminar la mota junto al río facilita la salida del flujo del cauce. Esto, unido a que la mota retranqueada presenta una elevación en torno a los dos metros con respecto al terreno, favorece ampliamente que el agua quede acumulada en esta zona, llegando a alcanzarse calados en torno a los 3 metros.

Si se compara con la situación inicial, se puede comprobar que en el resto del terreno no se produce la inundación, gracias a la implantación de la mota en su nueva ubicación.

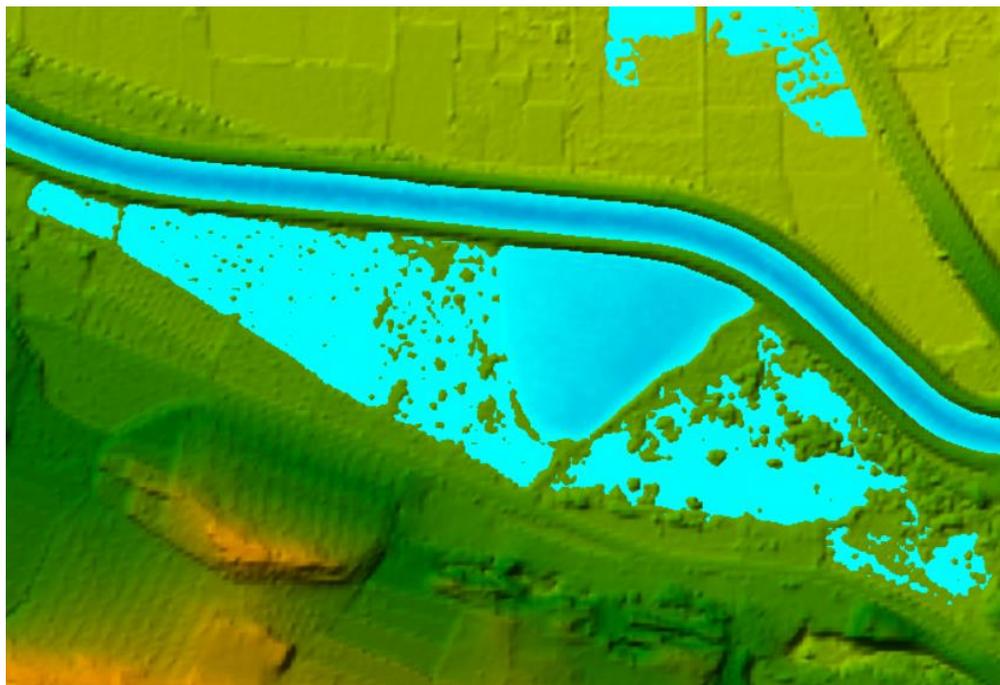


Figura 6.41 Terreno inundado. Mota 11 original

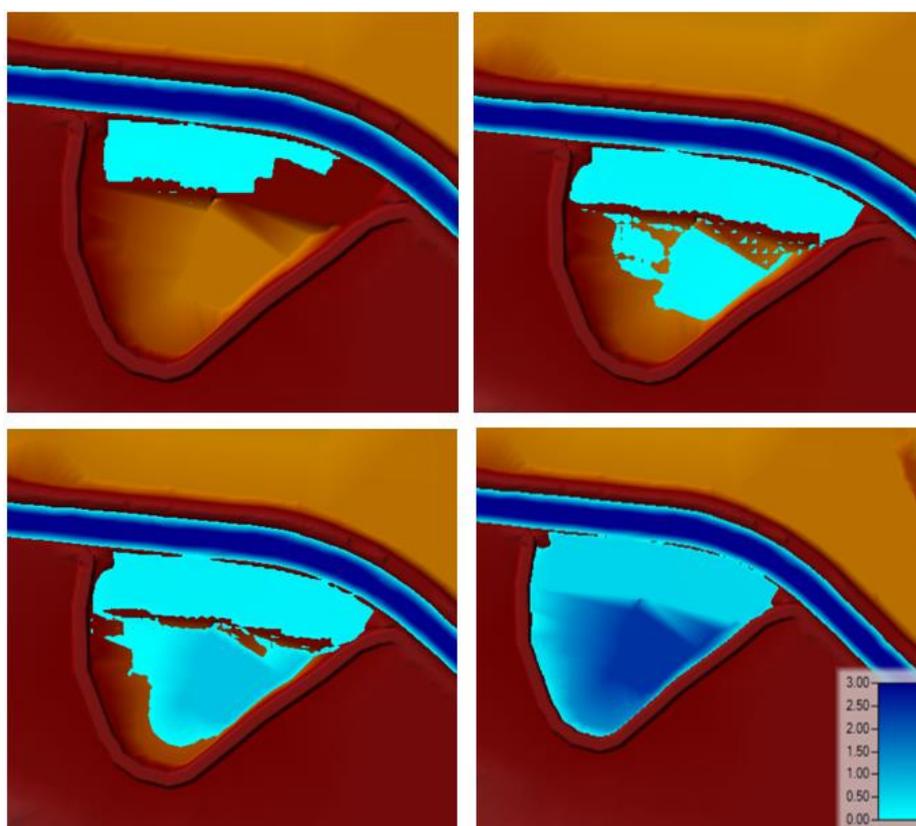


Figura 6.42 Evolución de la inundación. Mota 11

Por último, en la zona final del tramo de estudio se encuentran las motas 12 y 13, las cuales alteran ampliamente el modo en el que el río se desborda. Esta zona está más próxima a la desembocadura del Segura, por lo que la pendiente del terreno es aún más baja que aguas arriba del tramo.

Inicialmente, la llanura de inundación por la que se produce el desbordamiento en este caso corresponde con la margen derecha del río, afectando principalmente al municipio de Benijofar, incluso llegando a alcanzar profundidades próximas a 1 metro, lo que resulta en una cota de inundación considerable.

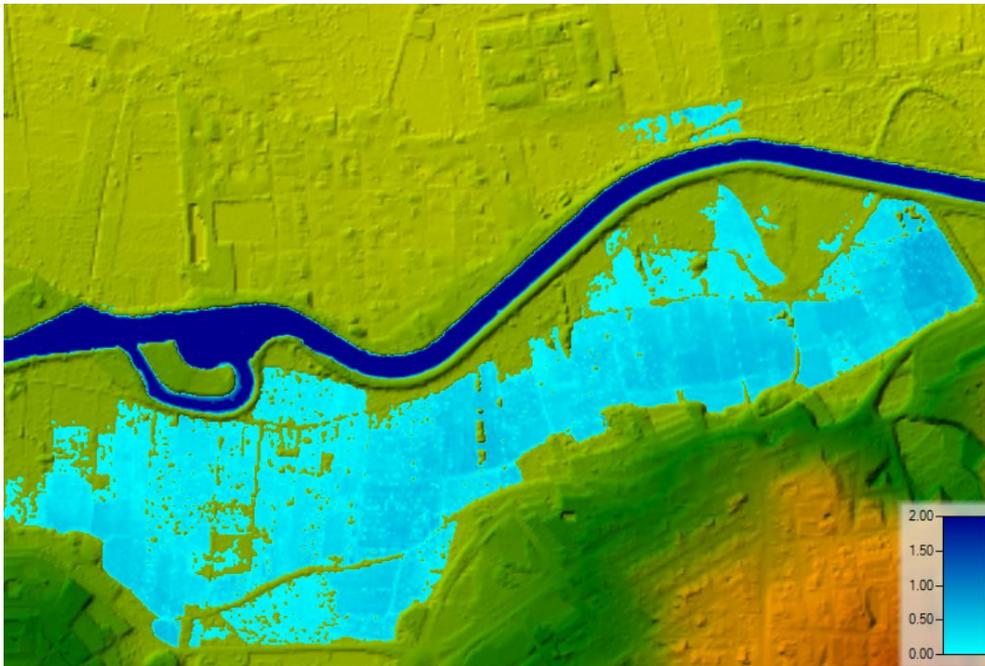


Figura 6.43 Llanura de inundación. Tramo final

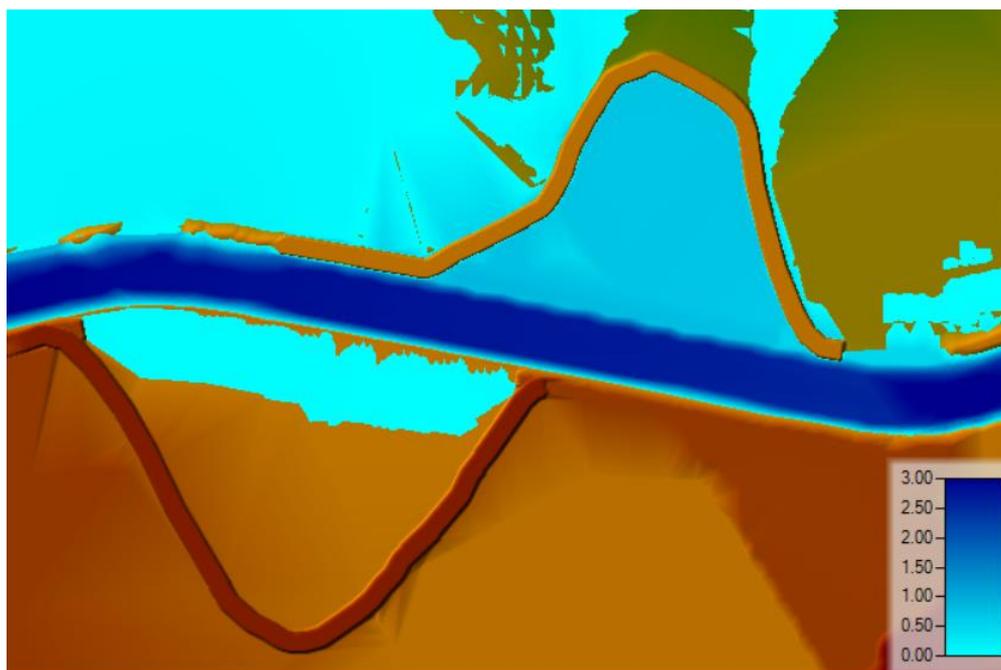


Figura 6.44 Motas 12 y 13

Debido a la eliminación de estas motas y su posterior retranqueo, las características del terreno en esta zona favorecen el desbordamiento del flujo por el lugar donde se encuentra la mota 13, consiguiendo a su vez que el calado en la llanura de inundación alcance valores muy pequeños, del orden de 0.1m como máximo. Si se compara con la situación inicial, en la que los calados podían tomar valores próximos a 1 metro, se puede determinar que el hecho de alejar las motas del cauce ha contribuido eficazmente a mitigar los efectos de las inundaciones, alcanzándose profundidades que únicamente supondrían leves afecciones sobre el terreno contiguo al cauce.

En la Figura 6.45 se observa el perfil de la lámina de agua retenida por la mota 13. Se puede comprobar que el flujo en la llanura de inundación, situada por detrás de la mota, no presenta una elevación significativa, discurriendo casi al mismo nivel que la cota del terreno.

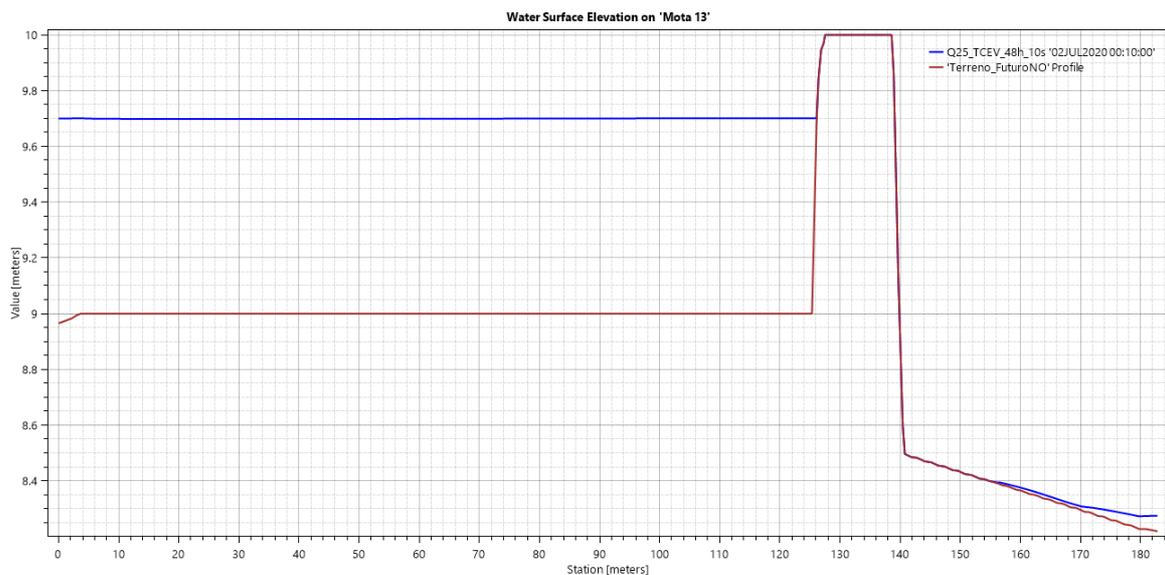


Figura 6.45 Elevación de la Superficie del Agua. Mota 13

Por otra parte, en la Figura 6.46 se observan las velocidades que tienen lugar en la llanura de inundación situada por detrás de la mota 13.

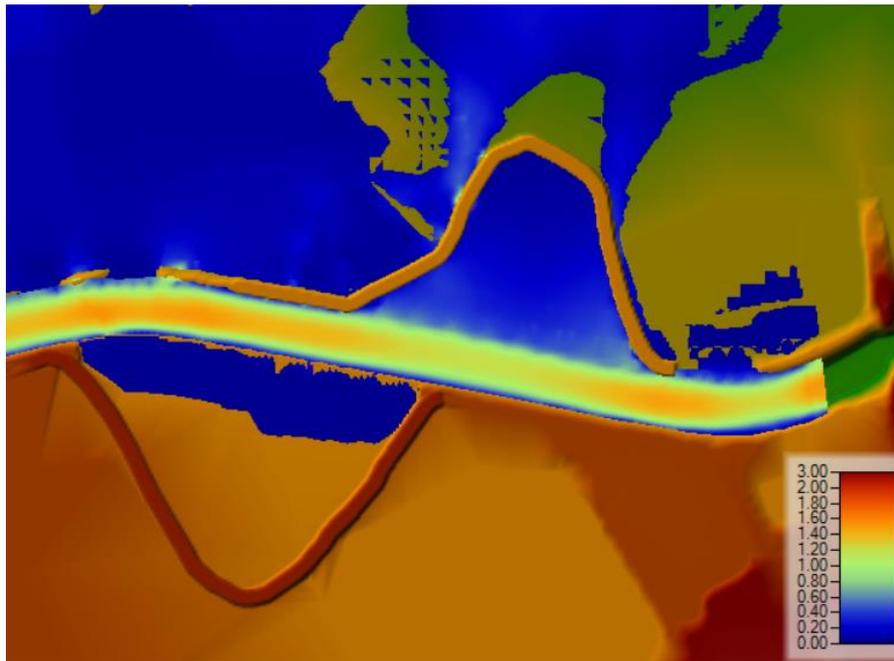


Figura 6.46 Velocidades. Tramo Final

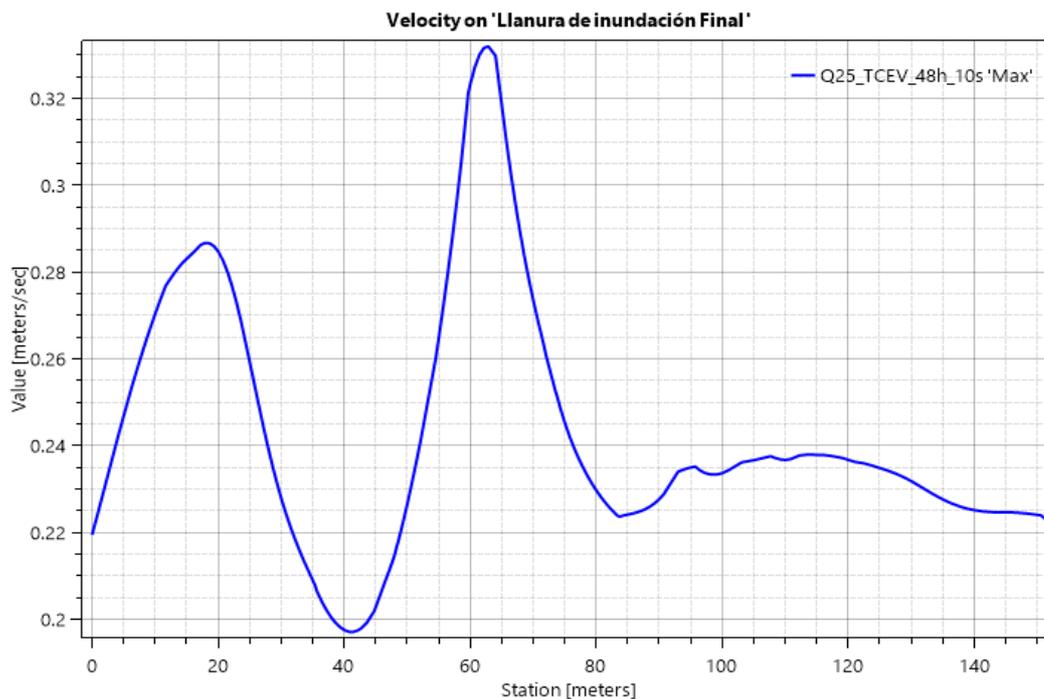


Figura 6.47 Velocidades. Llanura de inundación. Tramo final

La velocidad mayor que se daría sobre el terreno presenta un valor en torno a 0.3 m/s, lo que, unido a los calados bajos que se dan, supondrían afecciones leves en la llanura de inundación.

Asimismo, la mota 12 también contribuye, aunque en menor medida, a la retención del flujo, evitando que los terrenos por detrás de ella no se vean afectados por las inundaciones, como se puede ver en la Figura 6.44.

Por tanto, debido al retranqueo de las motas 12 y 13, se ha evitado que gran parte del flujo desborde por la llanura de inundación, evitando que los municipios situados en ella se vean afectados durante las crecidas del río. El flujo que se desborda no genera calados destacables.

Con ello quedaría analizado el efecto que el retranqueo de las motas supondría durante los episodios de avenida en el curso bajo del Segura.

Haciendo un balance final acerca de esta actuación, se ha podido comprobar que, principalmente en las áreas finales del tramo, las motas reubicadas han supuesto una notable mejoría respecto a la situación inicial, ya que su implantación ha conseguido retener una buena parte del flujo, contribuyendo a que en la llanura de inundación, en la que están presentes diversos municipios, los daños ante una crecida extraordinaria se vean mitigados, pues los calados máximos y las velocidades que se tienen lugar no presentan valores significativos, por lo que no se producirían afecciones importantes.

Con respecto al comienzo del tramo, en general, las motas retranqueadas no presentan una efectividad tan pronunciada, pues se produce un desbordamiento importante a pesar de la presencia de las motas, sobre todo en la margen derecha. Aun así, las motas dispuestas en dicha margen consiguen retener el flujo del río, aunque tan sólo sea durante un tiempo de la crecida, lo que contribuiría a retrasar la inundación del terreno y, por tanto, podría dar más tiempo para reaccionar y tomar medidas de emergencia ante esta situación. Las motas de la margen izquierda, por el contrario, consiguen que el flujo que circula por la llanura de inundación no alcance calados y velocidades muy elevados, por lo que afección de la inundación se vería mitigada notoriamente.

Aquellos puntos donde el desbordamiento del río es imposible de evitar, tales como el cruce entre las vías CV-91 y CV-935 y otras áreas, la actuación del retranqueo no presentaría una medida que mitigue los efectos, ya que las características de la zona propician la fácil inundación del terreno, por lo que será necesario tomar otro tipo de soluciones.

## 6.6 Influencia de las motas. Período de retorno de 10 años

Una vez analizado el efecto de las motas para un período de retorno de 25 años, que presentaría el caso más desfavorable de entre los dos períodos que se han considerado, se analizará qué ocurre para el caso de 10 años. De aquí en adelante se considerará el período de retorno de 25 años como “caso 1”, para diferenciarlo del que se está analizando en este apartado, que será denominado como “caso 2”

De nuevo, se compararán dos escenarios: uno inicial, en el que las motas no han sido retranqueadas, denominado como “situación actual”; y un escenario final, denominado como “situación futura”, en el que las motas ya han sido trasladadas a su ubicación final.

Como cabe esperar, para este caso, el caudal punta es mucho menor que el correspondiente al caso 1, tomando ahora un valor de 169.65 m<sup>3</sup>/s frente a 283.66 m<sup>3</sup>/s del caso anterior. Por ello, es previsible que en la llanura de inundación los calados presenten valores mucho menos elevados, ya que la capacidad del río no se ve tan superada como ocurre con períodos de retorno mayores.

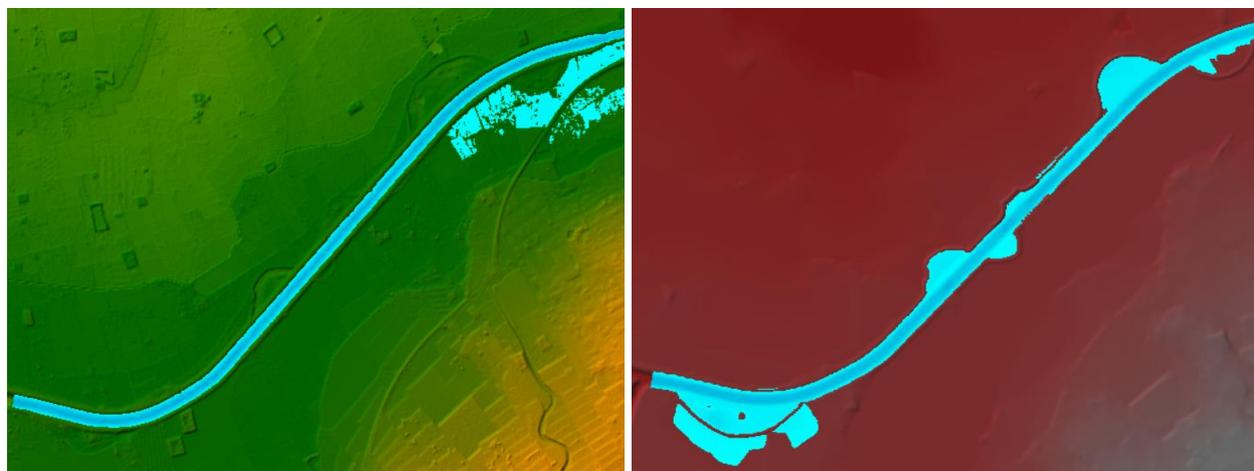


Figura 6.48 Situación actual (derecha) y futura (izquierda). Tramo inicial

Como se muestra en la Figura 6.48, la mota 1 no presenta una buena medida contra las inundaciones, pues si

bien retiene parte del flujo, en el escenario inicial no se producía desbordamiento alguno en este punto, por lo que se debería descartar su implantación, ya que para el caso 1 también suponía un punto importante por donde el flujo salía del cauce. Sin embargo, se puede comprobar que las motas retranqueadas aguas abajo sí garantizan la retención del flujo, evitando que éste se desborde por las tierras en torno al río. Por tanto, cumplirían con el objetivo que se pretende alcanzar, que es devolverle parte de su antiguo espacio natural al cauce y mitigar los efectos de las crecidas.

Por otra parte, la mota 7, próxima a la estación depuradora de Algorfa, retiene parte del flujo del cauce, aunque, a diferencia del caso 1, el espacio por delante de ella no se llena completamente, debido a que el caudal circulante no supera la capacidad del encauzamiento. Si bien en esta zona no se produce un desbordamiento significativo, el hecho de retranquear la mota puede proporcionar mayor espacio al río y, además, considerando los efectos positivos que se conseguían para el caso 1, en los que retenía todo el flujo desbordado del cauce, podría ser una buena actuación ante las avenidas del río.

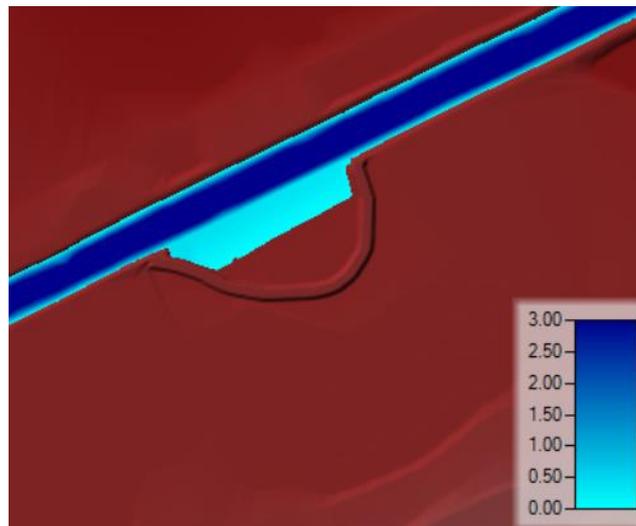


Figura 6.49 Mota 7. Período de retorno 10 años

Análogamente a lo que ocurría en el caso 1, el cruce entre las carreteras autonómicas CV-91 y CV-935 es una zona donde se produce el desbordamiento rápidamente. La presencia de estas vías impide el retranqueo de las motas, por lo que no se ha podido llevar a cabo ninguna actuación para recuperar el espacio fluvial.

Aguas abajo, las motas 10 y 11 de nuevo se inundan completamente, impidiendo que el flujo pase a las tierras por detrás de ellas, contribuyendo por tanto a mitigar los efectos de las inundaciones. De nuevo, debido a que el terreno presenta una pendiente muy baja, favorece que el agua quede retenida por delante de las motas, ya que éstas, al presentar una cierta elevación sobre la superficie, forma una barrera que protege a las tierras situadas por detrás de ellas.

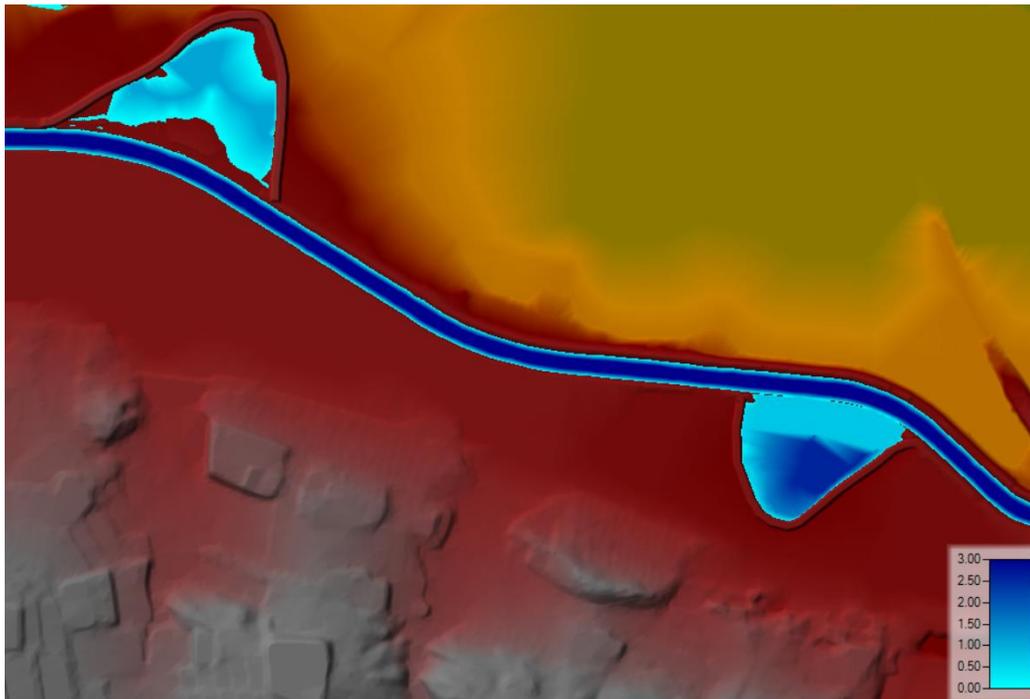


Figura 6.50 Motas 10 y 11. Período de retorno 10 años

Por último, al final del tramo de estudio se encuentran las motas 12 y 13. El desbordamiento en la situación previa al retranqueo se generaba principalmente en la margen derecha del río, llegando a alcanzar valores próximos a 1 metro de profundidad en la llanura de inundación.

El retranqueo de motas en esta zona ha conseguido mitigar considerablemente los efectos de la inundación. Si bien se podrá observar en la Figura 6.51 que el desbordamiento tiene lugar en la margen izquierda, éste se debe a posibles defectos del terreno modificado, pues existen huecos en la estructura de las motas que facilitan el paso del flujo. A pesar de ello, los calados que se dan en la llanura de inundación no alcanzan siquiera valores de 0.1 metros, lo que no supondría una inundación relevante.

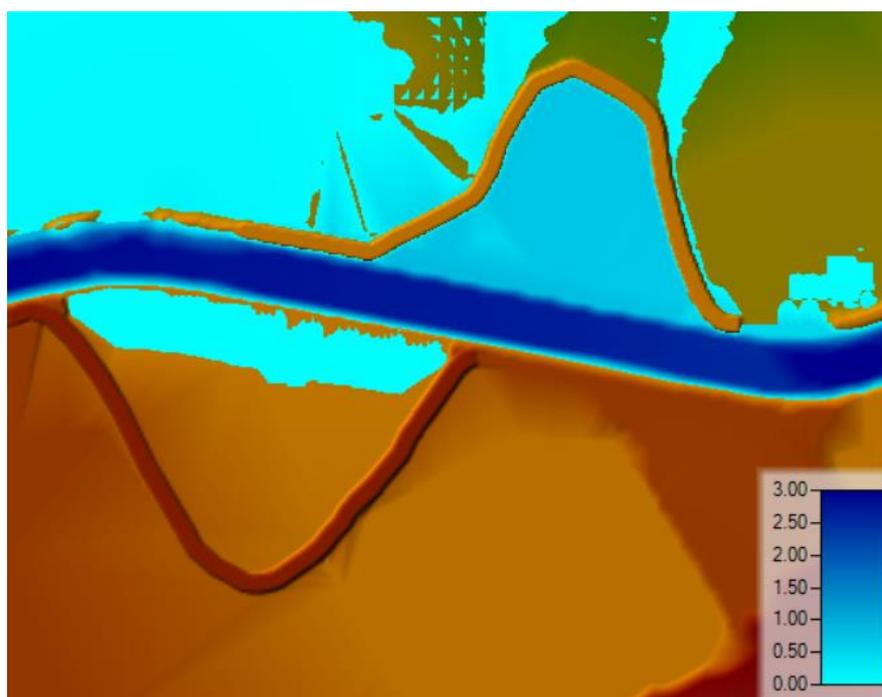


Figura 6.51 Motas 12 y 13. Período de retorno 10 años

Para un período de retorno de 10 años se ha podido comprobar que, en general, las inundaciones que tienen lugar no provocan situaciones tan graves como las que podrían producirse para el período de retorno de 25 años, en la que el desbordamiento del río sí suponía un problema importante en el curso bajo del Segura.

En conclusión, ha quedado demostrada la influencia que supondría el retranqueo de las motas en gran parte del tramo de estudio, ya que la llanura de inundación no se ve afectada de igual manera que en la situación original. Para los dos períodos de retorno considerados las motas cumplen el objetivo que se pretendía, es decir, contener el flujo de las inundaciones, mitigando sus efectos y contribuyendo a la recuperación del espacio fluvial. Si bien en ciertas zonas del tramo de estudio no se ha podido evitar el desbordamiento, sí ha sido posible reducir considerablemente los calados que tendrían lugar en la llanura de inundación, tomando valores que no implicarían graves daños a las parcelas y a los municipios próximos al río Segura.

## 6.7 Movimiento de tierras del proceso de retranqueo

Toda obra realizada sobre el terreno supone una modificación del mismo y, por tanto, será necesario llevar a cabo trabajos de desmonte y terraplén.

Por una parte, el volumen de tierras de desmonte se encuentra presente principalmente en el proceso inicial de la eliminación de las motas originales ya que, como se ha explicado anteriormente, en primer lugar, se ha allanado el terreno original mediante la implantación de obras lineales, por lo que para ello ha sido necesario eliminar aquellos terrenos más elevados, correspondientes a las motas, predominando por tanto los volúmenes de desmonte.

En segundo lugar, una vez se han eliminado las motas originales, se llevará a cabo el proceso de retranqueo, el cual consistirá en trasladar la estructura de las motas hacia una nueva posición, la cual en este caso se ha decidido que ocupen el espacio de los antiguos meandros, a fin de recuperar el espacio natural del antiguo cauce. Este proceso exigirá volúmenes de tierra para generar las estructuras de las motas retranqueadas. Puesto que se trata de la misma zona del cauce, en esta fase se podrá utilizar el material retirado de las motas originales, a fin de abaratar los costes del supuesto proyecto. Por consiguiente, el volumen de tierra predominante en este caso sería de terraplén.

Los datos de movimientos de tierra mostrados se han obtenido a partir de Autocad Civil 3D, el cual, mediante la herramienta *Centro de controles de volúmenes* permite analizar el volumen de tierra comparando una superficie base con otra.

La Tabla 6.3 muestra los volúmenes de tierra de desmonte o terraplén correspondientes a cada una de las obras presentes en el tramo de estudio. De esta forma, se proporciona el balance final de movimientos de tierra.

Tabla 6.3 Volúmenes de desmonte y terraplén

	Corte (m <sup>3</sup> )	Relleno (m <sup>3</sup> )	Balance (m <sup>3</sup> )
Mota 1	7202.96	7149.91	53.05 (Desmonte)
Mota 2	1756.98	9027.46	7270.48 (Terraplén)
Mota 3	1162.28	5015.97	3853.69 (Terraplén)
Mota 4	6463.54	12308.69	5845.15 (Terraplén)
Mota 5	1778.97	4344.54	2565.57 (Terraplén)
Mota 6	649.87	6315.67	5665.8 (Terraplén)

Mota 7	7994.38	5937.07	2057.31 (Desmote)
Mota 8	987.44	3416.05	2428.61 (Terraplén)
Mota 9	2118.68	3938.58	1819.9 (Terraplén)
Mota 10	2537.38	45703.57	43166.19 (Terraplén)
Mota 11	14715.49	21231.76	6516.27 (Terraplén)
Mota 12	10435.2	7231.66	3203.54 (Desmote)
Mota 13	2020.12	6638.37	4618.25 (Terraplén)
Mota 14	894.61	2740.21	1845.6 (Terraplén)
		Balance total (m <sup>3</sup> )	80281.61 (Terraplén)

De esta forma, teniendo en cuenta los resultados de desmote y terraplén mostrados en la tabla anterior, se puede calcular el volumen de tierra en desmote o terraplén que se obtiene mediante el balance de masas entre todas las motas del tramo. En este caso, se ha determinado un balance final de 80281.61 m<sup>3</sup> de terraplén, lo cual indica que se necesitará de volúmenes de préstamos procedentes de alguna cantera cercana, ya que el volumen de tierras procedentes de la eliminación de las motas originales (desmote) no sería suficiente para cubrir el área de relleno para las estructuras de las motas retranqueadas.

El balance neto de tierras presenta un valor tan grande debido al retranqueo de ciertas motas, tales como la 4, 10 y 11 principalmente, pues la superficie que abarcan, así como la cantidad de tierras de relleno que precisan se encuentra muy por encima del resto de motas. Si se comparan con el resto de las estructuras, presentes en el tramo, se puede comprobar que el balance de tierras de desmote y terraplén estaría más compensado entre sí, por lo que el balance final no alcanzaría tal magnitud.

Por otra parte, el balance finalmente obtenido concuerda con lo que cabría esperar, ya que los volúmenes de desmote del proceso de eliminación de motas presentan en general un valor menor con respecto al retranqueo de las motas, ya que éstas presentan en muchos casos una longitud y superficies considerables, además de exigir grandes cantidades de material de relleno.

## 6.8 Superficie del terreno a expropiar

Actualmente, los espacios que ocupaban los antiguos meandros se han convertido en parcelas destinadas a diversos usos, desde cultivos hasta zonas recreativas. Por tanto, la actuación de retranqueo de las presentes motas hacia su nueva posición precisaría de la expropiación de estas parcelas para devolverlas de nuevo a su uso original, formando parte del espacio natural del cauce.

Muchos de estos meandros se ubican dentro de la denominada como zona de policía, aquella zona de 100 metros de anchura medidos a partir del cauce. No obstante, esta zona puede ampliarse, si fuera necesario, para incluir otras zonas donde el flujo se concentre preferentemente, con el fin de reducir el riesgo de producción de daños. Toda actividad que suponga la modificación del espacio fluvial queda sometido al Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

La ejecución de cualquier obra o actividad en la zona de policía de cauces precisará la previa autorización administrativa por parte del organismo de la cuenca en cuestión, en este caso la Confederación Hidrográfica del Segura.

A través de la Dirección General del Catastro ha sido posible obtener la superficie de cada una de las parcelas

que conforman los antiguos meandros, así como el uso para que presentan en la actualidad. De esta forma, se proporcionará una idea aproximada acerca de la superficie de terreno que será necesario expropiar para llevar a cabo esta actuación en el curso bajo del Segura.

A continuación, en la Tabla 6.4 aparecen recogidas la superficie de estas parcelas, sus actuales usos y el número de mota que correspondería a cada parcela.

Tabla 6.4 Superficie a expropiar. Fuente: Dirección General del Catastro

Mota	Referencia catastral	Superficie (m <sup>2</sup> )	Municipio	Provincia	Clase	Uso principal
1	03080A002090470000PX	15221	Jacarilla	Alicante	Rústico	Agrario
2	03099A089090170000TL	9072	Orihuela	Alicante	Rústico	Agrario
3	03099A077090220000TJ	30761	San Bartolomé (Orihuela)	Alicante	Rústico	Agrario
4	03024A005090210000LW	43634	Barracones (Benejúzar)	Alicante	Rústico	Agrario
5	03024A005090220000LA	37541	Benejúzar	Alicante	Rústico	Agrario
6	03099A091090030000TB	11647	Orihuela	Alicante	Rústico	Agrario
7	03015A007090070000KY	11578	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
8	03015A008090190000KP	2997	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
9	03015A008090270000KO	19763	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
10	03015A003001800000KQ	9033	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
	03015A004001980000KD	47734	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
11	03015A005090110000KI	32033	Almoradí	Alicante	Rústico	Agrario
12	03070A004090110000TH	47755	Formentera del Segura	Alicante	Rústico	Agrario
13	03113A007000080000XH	17492	Rojales	Alicante	Rústico	Agrario
14	03099A089090310000TX	4047	Orihuela	Alicante	Rústico	Agrario

Se entiende por suelo de naturaleza rústica aquel que no sea considerado catastralmente como de naturaleza urbana, ni tampoco esté integrado en un bien inmueble de características especiales. A diferencia del suelo urbano, la clasificación de suelo rústico limita las construcciones sobre su extensión.

Como se observa en la Tabla 6.4, todas las parcelas tienen como uso principal actividades agrarias, aunque se ha podido comprobar en la sede del Catastro, que a día de hoy no han sido utilizadas para tal fin, a excepción de la parcela correspondiente a la mota 10, que sí presenta cierto rendimiento de producción agrícola.

# 7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

---

Una vez se han obtenido y analizado los resultados en el apartado 6, se han podido sacar algunas conclusiones acerca del retranqueo de las motas en el curso bajo del Segura.

## 7.1 Conclusiones

Con las simulaciones que se han llevado a cabo mediante el uso de HEC-RAS se ha pretendido conocer más a fondo el grave problema al que esta zona de la península ha de enfrentarse, pues el régimen hidrológico extremo, unido a las características físicas de esta cuenca, han hecho que se deban tomar una serie de medidas para paliar los efectos adversos que se generan.

A partir de los modelos de inundación obtenidos se ha podido determinar la forma en que el terreno se ve afectado por los episodios de crecida del cauce, localizando aquellos puntos en los que el río sufre un desbordamiento más relevante.

Conviene recordar que las actuaciones realizadas pretenden dar una solución viable ante las inundaciones de períodos de retorno bajos. Para períodos superiores esta actuación no supondría una alternativa a considerar, ya que los caudales para estos casos presentan una magnitud tal que supone la completa anegación de la llanura de inundación, con daños muy severos.

A modo de resumen, se exponen a continuación las conclusiones que se han extraído de los resultados conseguidos.

- Estudio de los caudales instantáneos de la comarca Vega Baja del Segura. A partir del ajuste mediante funciones estadísticas específicas que caracterizaban mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca, se pudo obtener los caudales punta para determinados períodos de retorno. Se pudo comprobar que la serie temporal de caudales obtenidos a partir de la estación de aforo no presentaba una longitud suficiente para determinar de manera precisa el caudal punta de períodos de retorno superiores a 25 años.
- Análisis de sensibilidad del tiempo base del hidrograma. Puesto que se desconocía el tiempo base correspondiente a los hidrogramas en el curso bajo del río se realizaron una serie de simulaciones introduciendo en HEC-RAS hidrogramas con distintos tiempos base, a fin de obtener el más característico. Posteriormente, se han examinado los resultados obtenidos, pudiendo determinar que el hidrograma con un tiempo base de 48 horas la inundación del terreno presentaba valores más relevantes.
- Modificación del terreno original mediante Autocad Civil 3D. En primer lugar, se eliminaron las motas en determinados puntos del cauce, a fin de recuperar el espacio de los antiguos meandros. A continuación, se implantaron las nuevas motas, y con ello se obtuvo el modelo del terreno modificado.
- Simulación hidráulica en el terreno modificado. De nuevo, mediante HEC-RAS se ha generado un modelo de inundación, a fin de analizar los efectos de las motas retranqueadas ante episodios de crecidas extraordinarias.

De esta forma, se pudo comprobar que el retranqueo de las motas puede suponer una medida viable a considerar para mitigar los efectos en la llanura de inundación. Gran parte de las motas son capaces de retener el flujo, evitando su desbordamiento por el terreno, o bien, en otros casos, a pesar de que el agua inunda el terreno, las motas consiguen que la elevación de la lámina de agua no alcance valores significativos, por lo que, a lo sumo, supondría una afección muy leve sobre las parcelas contiguas al cauce.

No obstante, también existen otras motas cuyo retranqueo no mitiga los efectos de las inundaciones, como es el caso de la mota 1. En este punto, el río no presenta capacidad suficiente para contener el caudal circulante, por

lo que se produce un desbordamiento considerable, ante el cual la mota retranqueada finalmente es superada por el flujo. A pesar de ello, durante un cierto período de tiempo de la simulación se pudo comprobar que retenía parte del agua desbordada, lo que podría servir para dar algo de tiempo para actuaciones de evacuación y protección de los municipios afectados y demás bienes.

Como conclusión, en general para un período de retorno de 25 años o inferior, las motas son una alternativa a considerar ante episodios de avenida, pues consiguen retener el flujo desbordado del cauce, o en todo caso, reducen notoriamente el efecto de las inundaciones sobre el terreno. Además de ello, también se consigue recuperar parte del antiguo espacio fluvial, que es uno de los aspectos principales que se pretendía alcanzar en este trabajo.

## 7.2 Líneas de trabajo futuro

Existen diversas consideraciones que no se han tenido en cuenta en este trabajo y que podrían formar parte de futuras líneas de trabajo respecto a la problemática tratada.

En primer lugar, como se ha mencionado en anteriores ocasiones, únicamente se han simulado los hidrogramas correspondientes a un período de retorno de 10 y 25 años, sin analizar los efectos que caudales más extremos podrían generar sobre la llanura de inundación. De esta forma, un posible análisis que se podría realizar en esta zona sería el comportamiento del flujo para períodos de retorno superiores a los dos anteriores, así como la implantación de medidas contra las avenidas extremas que se pudieran generar. En este caso, no tendría cabida comprobar el efecto del retranqueo de las motas, pues se ha visto que tendrían una influencia inapreciable, pero sí podrían plantearse otras actuaciones.

Asimismo, en las simulaciones realizadas no se han tenido en cuenta los sedimentos que forman parte de la dinámica natural del sistema fluvial. Por ello, la importancia que el transporte de sólidos tendría sobre la llanura de inundación sería un análisis que se ha quedado fuera del alcance de este trabajo, por lo que podría ser un camino por el que seguir investigando sobre el área estudiada.

El movimiento de tierras, la maquinaria y demás medios para llevarla a cabo, así como la planificación de la obra y la superficie de las parcelas que sería necesario expropiar son aspectos que han quedado fuera del alcance de este proyecto, por lo que sería interesante como línea de trabajo futura, a fin de implantar esta actuación en la zona de estudio.

Por último, en los resultados de las simulaciones se ha podido observar ciertos puntos del área estudiada donde se producía el río se desbordaba de manera considerable, por lo que cabría estudiar qué tipo de medidas podrían ser implantadas en esta zona, pues afecta a diversas vías de comunicación y municipios.

## REFERENCIAS

- [1] Ollero Ojeda, Alfredo, Guía Metodológica sobre buenas prácticas en Restauración Fluvial. Versión I.O. Universidad de Zaragoza, España, 2015
- [2] Martín Vide, Juan P. , Ingeniería de ríos, Universidad Politécnica de Cataluña , ISBN 84-8301-563-3. p.97-144, 2003
- [3] Romero Díaz, Asunción/ Maurandi Guirado, Antonio, Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del Siglo XX. Actuaciones de Prevención, Universidad de Murcia, Serie Geográfica Núm.9, ISSN: 1136-5277, 2000
- [4] Ezcurra Cartagena, Joaquín, Encauzamiento del río Segura desde la Contraparada (murcia) hasta Guardamar del Segura (Alicante) y Recuperación de los sotos del río, Revista de Obras Públicas, Marzo 1995/ Nº 3341
- [5] Restauración de Riberas, Manual para la restauración de riberas en la cuenca del río Segura, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, ISBN-13: 978-84-612-2891-1
- [6] C. H. Segura, «Confederación Hidrográfica del Segura», *Cronología de riadas en la Cuenca del Segura* <https://www.chsegura.es/chs/informaciongeneral/elorganismo/unpocodehistoria/riadas.html>
- [7] C. H. Segura, «Confederación Hidrográfica del Segura», *Descarga de Cartografía* <https://www.chsegura.es/chs/cuenca/resumendedatosbasicos/cartografia/descargas/>
- [8] I. G. Nacional, «Instituto Geográfico Nacional», *Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España* <http://www.ign.es>.
- [9] «Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables», *Centro de Descargas del CNIG* <https://www.miteco.gob.es/ca/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/>.
- [10] C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN)», <http://centrodedescargas.cnig.es>.
- [11] C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN) », *Información Geográfica Temática*. <https://www.siose.es/>
- [12] C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN)», *Comparador de ortofotos PNOA*, [https://www.ign.es/web/comparador\\_pnoa/index.html](https://www.ign.es/web/comparador_pnoa/index.html)
- [13] C. H. S «Sistema Automática de Información Hidrológica (SAIH)» <http://chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/SAIH/ivisor.html>
- [14] Guía Metodológica para el Desarrollo de Zonas Inundables, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, 2011
- [15] Jiménez Álvarez, Antonio, Desarrollo de Metodologías para mejorar la estimación de los hidrogramas de diseño para el cálculo de los órganos de desagüe de las presas, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015

- [16] Mapa de Caudales Máximos, *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*, 2011
- [17] Álvarez Enjo, M.A, Análisis Regional de frecuencia aplicado a las precipitaciones máximas y avenidas, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 2000
- [18] Francés García, Félix, Utilización de la función de distribución de probabilidad TCEV con información no sistemática dentro de un análisis regional. Aplicación a los ríos Júcar y Turia, Universidad Politécnica de Valencia, Vol. 5, Nº 1, marzo 1998
- [19] Memoria, Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011
- [20] HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 5.0, 2016
- [21] HEC-RAS River Analysis System, Supplemental User's Manual, *US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center*, 2018
- [22] «Autodesk Knowledge Network» <https://knowledge.autodesk.com/support>
- [23] Sede Electrónica del Catastro, Dirección General del Catastro, Ministerio de Hacienda <https://www.sedecatastro.gob.es/>