

Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Influencia del Transporte Sólido en la Rugosidad y  
su Afección al Estudio de Inundaciones del Río  
Guadalhorce

Autor: Francisco Ruth Centella

Tutor: M<sup>a</sup> Carmen Molina González

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Influencia del Transporte Sólido en la Rugosidad y su Afección al Estudio de Inundaciones del Río Guadalhorce**

Autor:

Francisco Ruth Centella

Tutor:

M<sup>a</sup> Carmen Molina González

Profesor asociado

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Máster: Influencia del Transporte Sólido en la Rugosidad y su Afección al Estudio de Inundaciones del Río Guadalhorce

Autor: Francisco Ruth Centella

Tutor: M<sup>a</sup> Carmen Molina González

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

Mis agradecimientos por la realización del presente trabajo, van dirigidos a varias personas. En primer lugar, a mi profesora y tutora, Dña. M<sup>a</sup> Carmen Molina González por las numerosas horas de trabajo que ha dedicado ayudándome y guiándome. A mi familia, en especial a mis padres, que no han dejado de apoyarme y de confiar en mí, desde que empecé el duro y apasionante camino de la ingeniería. A mis amigos y compañeros, que siempre me han animado a seguir adelante con entusiasmo. Y, por último, y más importante, a mi pareja, cuyo apoyo y confianza han sido constantes durante todo este tiempo.

*Francisco Ruth Centella*

*Sevilla, 2017*



## Resumen

---

En el presente Trabajo Fin de Máster, se analiza la influencia que el transporte de sólidos puede tener sobre la rugosidad del río, afectando así, al estudio de inundaciones del mismo. El río escogido para ello, ha sido el Guadalhorce en la provincia de Málaga, concretamente, el tramo más próximo a su desembocadura.

Para su análisis, los estudios hidráulicos y de inundación, se han llevado a cabo de dos formas distintas. La primera, consiste en tomar un valor de rugosidad o parámetro ( $n$ ) de Manning habitual, directamente de las tablas empleadas para ello y sin tener en cuenta el transporte sólido. Por otro lado, el segundo caso, consiste en calcular y modelar el parámetro ( $n$ ), considerando, ahora sí, dicho transporte, y obteniendo una idea más real y precisa del comportamiento natural del cauce.

Con todo ello, y con la ayuda del software de cálculo HEC-RAS, se ha podido modelar hidráulicamente el río, obteniendo así la mancha de inundación generada en ambas situaciones.

Finalmente, puede observarse cómo mediante el segundo caso, se consiguen unos resultados mucho más exactos que los alcanzados tomando valores clásicos de rugosidad, obteniendo una visión más realista de los efectos y riesgos de inundación de las zonas afectadas, y permitiendo así, realizar modelos de respuesta con los que evitarlos.



## Abstract

---

In the present Final Master's Project, the influence that the transport of solids can have on the roughness of the river is analyzed, thus affecting the flood study of the same. The river chosen for this has been the Guadalhorce in the province of Málaga, specifically, the section closest to its mouth.

For its analysis, hydraulic and flood studies have been carried out in two different ways. The first consists of take a roughness value or parameter ( $n$ ) of Manning, directly from the tables used for this and without taking into account the solid transport. On the other hand, the second case consists of calculating and modeling the parameter ( $n$ ), considering, now, that transport, and obtaining a more real and accurate idea of the natural behavior of the channel.

With all this, and with the help of the HEC-RAS calculation software, it has been possible to hydraulically model the river, thus obtaining the flood stain generated in both situations.

Finally, it can be seen how, by means of the second case, much more accurate results are obtained than those achieved by taking classic rugosity values, obtaining a more realistic view of the effects and risks of flooding of the affected areas, and allowing so make response models with which to avoid them.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>17</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>19</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. <i>Metodología</i>	21
<b>2 Antecedentes</b>	<b>23</b>
2.1. <i>Ámbito de Estudio</i>	23
2.2. <i>Inundaciones Históricas</i>	25
<b>3 Legislación</b>	<b>28</b>
3.1 <i>Marco Normativo</i>	28
3.2 <i>Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces</i>	31
3.3 <i>Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación e Identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación</i>	32
3.4 <i>Planes de Gestión de Riesgo de Inundación</i>	32
3.5 <i>Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas</i>	33
<b>4 Caracterización del Medio Físico y Biótico</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Relieve</i>	35
4.2 <i>Climatología</i>	36
4.2.1 <i>Viento</i>	37
4.2.2 <i>Temperaturas</i>	37
4.3 <i>Geología</i>	38
4.4 <i>Hidrología</i>	40
4.5 <i>Usos de suelo</i>	41
4.6 <i>Zonas y bienes protegidos</i>	42
4.7 <i>Vegetación y Fauna</i>	42
4.7.1 <i>Vegetación</i>	42
4.7.2 <i>Fauna</i>	43
4.8 <i>Paisaje</i>	44
<b>5 Estudio Pluviométrico</b>	<b>45</b>
5.1 <i>Caracterización de la zona</i>	45
5.2 <i>Parámetros de estudio</i>	48
<b>6 Estudio Hidrológico</b>	<b>50</b>
6.1 <i>Caracterización de las subcuencas y de los tramos fluviales de estudio</i>	50
6.2 <i>Elección del modelo de cálculo y de los métodos para la estimación de los procesos hidrometeorológicos</i>	51

6.3	<i>Confección del modelo matemático preliminar con la evaluación teórica de los parámetros característicos de cada elemento</i>	52
6.4	<i>Calibración del modelo matemático</i>	53
6.5	<i>Cálculo de los caudales de proyecto</i>	53
6.6	<i>Comparación de caudales máximos generados</i>	56
6.7	<i>Elección de caudales de diseño</i>	57
<b>7</b>	<b>Introducción al Transporte de Sedimentos</b>	<b>58</b>
7.1	<i>Introducción</i>	58
7.1.1	Objetivos	59
7.1.2	Estructura	60
7.2	<i>Proceso de erosión y propiedades de los sedimentos</i>	60
7.2.1	Propiedades de los sedimentos	61
7.2.2	Inicio del movimiento de los sedimentos	62
7.2.3	Modos de transporte	65
7.2.4	Evolución del fondo	65
7.3	<i>Formulación y métodos</i>	68
7.3.1	Fórmulas experimentales para el transporte de material de fondo	70
7.3.2	Métodos por solución numérica	71
7.4	<i>Tipos de modelos</i>	74
7.4.1	Modelos empíricos	74
7.4.2	Modelos conceptuales	74
7.4.3	Modelos físicos	74
7.4.4	Selección del tipo de modelo	74
7.4.5	Formulación de modelos conceptuales	75
7.5	<i>Modelos conceptuales</i>	77
7.5.1	Tipos de modelos	77
7.6	<i>Aplicaciones y soluciones de los modelos vigentes</i>	79
7.6.1	Régimen permanente gradualmente variado	79
7.6.2	Régimen no permanente rápida o gradualmente variado	80
7.6.3	Modelamientos numéricos o matemáticos	80
<b>8</b>	<b>Estudio de Inundación</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Estudio Hidráulico 1. Modelado con (n) de Manning Clásico</b>	<b>86</b>
9.1	<i>Introducción</i>	86
9.2	<i>Ámbito de estudio</i>	86
9.3	<i>Hidrología</i>	87
9.4	<i>Hidráulica</i>	88
9.4.1	Cartografía	88
9.4.2	Software de cálculo	88
9.4.3	Geometría	90
9.4.4	Parámetros de cálculo	90
9.4.5	Condiciones de contorno	94
9.5	<i>Resultados</i>	98
9.5.1	Variables hidráulicas	98
9.5.2	Delimitación de zonas inundables	98
<b>10</b>	<b>Estudio Hidráulico 2. Modelado con (n) de Manning Modificado</b>	<b>99</b>
10.1	<i>Introducción</i>	99
10.2	<i>Transporte de sedimentos. Modelización del río Guadalhorce aguas abajo de los embalses</i>	100
10.2.1	Introducción	100
10.2.2	Formulación utilizada. Transporte por fondo	101
10.2.3	Metodología de cálculo	102
10.2.4	Aplicación del modelo de transporte sólido al río Guadalhorce	104
10.3	<i>Coefficiente de rugosidad (n) de Manning</i>	109

10.4	<i>Resultados</i>	110
10.4.1	Variables hidráulicas	110
10.4.2	Delimitación de zonas inundables	110
<b>11</b>	<b>Estudio Comparativo</b>	<b>111</b>
11.1	<i>Variaciones en los coeficientes de Manning</i>	111
11.2	<i>Manchas de Inundación para cada periodo (T)</i>	112
11.2.1	Periodo de retorno de 10 años.	113
11.2.2	Periodo de retorno de 50 años.	114
11.2.3	Periodo de retorno de 100 años.	114
11.2.4	Periodo de retorno de 500 años.	115
11.3	<i>Manchas de Inundación para T = 500 años</i>	115
11.3.1	Zona 1: Aljaima	116
11.3.2	Zona 2: Estación de Cártama	116
11.3.3	Zona 3: Santa Amalia	117
11.3.4	Zona 4: Santa Águeda	117
11.3.5	Zona 5: Polígono Santa Teresa	118
11.4	<i>Variaciones en los calados y velocidades</i>	118
11.4.1	Zona 1: Aljaima	119
11.4.2	Zona 2: Estación de Cártama	120
11.4.3	Zona 3: Santa Amalia	121
11.4.4	Zona 4: Santa Águeda	122
11.4.5	Zona 5: Polígono Santa Teresa	123
<b>12</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>124</b>
	<b>Referencias y Bibliografía</b>	<b>125</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Caracterización del embalse del Guadalhorce.....	24
Tabla 2-2. Caracterización de la desembocadura del Guadalhorce. ....	24
Tabla 2-3. Inundaciones históricas en la cuenca del río Guadalhorce. ....	25
Tabla 3-1. Puntos de riesgo de la cuenca del Guadalhorce.....	31
Tabla 3-2. Actuaciones referidas a medidas estructurales en la cuenca del Guadalhorce. ....	33
Tabla 3-3. Actuaciones contempladas en el programa de medidas del P.H. de las C.M.A.....	33
Tabla 4-1. Clasificación climática de Köppen.....	37
Tabla 4-2. Temperatura media mensual en algunas estaciones de la cuenca. ....	38
Tabla 5-1. Evapotranspiración potencial media mensual en algunas estaciones de la cuenca.....	46
Tabla 6-1. Caudales de cálculo por periodo de retorno. ....	57
Tabla 7-1. Clasificación de sedimentos según su modo de transporte.....	65
Tabla 7-2. Modificaciones para el parámetro (n) de Manning según el método de Cowan.....	68
Tabla 7-3. Principales modelos computacionales. ....	78
Tabla 8-1. Porcentaje de víctimas mortales debidas a inundaciones en relación a otras catástrofes naturales. ....	83
Tabla 9-1. Niveles de riesgo de las zonas afectadas.....	87
Tabla 9-2. Caudales de cálculo (m <sup>3</sup> /s) por periodos de retorno. ....	87
Tabla 9-3. Valores del parámetro (n) de Manning según el método clásico. ....	92
Tabla 9-4. Modificaciones para el parámetro (n) de Manning según el método de Cowan.....	93
Tabla 9-5. Modificaciones para el parámetro (n) según Arcement y Schneider (1987). ....	93
Tabla 9-6. Valores de (n <sub>0</sub> ) para los materiales localizados en el tramo de estudio.....	93
Tabla 9-7. Funciones de distribución extremal de presión atmosférica.....	96
Tabla 9-8. Variaciones en el centro de la perturbación. ....	97
Tabla 9-9. Cotas del nivel del mar (m) por periodos de retorno. ....	98
Tabla 10-1. Caudales de cálculo (m <sup>3</sup> /s) por periodos de retorno.....	99
Tabla 10-2. Resumen del transporte de sedimentos en los tramos de estudio.....	107
Tabla 10-3. Corrección del valor n <sub>0</sub> .....	109
Tabla 11-1. Valores de (n) para diferentes secciones y periodos de retorno. ....	112
Tabla 11-2. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 1. ....	119
Tabla 11-3. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 2. ....	120
Tabla 11-4. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 3. ....	121
Tabla 11-5. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 4. ....	122
Tabla 11-6. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 5. ....	123



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Localización de la cuenca del río Guadalhorce y de la zona de estudio. ....	23
Figura 2-2. Mapa de la localización de la zona de estudio. ....	24
Figura 3-1. Zona inundable, de policía y de servidumbre de un cauce.....	28
Figura 3-2. Vía de intenso desagüe. ....	29
Figura 4-1. Garganta del Guadalhorce. ....	35
Figura 4-2. Mapa en relieve de la cuenca del Guadalhorce. ....	36
Figura 4-3. Mapa de temperatura media anual de la cuenca del Guadalhorce.....	38
Figura 4-4. Mapa geológico de la cuenca del Guadalhorce.....	39
Figura 4-5. Mapa hidrológico de la zona de estudio. ....	40
Figura 4-6. Mapa de usos de suelo de la cuenca del Guadalhorce. ....	41
Figura 4-7. Espacios y bienes protegidos en la cuenca del Guadalhorce. ....	42
Figura 4-8. Distribución de las series de vegetación en la cuenca del Guadalhorce.....	43
Figura 5-1. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del Guadalhorce. ....	46
Figura 5-2. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6119I Ardales “Vivero”. .	47
Figura 5-3. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6146I Cártama “Puente Fahala” .....	47
Figura 5-4. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6171A Málaga “Carmelitas”.....	47
Figura 5-5. Curvas IDF de la estación E047.....	48
Figura 5-6. Hietogramas de diseño.....	49
Figura 6-1. División de cuencas. ....	50
Figura 6-2. Ábaco de Heras para las Cuencas del Sur. ....	54
Figura 6-3. Caudales máximos generados por cada método. ....	56
Figura 6-4. Localización de los puntos de salida de las subcuencas. ....	57
Figura 7-1. Fuerzas sobre la partícula. ....	61
Figura 7-2. Equilibrio de fuerzas en el lecho. ....	63
Figura 7-3. Balanza de Lane. ....	64
Figura 7-4. Métodos de distribución de partículas para modelos de una dimensión. ....	66
Figura 7-5. Mallas típicas empleadas por métodos de diferencias finitas. ....	72
Figura 7-6. Ejemplo de malla de elementos finitos.....	72
Figura 7-7. Elementos finitos más comunes. ....	73
Figura 7-8. Esquemas de volúmenes de control. ....	73
Figura 7-9. Ciclo del modelamiento computacional. ....	75
Figura 7-10. Fases de una modelización. ....	81
Figura 8-1. Mapa de las ARPSIs de la zona de estudio. ....	85
Figura 9-1. Mapa del modelo digital del terreno de la zona de estudio. ....	88
Figura 9-2. Simulación de cursos fluviales. ....	89
Figura 9-3. Localización de la información instrumental de medida.....	94
Figura 9-4. régimen medio del nivel de marea. ....	95
Figura 9-5. Niveles de referencia.....	96
Figura 9-6. Régimen extremal de nivel de marea.....	97
Figura 10-1. Esquema para el cálculo del transporte de sedimentos en el río Guadalhorce. ....	102

Figura 10-2. División de tramos para el estudio del transporte de sedimentos en el río Guadalhorce. .	105
Figura 10-3. Salida del material (m <sup>3</sup> ) en los tramos del río. ....	108
Figura 10-4. Tendencia sedimentaria de cada tramo del río.....	108
Figura 11-1. Variación del coeficiente (n) de Manning a lo largo del tramo. ....	111
Figura 11-2. Manchas de inundación del E.H.1.....	112
Figura 11-3. Manchas de inundación del E.H.2.....	113
Figura 11-4. Variación de la mancha de inundación para T = 10 años. ....	113
Figura 11-5. Variación de la mancha de inundación para T = 50 años. ....	114
Figura 11-6. Variación de la mancha de inundación para T = 100 años. ....	114
Figura 11-7. Variación de la mancha de inundación para T = 500 años. ....	115
Figura 11-8. Mancha de inundación sobre zona 1. ....	116
Figura 11-9. Mancha de inundación sobre zona 2. ....	116
Figura 11-10. Mancha de inundación sobre zona 3. ....	117
Figura 11-11. Mancha de inundación sobre zona 4. ....	117
Figura 11-12. Mancha de inundación sobre zona 5. ....	118
Figura 11-13. Sección de la zona 1 del E.H.1. ....	119
Figura 11-14. Sección de la zona 1 del E.H.2. ....	119
Figura 11-15. Sección de la zona 2 del E.H.1. ....	120
Figura 11-16. Sección de la zona 2 del E.H.2. ....	120
Figura 11-17. Sección de la zona 3 del E.H.1. ....	121
Figura 11-18. Sección de la zona 3 del E.H.2. ....	121
Figura 11-19. Sección de la zona 4 del E.H.1. ....	122
Figura 11-20. Sección de la zona 4 del E.H.2. ....	122
Figura 11-21. Sección de la zona 5 del E.H.1. ....	123
Figura 11-22. Sección de la zona 5 del E.H.2. ....	123

# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Nunca andes por el camino trazado, pues te conducirá a donde otros ya fueron.*

*- Alexander Graham Bell -*

El presente trabajo, titulado “Influencia del Transporte Sólido en la Rugosidad y su Afección al Estudio de Inundaciones del Río Guadalhorce”, pretende analizar las repercusiones derivadas del transporte de sólidos sobre el lecho del río, afectando a la rugosidad del cauce y de manera directa, al riesgo de inundación de los terrenos anexos.

La dirección principal del trabajo, irá orientada hacia una óptima definición y evaluación del parámetro de rugosidad (n) de Manning, con el que poder modelar y calcular correctamente la mancha real de inundación en el cauce del río Guadalhorce, permitiendo así, analizar la mayor o menor correlación con los estudios basados en una elección subjetiva y directa de dicho parámetro.

## 1.1. Metodología

La metodología es una parte, en la elaboración de cualquier documento, que adquiere gran importancia, ya que es la etapa que parte de una posición teórica y conduce a la selección de las técnicas adecuadas para la realización de las tareas vinculadas a la investigación y al desarrollo del estudio.

En la elaboración del presente trabajo, se han seguido una serie de pautas o procedimientos, los cuales se muestran a continuación:

1. Estudio de antecedentes e inundaciones históricas producidas en la provincia de Málaga y debidas a los continuos desbordamientos del río Guadalhorce y sus afluentes, permitiendo así, tener constancia de la necesidad de una buena delimitación de las (ARPSIs).
2. Análisis y síntesis, de los riesgos de inundación recogidos por los planes existentes en materia de inundaciones y referidos al ámbito de estudio, tales como:
  - Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces.
  - Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI).
  - Identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs).
  - Planes de Gestión del Riesgo de Inundación.

Obteniendo con ello, información acerca de:

- Delimitación de zonas inundables para distintos periodos de retorno.
  - Identificación de núcleos urbanos con riesgo de inundaciones y su nivel de riesgo.
3. Consideración de los estudios, geológico, pluviométrico, hidrológico, etc. con los que apoyar y corroborar los parámetros y modelos de cálculo.

4. Análisis sobre el transporte de sedimentos y sus repercusiones en la hidráulica actual, así como la definición de las ecuaciones y los modelos más empleados actualmente para su estudio.
5. Estudio hidráulico comparativo, evaluando por separado las consecuencias de realizar un cálculo y modelado de los riesgos y zonas de inundación con un valor directo del parámetro (n) de Manning, frente a una elección del mismo detallada y consensuada con los modelos y ecuaciones indicadas al uso, con el que obtener unos resultados más ajustados y acordes a la realidad.

Para este punto, ha sido fundamental el uso del software informático HEC-RAS, con el que poder llevar a cabo la ejecución del modelo y el cálculo y comprobación de cada una de las variables y situaciones propuestas.

6. Representación visual del estudio de inundación y conclusiones finales. Para corroborar este punto, se presentan una serie de planos. En su elaboración, se han empleado los programas ArcMap 10.1 y HEC-RAS, del US Corps of Engineers. Las capas necesarias para ello, se han obtenido del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, de los Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) y de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

El resto de información empleada en el trabajo, se encuentra debidamente referenciada en el “*Apartado: Referencias y Bibliografía*”.

## 2 ANTECEDENTES

*El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.*

*- Leonardo Da Vinci -*

### 2.1. Ámbito de Estudio

La cuenca del río Guadalhorce se localiza dentro del ámbito de la Demarcación Hidrográfica de las Cuenas Mediterráneas Andaluzas y se ubica en su práctica totalidad en el sector central de la provincia de Málaga. En conjunto, la cuenca del río Guadalhorce engloba, total o parcialmente, territorio perteneciente a 45 municipios, de los que tan sólo tres pertenecen a provincias distintas a Málaga: los municipios granadinos de Zafarraya y Loja (en el cual se produce el nacimiento del río), y el municipio sevillano de El Saucejo (por cuyo sector meridional transcurre el límite noroccidental de la cuenca).

La DHCMA, depende de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, situándose la cuenca del río Guadalhorce en el Subsistema de Explotación I-4, junto con la cuenca del río Guadalmedina, perteneciendo ambas a su vez, al Sistema de Explotación I-SERRANÍA DE RONDA.

La cuenca vertiente del río Guadalhorce tiene una superficie de 3.247,5 km<sup>2</sup> aproximadamente, que supone algo menos de la mitad de toda la superficie provincial (7.306 km<sup>2</sup>), lo que la determina como la red de drenaje más extensa de la Cuenca Mediterránea Andaluza. La longitud total del río, es de 154 km aproximadamente.

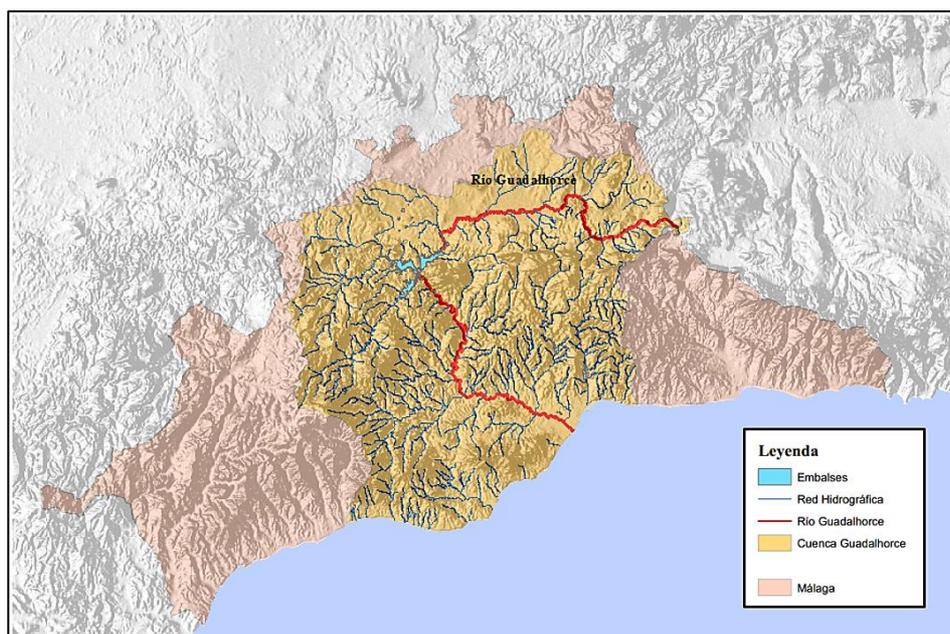


Figura 2-1. Localización de la cuenca del río Guadalhorce y de la zona de estudio.

Dentro de la propia cuenca del Guadalhorce, existe una clara separación entre lo que se denomina cuenca alta y cuenca baja. Algunos de los cauces y masas de aguas más importantes localizadas en cada una de ellas son:

- Cuenca Alta: río Guadalhorce (en su tramo alto), río Turón, río Guadalteba y río Almargen. Además, dentro de esta zona, se encuentra el embalse del Guadalhorce, con las siguientes características:

Tabla 2-1. Caracterización del embalse del Guadalhorce.

<b>Cauce Principal</b>	Guadalhorce	<b>S. Cuenca Vertiente</b>	16.235 ha
<b>Categoría</b>	Río	<b>Potencial Ecológico</b>	Moderado
<b>Naturaleza</b>	MAMM. Embalse	<b>Estado Químico</b>	Bueno
<b>Longitud</b>	13,2 km	<b>Estado</b>	Peor que bueno
<b>Superficie</b>	7,29 ha		

- Cuenca Baja: río Grande, arroyo de Casarabonela, arroyo las Cañas, río Fahala, arroyo del Valle, arroyo de las Piedras, arroyo del Ancón, río Campanillas y arroyos del sector sur. Además, dentro de esta zona, se encuentra la desembocadura del Guadalhorce, con las siguientes características:

Tabla 2-2. Caracterización de la desembocadura del Guadalhorce.

<b>Cauce Principal</b>	Guadalhorce	<b>S. Cuenca Vertiente</b>	6.420 ha
<b>Categoría</b>	Río	<b>Potencial Ecológico</b>	Moderado
<b>Naturaleza</b>	MAMM. Encauzamiento	<b>Estado Químico</b>	Bueno
<b>Longitud</b>	9,0 km	<b>Estado</b>	Peor que bueno

Para este trabajo, nos centraremos en el dominio relativo a la cuenca baja del Guadalhorce, y más concretamente, al último tramo de la misma, con una longitud de 35 km aproximadamente y comprendido entre el municipio de Pizarra y la costa de Málaga.

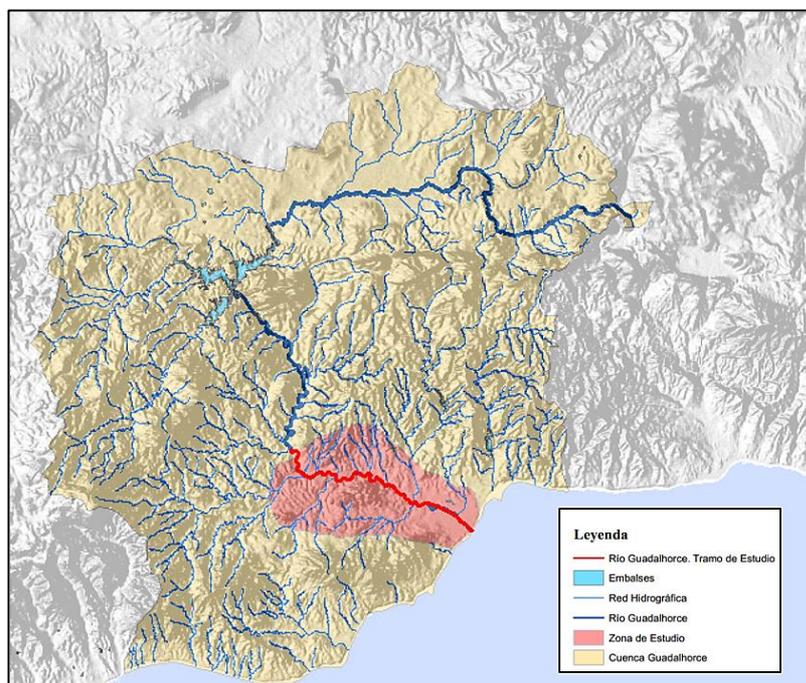


Figura 2-2. Mapa de la localización de la zona de estudio.

Para entender un poco mejor la zona de estudio, nos remontamos a algunos datos de interés histórico, como la evolución que he experimentado el territorio, o las inundaciones que ha padecido.

Los primeros indicios del río Guadalhorce se remontan a los fenicios, que edificaron una relevante ciudad comercial en el Cerro del Villar, junto a su desembocadura. Los romanos trazaron dos vías junto a sus márgenes y en ellas erigieron municipios, mansiones y villas.

En el siglo XX se conoció el Plan Coordinado de Obras de la zona de nuevos regadíos del Guadalhorce, que incluía grandes obras hidráulicas como los embalses del Conde de Guadalhorce, Guadalhorce y Guadalteba, canales de derivación, canales de riego, la creación de nuevos núcleos de abastecimiento de agua potable, obras de encauzamiento y defensa de márgenes, etc.

Pero la verdadera modificación del curso natural del río Guadalhorce comienza desde el primer año del siglo XX, relacionada con las familias de la burguesía industrial de Málaga, con el proyecto de construcción del Pantano del Chorro, en 1905, para suministrar electricidad a la provincia.

En 1956 el Ministerio de Agricultura declara de “alto interés nacional”, la colonización de las zonas regables de los canales de ambas márgenes del Guadalhorce. Las crecientes necesidades de abastecimiento urbano a Málaga capital y la aprobación en 1961 del Plan de Riegos del Guadalhorce, dan como consecuencia la construcción de las presas del Guadalhorce y Guadalteba que finalizarían en 1973.

En julio de 1995, la Consejería de Medio Ambiente emite la autorización para realizar el “Proyecto de Adecuación del Curso Bajo del Río Guadalhorce”, promovido por la Confederación Hidrográfica del Sur de España, obra que afecta al espacio protegido “Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce”.

El resultado final conseguido, fue una ampliación de la protección frente a las inundaciones en los alrededores del río, gracias al encauzamiento preventivo realizado en ese tramo, una mayor limpieza y ampliación de la superficie del Paraje Natural, un incremento del área ocupada por las láminas de agua, un mayor aislamiento de la zona gracias a quedar rodeada por los dos brazos del río y por el mar, un mejor control de acceso, y la creación de nuevos elementos de uso público (observatorios) destinados a aficionados y profesionales de la observación de la naturaleza, especialmente la avifauna acuática.

## 2.2. Inundaciones Históricas

A continuación, se hace referencia a las inundaciones más importantes que se han acontecido hasta la actualidad en la cuenca del río Guadalhorce y más concretamente en las zonas próximas a su desembocadura, en la localidad de Málaga.

Con ello, se pretende hacer evidente la necesidad de un cierto grado de control y actuación sobre dichas zonas, con el fin de minimizar los riesgos de las inundaciones o sus posibles efectos. Por otro lado, se pretende que el presente estudio, sirva de base para una correcta modelización y/o parametrización de las variables que afectan a las posibles zonas de inundación, próximas al cauce del río, pudiendo así, ajustar de manera real y efectiva, los límites que las delimitan.

La información mostrada a continuación, se basa en una recopilación exhaustiva de las inundaciones históricas acontecidas en el río Guadalhorce y sus afluentes, cuyos testimonios se remontan hasta 1855. Dicha información, ha sido obtenida del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH), y recopilada por la Comisión Técnica de Emergencia por Inundaciones (CTEI).

Tabla 2-3. Inundaciones históricas en la cuenca del río Guadalhorce.

Fecha	Cauce	Núcleos	Tipo	Daños	Nivel
09/1855	Guadalhorce	Málaga	-	Desbordamiento	-
10/09/1856	Guadalhorce	Málaga	-	Avenida	-
30/11/1880	Guadalhorce	Málaga	Desbordamiento	1 muerto y varios daños materiales	-
04/1881	Guadalhorce	Álora	Desbordamiento	Viviendas	2m en Álora

01/1888	Guadalhorce	Málaga, San Isidro y Cártama	Desbordamiento	Puentes, casas y cultivos	En Cártama superó el puente
09/1907	Guadalhorce Campanillas	Campanillas	Desbordamiento	5 muertos y daños a casas y cultivos	-
03/1917	Guadalhorce	Málaga, Archidona, y Campanillas	Desbordamiento	Electricidad, ferrocarril y cultivos	-
06/1930	Guadalhorce	Málaga	Desbordamiento	Cultivos	-
30/10/1955	Guadalhorce	Málaga	Desbordamiento	5.000 afectados e innumerables daños	-
28/11/1961	Campanillas	Málaga y Campanillas	Desbordamiento	Cultivos y 8 casas destruidas	1,5m en Campanillas
27/12/1961	Campanillas	Málaga y Campanillas	Desbordamiento	Viviendas	-
02/01/1963	Guadalhorce y Campanillas	Málaga y Campanillas	Desbordamiento	Viviendas y carreteras	-
03/10/1969	Guadalhorce	Varios	Desbordamiento y Avenida	Innumerables daños a varios servicios	-
20/11/1969	Guadalhorce	Málaga	Avenida	Agrícolas, ganaderos y forestales	-
01/1970		Málaga	Aguacero	Viviendas, edificios y cultivos	-
14/01/1970	Guadalhorce	Málaga, Cártama, y Antequera	Desbordamiento y Avenida	Innumerables daños a varios servicios	-
03/1971	Guadalhorce	Málaga	Aguacero	Viviendas y edificios	-
10/11/1978	Guadalhorce	Málaga	Avenida	Viviendas, inmuebles e industrias	1m en la Ctra. De Cádiz
21/10/1979	Varios	Málaga y Campanillas	Desbordamiento y Avenida	Carreteras y obras de infraestructura	-
01/10/1988	Guadalhorce	Málaga y Coín	Episodio Torrencial Virulento	Víctimas mortales, casas y servicios	El agua superaba a los árboles
12/1989	Varios	Casi toda de la cuenca del Guadalhorce	Aguacero, desbordamiento y granizo	3.000 afectados e innumerables daños	Entre 5 y 10 m en varios municipios
15/12/1995	Guadalhorce	Málaga y Cártama	Desbordamiento	Edificios, viviendas y cultivos	1m en algunas zonas
12/1996	Campanillas	Campanillas	Desbordamiento	Calles y viviendas	-
04/02/1998	Guadalhorce	Málaga	Desbordamiento	Viviendas, industrias y aeropuerto	-

04/12/2003	Guadalhorce	Málaga, Cártama, Coín, Pizarra y Álora	Desbordamiento	Casas, industrias y carreteras	En Coín 1,5m de agua
14/10/2008	Guadalhorce	Villanueva del Trabuco, Álora	Desbordamiento	Viviendas, carreteras y locales	-
16/02/2010	Guadalhorce y Campanillas	Málaga y Campanillas	Desbordamiento	Viviendas, carreteras y locales	-
04/12/2016	Guadalhorce y Campanillas	Málaga y Campanillas	Desbordamiento	Viviendas, carreteras y locales	-

Cabe destacar, las inundaciones que más afectaron a los municipios localizados dentro del tramo de estudio (Pizarra, Cártama, parte sur de Campanillas y el núcleo urbano de Málaga), haciendo evidente, el reiterado riesgo potencial de inundación existente sobre las mismas.

# 3 LEGISLACIÓN

*Olvidamos que el ciclo del agua y el de la vida son uno.*

*- Jacques Cousteau -*

En el siguiente apartado, se realizará un recorrido a través de cada una de las normativas y/o planes, ordenados según su ámbito y nivel legislativo, que regulan actualmente las prevenciones de avenidas y riesgos de inundaciones en España, y más concretamente en las Cuencas Andaluzas.

## 3.1 Marco Normativo

El Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, define, en el artículo 14, el concepto de zona inundable y las modificaciones con respecto a la zona de flujo preferente y las vías de intenso desagüe, con el fin de conseguir una regularización eficiente, que permita la preservación del estado del dominio público hidráulico.

- Zona Inundable:

Se considera como tal, a la delimitada por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas, a menos que el Ministerio de Medio Ambiente, a propuesta del organismo de cuenca fije, en expediente concreto, la delimitación que en cada caso resulte más adecuada al comportamiento de la corriente.

Además, tal y como puede observarse en la siguiente imagen, establece las anchuras asociadas a las zonas de policía y servidumbre:

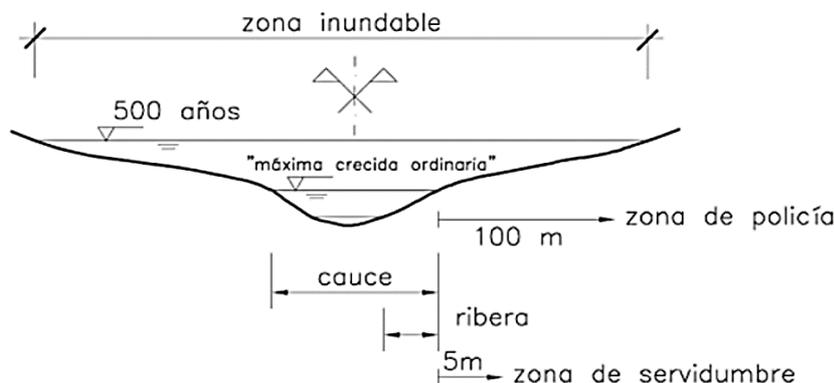


Figura 3-1. Zona inundable, de policía y de servidumbre de un cauce.

- Zona de Flujo Preferente:

Se considera como tal, a la delimitada mediante estudios hidráulicos, que determinan el calado y velocidad del agua en las crecidas del río para periodos de retorno de 100 años, quedando constituida por:

- Zona de posibles daños humanos y materiales de carácter grave, en la que, para la avenida de periodo de retorno de 100 años, se dan una o más de las siguientes condiciones:
  - El calado sea superior a 1 m.
  - La velocidad será superior a 1 m/seg.
  - El producto de ambas variables sea superior a  $0,5 \text{ m}^2/\text{seg}$ .
- Vía de Intenso Desagüe.

Se considera como tal, a la zona donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas. Coincide con la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno, sin producir una sobreelevación mayor de 0,3 m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida, considerando toda la llanura de inundación existente.

La sobreelevación anterior podrá, a criterio del organismo de cuenca, reducirse hasta 0,1m, cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5m, en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos.

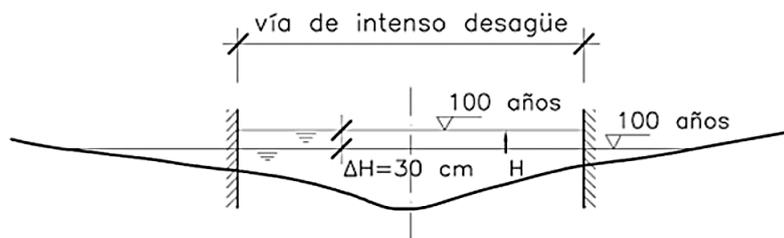


Figura 3-2. Vía de intenso desagüe.

A continuación, se presentan, ordenadas cronológicamente, las Leyes y Reales Decretos concernientes a inundaciones que conforman la normativa vigente.

➤ Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.

En su artículo 28, establece que se adoptarán las medidas necesarias para corregir las situaciones que afecten a la protección del dominio público hidráulico, incluyendo, la eliminación de construcciones e instalaciones que fuera necesario.

Por otro lado, se faculta al Ministerio de Medio Ambiente para impulsar la tramitación de los expedientes de deslinde del dominio público hidráulico, en aquellos tramos de cauce que se considere necesario para prevenir, controlar y proteger dicho dominio.

Además, dictamina que las Administraciones competentes delimitarán las zonas inundables, teniendo en cuenta los estudios y datos disponibles que los Organismos de cuenca deben trasladar a las mismas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 11.2 de la Ley de Aguas. Por su parte, las actuaciones en cauces públicos situados en zonas urbanas, corresponderán a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo, sin perjuicio de las competencias de la Administración hidráulica sobre el dominio público hidráulico.

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas.

En su artículo 6.1, define, el concepto de zona de servidumbre para uso público y de zona de policía, en la que se condiciona el uso del suelo y las actividades que se desarrollan.

En su artículo 11, se dictamina que los Organismos de cuenca deben facilitar a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo, los datos y estudios disponibles sobre avenidas, al objeto de que se tengan en cuenta en la planificación del suelo y, en particular, en las autorizaciones de usos que se acuerden en las zonas inundables.

Por otro lado, también se establece, que el Gobierno, por Real Decreto, podrá establecer las limitaciones en el uso de las zonas inundables que estime necesarias, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y bienes. Los Consejos de Gobierno de las Comunidades Autónomas podrán establecer, además, normas complementarias de dicha regulación.

En su artículo 43, se especifica que podrán ser declarados de protección especial, determinadas zonas, cuencas o tramos de cuencas, acuíferos o masas de agua, por sus características naturales o interés ecológico, de acuerdo con la legislación ambiental y de protección de la naturaleza. Los planes hidrológicos, deberán, además, recoger la clasificación de dichas zonas y las condiciones específicas para su protección, que serán respetadas en los diferentes instrumentos de ordenación urbanística del territorio.

- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.

En su artículo 59, se establece que los planes hidrológicos deben contemplar las medidas que deben adoptarse en circunstancias excepcionales, correspondientes a situaciones hidrológicas extremas, incluyendo la realización de planes o programas específicos, elaborados en el ámbito territorial de la demarcación y relacionados con la protección frente a las inundaciones.

- Ley 9/2010, de 30 de julio, de Aguas de Andalucía.

En sus artículos 58, 59 y 60, se establecen los instrumentos de prevención del riesgo de inundación. De forma simplificada, esta normativa conlleva las siguientes tareas:

- a) Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) e identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs).
  - b) Mapas de Peligrosidad por Inundaciones y Mapas de Riesgo de Inundación.
  - c) Planes de Gestión del Riesgo de Inundación.
- El Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

En su artículo 15, especifica que los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), y deberán, además, reconocer el carácter rural de los suelos en los que concurren dichos riesgos de inundación o de otros accidentes graves.

Por otro lado, los planes de protección civil a elaborar, se redactarán de forma coordinada y mutuamente integrada a los mapas de peligrosidad y riesgo y al contenido de los PGRI. Los planes de desarrollo agrario, de política forestal, de infraestructura del transporte y demás que tengan incidencia sobre las zonas inundables, deberán también ser compatibles con los PGRI.

Además, en Andalucía, se cuenta con el Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces, previo a los instrumentos que establece necesarios la Ley de Aguas de Andalucía.

La Junta de Andalucía abordó, en 1997, la elaboración de un estudio para definir el verdadero alcance de la problemática de las inundaciones en la región. Como consecuencia, en 1998 se inició la redacción de dicho plan, cuya formulación se dispuso por Decreto 54/1998, de 10 de marzo y finalmente aprobado por Decreto 189/2002, de 2 de julio y cuyo principal objetivo, es el de establecer las medidas necesarias para evitar o minimizar las inundaciones en los núcleos urbanos.

Con todo ello, quedando claros los instrumentos de prevención del riesgo de inundación existentes, se procede a analizar la situación del río Guadalhorce dentro de los planes.

### 3.2 Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces

El elevado número de puntos de riesgo de inundación localizados en la Cuenca del Guadalhorce y su nivel de peligrosidad, pone de manifiesto, su denotación como una zona altamente conflictiva, tal y como remarcan los estudios realizados por la Agencia Andaluza del Agua.

En la totalidad del territorio Andaluz, se inventariaron 1.099 puntos de riesgo por inundaciones, clasificados de mayor a menor gravedad entre los rangos A, B, C y D. Se detectaron puntos de riesgo en el 56% de los municipios andaluces (428 municipios exactamente), siendo las provincias de Almería, Granada y Málaga, las más afectadas.

El Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces, elabora la siguiente tabla, en la que se recogen los municipios con riesgo de inundación situados en la Cuenca del Guadalhorce y, que pone de manifiesto, la importancia del estudio de dicha zona:

Tabla 3-1. Puntos de riesgo de la cuenca del Guadalhorce.

Municipio	Núcleo	Zona	Nivel de Riesgo
Alhaurín de la Torre	Alhaurín de la Torre	Arroyo Blanquillo	C
Alhaurín de la Torre	Alhaurín de la Torre	Arroyo de las Chorreras	C
Alhaurín de la Torre	El Romeral	Arroyo del Valle	D
Alhaurín de la Torre	Pinos de Alhaurín	Arroyo el Cura	C
Alhaurín el Grande	Alhaurín el Grande	Arroyo de la Villa	B
Almargen	Almargen	Río Salado	D
Almargen	Almargen	Arroyo de las Catorce	C
Alora	Alora	Red de alcantarillado	C
Alora	Barrio del Punete	Red de alcantarillado	B
Antequera	Antequera	Arroyo El Alcázar	B
Antequera	Antequera	Río la Villa	C
Antequera	Antequera	Arroyo Las Adelfas	C
Antequera	Bobadilla	Río Guadalhorce	B
Antequera	Bobadilla-Estación	Arroyo La Sangradera	D
Antequera	Cartaojal	Arroyo Serrano	B
Antequera	La Joya	Arroyo La Alamedilla	C
Antequera	Villanueva de la Concepción	Arroyo del Núcleo	B
Antequera	Villanueva de la Concepción	Arroyo del Nacimiento	C
Archidona	Archidona	Arroyo de la Sierra	C
Archidona	Huertas del Río	Arroyo Marín	B
Ardales	Ardales	Arroyo Cantarranas	IP
Campillos	Campillos	Arroyo del Rincón	C
Campillos	Campillos	Arroyo El Cuervo	C
Cártama	Estación de Cártama	Río Guadalhorce	D
Cañete la Real	Barriada de la Atalaya	Arroyo Mjamoción	A
Coín	Coín	Arroyo Bajo	D
Coín	Coín	Arroyo K.O	B
Coín	Coín	Arroyo Nacimiento	D
Guaro	Guaro	Arroyo Guaro	B

Málaga	Campanillas	Arroyo Campanillas	A
Málaga	Málaga	Río Guadalhorce	A
Málaga	Málaga	Arroyo de Las Cañas	A
Málaga	Málaga	Arroyo Pilonés	B
Pizarra	Pizarra	Arroyo Hondo	C
Pizarra	Pizarra	Arroyo Raja Ancha	B
Pizarra	Pizarra	Arroyo Los Búhos	C
Pizarra	Pizarra	Arroyo La Colada	C
Teba	Huerta de la Cueva	Río Guadalteba	B
Teba	Teba	Río de la Venta	B
Valle de Abdalajís	Valle de Abdalajís	Caño de María Castillo	B
Valle de Abdalajís	Valle de Abdalajís	Río de Las Piedras	D
Villanueva del Rosario	Villanueva del Rosario	Arroyo de La Canaleja	B
Villanueva del Rosario	Villanueva del Rosario	Cañadas sin nombre	C
Villanueva del Trabuco	Villanueva del Trabuco	Arroyo Chavo	C
Villanueva del Trabuco	Villanueva del Trabuco	Río Guadalhorce	A

Cabe destacar, las zonas de riesgos localizadas en los núcleos de Cártama, Pizarra y Málaga, bajo estudio, especialmente, los mayores niveles de estos dos últimos.

Además de la identificación de la problemática y riesgos de las inundaciones, la aportación más relevante del Plan, fue la intervención a través del planeamiento urbanístico, con el fin de aumentar la adaptación de los asentamientos en los cursos fluviales, evitando así la ocupación de los cauces y limitando los usos en zonas inundables.

### 3.3 Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación e Identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación

Para la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) y la identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs), se ha empleado toda la información contenida en el Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en cauces urbanos andaluces. Paralelamente, se ha hecho uso, además, de la cartografía y/o visores cartográficos disponibles, destacando la información obtenida del MAPAMA.

Así pues, para la identificación de las Áreas de Riesgo, se ha elaborado, como se muestra en el “*Apartado 8: Estudio de Inundación*”, el mapa correspondiente a las ARPSIs de la zona de estudio.

### 3.4 Planes de Gestión de Riesgo de Inundación

La identificación de las ARPSIs, sirvió de base en el marco de la preparación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación en cumplimiento de la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación aprobados en 2015, por el Real Decreto 21/2016, de 15 de enero, por el que se aprueban los Planes de gestión del riesgo de inundación de las cuencas internas de Andalucía.

Su principal objetivo, radica en una eficiente coordinación de las actuaciones a ejecutar por parte de todas las Administraciones Públicas, con el fin de reducir los riesgos de inundación. Para ello, se apoyan en una serie de programas de medidas, que atienden las fases de prevención, protección, preparación y recuperación o revisión tras las inundaciones.

A continuación, se muestran, como medidas estructurales, las siguientes actuaciones propuestas por el plan:

Tabla 3-2. Actuaciones referidas a medidas estructurales en la cuenca del Guadalhorce.

Ámbito	Medida	Actuaciones Específicas	Administración Responsable	Presupuesto (Millones €)	Plazo (Años)
ARPSI	Medidas Estructurales (Encauzamientos, motas, diques, etc.) que implican intervenciones físicas en los cauces, aguas costeras y áreas propensas a inundaciones	Elaboración de guías técnicas para la realización de los estudios coste-beneficio de las infraestructuras	Administración Estatal	0,07	2
		Realización de estudios de desarrollo y análisis de viabilidad ambiental, económica y social de actuaciones de defensa de márgenes y encauzamientos	Todas	1,5	6
		Adecuación del curso bajo del río Guadalhorce. Sustitución del puente sobre la antigua N-340 y ampliación de la capacidad del encauzamiento	Administración General del Estado	-	-
		Encauzamiento del río Campanillas a su paso por Campanillas (Málaga)	Administración Hidráulica Andaluza	-	-

Como puede observarse, las actuaciones sobre la cuenca del Guadalhorce, se basan principalmente en la adecuación del curso bajo del propio río y del río Campanillas, muy próximo a la zona de estudio, lo que evidencia el elevado riesgo de inundación existente.

### 3.5 Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas

Los planes de gestión del riesgo de inundación y los planes hidrológicos, son elementos importantes en la realización de una gestión integrada de la cuenca. Es por ello, que la coordinación entre ambos procesos, guiados por la Directiva de Inundaciones y la Directiva Marco del Agua respectivamente, es imprescindible.

Por su parte, el Plan Hidrológico de segundo ciclo, con año horizonte en 2021, contiene las actuaciones correspondientes a cumplir los objetivos de la Planificación, así como aquellas marcadas en su artículo 42 en materia de inundaciones. Dichas actuaciones, serán complementarias y/o dependientes, y contarán con unos plazos de ejecución y puesta en servicio importantes.

Por su parte, el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación, se centrará en las medidas indicadas en el RD 903/2010, que constituyen las medidas de gestión del riesgo con un plazo de ejecución e implantación menor.

Las actuaciones recogidas por el Plan Hidrológico, que competen a la zona próxima al estudio, son las siguientes:

Tabla 3-3. Actuaciones contempladas en el programa de medidas del P.H. de las C.M.A.

Actuación	Año 2015	Año 2021	Grupo de Medidas	Carácter	Presupuesto	
					Total	Año 2015
Encauzamiento del río Campanillas		X	Fenómenos meteorológicos extremos	Complementaria	5.366.5000	0
Actuaciones correctoras de riesgo por inundación en núcleos urbanos de la Costa del Sol Oriental	X	X	Fenómenos meteorológicos extremos	Complementaria	81.110.000	10.000.000

Así como una serie de actuaciones hidrológico-forestales en las cuencas de los embalses de Guadalhorce, Guadalteba y Conde de Guadalhorce, con un presupuesto de 2 Millones de Euros y un año horizonte 2021-2027.

Como puede observarse, se recoge una medida estructural tipo encauzamiento sobre el río Campanillas, al igual que contemplaba el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación.

Cabe destacar, que en el artículo 93 “Protección contra Inundaciones” del documento Normativa del PHCMA, se especifica que, en los núcleos urbanos con problemas de inundaciones identificados, se adoptarán las medidas necesarias para la defensa frente a avenidas de 500 años de periodo de retorno.

Puede, por tanto, concluirse que, tras haber evaluado el riesgo de inundación existido hasta la fecha y tras la revisión de los planes existentes en materia de inundaciones, la necesidad de actuación sobre el tramo bajo del río Guadalhorce, es de vital importancia.

En los siguientes apartados, se realizarán una serie de estudios relativos a las características o variables más importantes que definen la cuenca del río Guadalhorce y por extensión, la zona de estudio (geología, relieve, usos de suelo, climatología, pluviometría, hidrología, etc.). Para la realización de los mismos, se ha empleado la información contenida en el denominado “Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y para la ordenación de la cuenca del río Guadalhorce”, elaborado para la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

# 4 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO Y BIÓTICO

---

*If you want to model nature you must copy nature.  
If you want to copy nature you must  
understand nature.*

*- Ib A. Svendsen -*

Como se ha comentado anteriormente, el tramo de cauce a estudiar, corresponde a la subcuenca del bajo Guadalhorce, concretamente a la última parte del mismo, desde el municipio de Pizarra, hasta su desembocadura en la costa de Málaga capital. No obstante, antes de iniciar todo el proceso de cálculo correspondiente, es necesario analizar las características y parámetros que definen el entorno.

En el presente apartado, se detalla de manera concisa, el análisis ambiental realizado sobre toda la cuenca del Guadalhorce, y, más concretamente, en nuestra zona de estudio. Su objetivo, es describir las particularidades territoriales que definen la zona analizada y que pueden entrar en relación con los fenómenos extremos de las inundaciones, tanto en su origen como en su impacto asociado.

## 4.1 Relieve

La cuenca del río Guadalhorce se inscribe en el conjunto de las Cordilleras Béticas, lo que le confiere un carácter predominantemente montañoso. El principal influyente que define este comportamiento, es la presencia de largas y estrechas cadenas montañosas que atraviesan la parte central de la cuenca en dirección SO-NE, separadas entre sí por terrenos más llanos.

Después de su nacimiento en el Puerto de los Alazores, el Guadalhorce avanza hacia el oeste recorriendo unos terrenos de colinas y pequeños llanos, en los términos de Villanueva del Trabuco y Villanueva del Rosario. Este valle inicial, está limitado al sur por las grandes sierras de Gorda, Camarolos y San Jorge, alcanzando altitudes de 1600 metros sobre el nivel del mar, siendo estas, de las que el Guadalhorce recibe el primer gran aporte de agua. Más adelante, el río queda limitado por otras sierras más pequeñas que se extienden entre Archidona y Antequera, formando a su paso, el desfiladero conocido como la Garganta del Guadalhorce.



Figura 4-1. Garganta del Guadalhorce.

A la salida de la Garganta, el río pasa junto a la famosa Peña de los Enamorados, y entra en la gran llanura de Antequera, encontrando más adelante, las zonas de construcción de las grandes presas, tanto del Guadalhorce como de los afluentes Guadalteba y Turón, para continuar su trayecto hasta su desembocadura en la costa de Málaga.

Dentro de la cuenca, se localizan elementos morfológicos pertenecientes a varios sistemas, caracterizados por terrenos abruptos y elevadas altitudes, como las Serranías de Ronda, el Cordón Montañoso Litoral, los sistemas Béticos, la Sierra Bermeja, o las Sierras de Loja, entre otras.

Por otro lado, dentro del territorio de la cuenca, destacan dos grandes depresiones de relieve suave separadas por las alineaciones montañosas centrales:

- a) Depresión de Antequera: localizada en el sector septentrional de la cuenca, cuenta con altitudes en torno a los 360 ó 420 metros sobre el nivel del mar y con un relieve moderadamente inclinado (pendiente < 3%).
- b) Valle del Bajo Guadalhorce: situada al sureste de la cuenca, próxima a la desembocadura del río y conformando el Litoral Mediterráneo. Su cota alcanza como mucho los 450 metros sobre el nivel del mar.

En este contexto, el tramo de río en estudio se encuentra íntegramente en la zona relativa al Valle del Bajo Guadalhorce, discurrendo por él hasta su desembocadura.

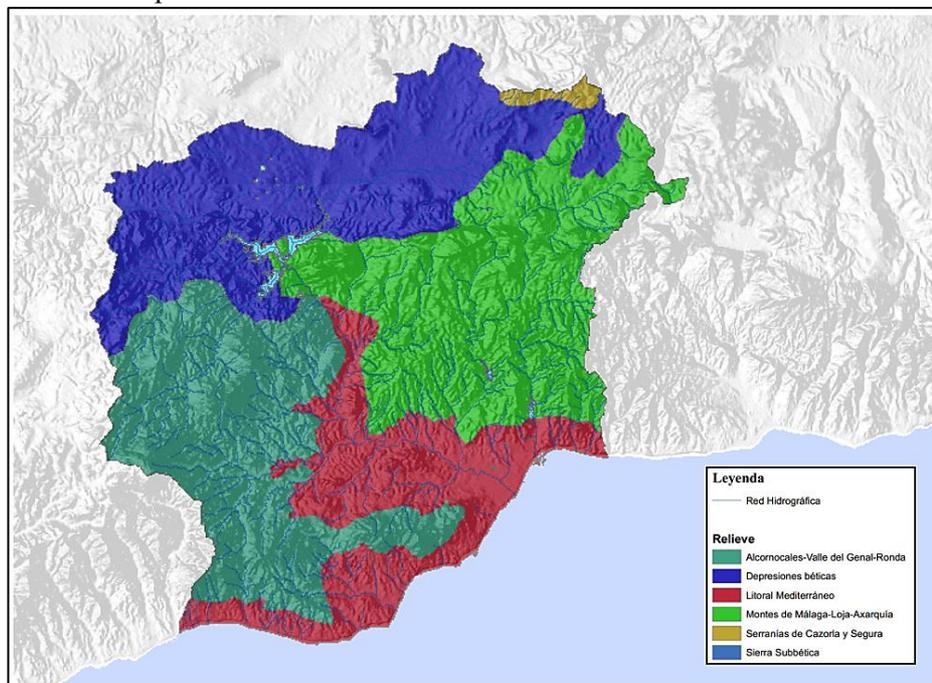


Figura 4-2. Mapa en relieve de la cuenca del Guadalhorce.

## 4.2 Climatología

La climatología de la cuenca del río Guadalhorce, viene condicionada por su posición, situada en el extremo occidental de la cuenca mediterránea; por su latitud, más próxima al Trópico de Cáncer que la mayor parte de la Península Ibérica; y por su relativa proximidad al océano Atlántico, responsable de la transición gradual entre el clima húmedo medio atlántico y el medio mediterráneo a lo largo de toda la provincia.

Por todo ello, y según la clasificación climática de Köppen, el clima de la cuenca del Guadalhorce se encuentra dentro del denominado clima mediterráneo, donde, la variabilidad climatológica que se analiza, se estructura en función de las temperaturas y precipitaciones medias anuales, así como de la estacionalidad de la precipitación.

El sistema de Köppen, es una de las clasificaciones climáticas más utilizadas habitualmente, debido a su sencillez. Se fundamenta en la relación establecida entre la vegetación natural y el clima, por lo que los límites entre unos y otros se establecen considerando la distribución vegetal.

Tabla 4-1. Clasificación climática de Köppen.

Temperatura	Humedad					
	S	W	f	m	w	s
<b>A</b> Tropical	-	-	Ecuatorial	Monzónico	Tropical de sabana	Tropical de sabana
<b>B</b> Seco	Estepario	Desértico	-	-	-	-
<b>C</b> Templado	-	-	Subtropical sin estación seca/Oceánico	-	Subtropical de altura	Mediterráneo
<b>D</b> Continental	-	-	Continental/Subártico	-	Manchuriano	-
			<b>T</b>		<b>F</b>	
<b>E</b> Frío		Clima de Tundra			Clima Polar	

Como puede observarse, la zona de estudio quedaría definida dentro del grupo (Cs) o Templado Mediterráneo, caracterizado por:

- Veranos secos y calurosos, en contraste con los inviernos más fríos.
- Lluvias irregulares, pero con fuertes tormentas durante pocos días a lo largo del año y generalmente en los meses de invierno.
- Largo periodo de sequía o de lluvias muy escasas en verano.

Dentro de estas características generales pueden existir diferencias en función de algunos factores, como la altitud de los terrenos o su mayor o menor cercanía al mar.

Las variables que mejor definen el régimen climático, son el viento, las temperaturas y las precipitaciones. Estas últimas, se analizarán directamente en el “*Apartado 5: Estudio Pluviométrico*”.

#### 4.2.1 Viento

Las mayores frecuencias anuales de la dirección corresponden al S y SE. Las velocidades, en general, no son elevadas. La media mensual más alta, por rumbo, corresponde al NW con 19 km/h, en el mes de abril y la más baja al NE, con 2 km/h, en los meses de septiembre y octubre.

#### 4.2.2 Temperaturas

La proximidad al mar, provoca una influencia mediterránea en casi la totalidad de la cuenca. Así, los valores extremos llegan a tomar características típicas de clima mediterráneo continentalizado, superando usualmente los 40°C (especialmente en la depresión de Antequera) y bajando hasta los 0°C en invierno (especialmente en el entorno de la Serranía de Ronda).

La temperatura media anual está comprendida en la mayor parte de la cuenca entre 15 y 17°C, siendo ligeramente inferiores a los 14°C en la franja oriental del Arco Calizo Central. En la franja costera y en el entorno del Valle del Guadalhorce, las temperaturas son más elevadas, en torno a 2-4°C superiores a las del resto de la cuenca y superiores a los 18°C.

La media del mes más cálido ronda los 24-26°C en la zona litoral y el entorno del Valle del Guadalhorce. En las zonas más bajas y próximas al mar, como en la Desembocadura del Guadalhorce, es usual superar valores de 10°C como medias del mes más frío (>12 °C en el caso del entorno de la ciudad de Málaga), mientras que, en zonas más elevadas y alejadas del mar, como la Serranía de Ronda, ronda los 8 °C.

Los datos de temperatura media mensual que se muestran en la siguiente tabla, pertenecen a las estaciones de la cuenca: 6119I (Ardales “Vivero”), 6146I (Cártama “Puente Fahala”) y 6171 (Málaga “Carmelitas”):

Tabla 4-2. Temperatura media mensual en algunas estaciones de la cuenca.

Clave	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
6119I	8,2	9,4	11,1	12,6	15,9	20,0	23,2	23,5	20,7	16,0	11,8	9,3	15,1
6146I	10,1	11,5	12,9	14,8	18,1	21,8	24,8	25,0	21,9	17,3	13,7	11,2	16,9
6171A	11,9	12,7	14,9	16,9	19,9	23,4	26,0	26,4	23,6	19,1	15,6	12,9	18,6

Con respecto al resto de la cuenca, se ha elaborado el siguiente mapa:

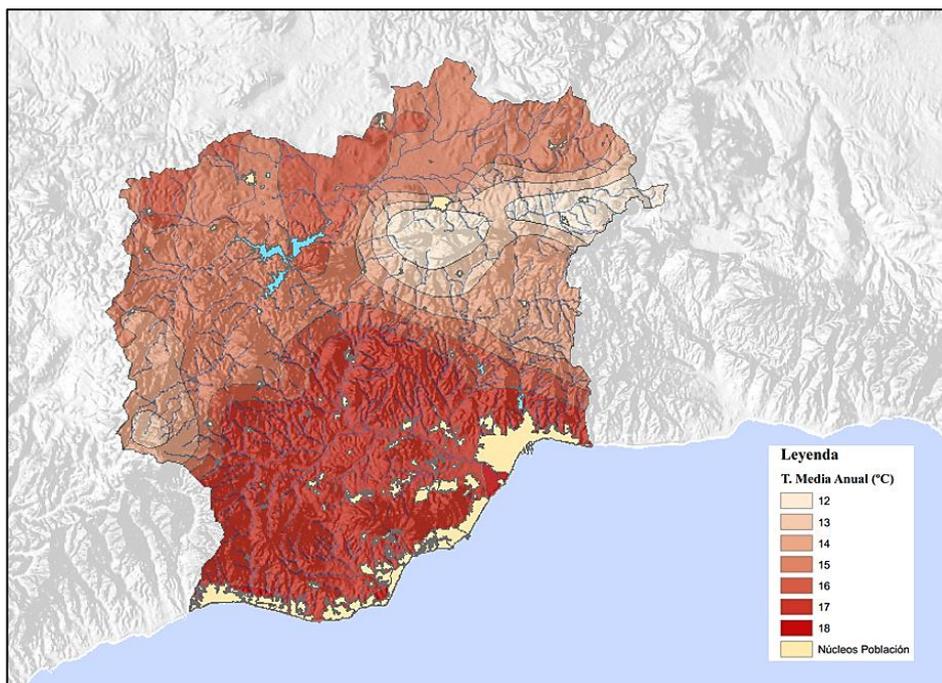


Figura 4-3. Mapa de temperatura media anual de la cuenca del Guadalhorce.

### 4.3 Geología

Geológicamente, la cuenca del Guadalhorce constituye una región complicada, pues a la variedad litológica, hay que añadir la amplia diversidad de origen, génesis e historia geológica que han sufrido los materiales aflorantes.

Para poder describirla correctamente, hay que situarse en el ámbito de las Cordilleras Béticas, que constituyen el elemento más occidental del conjunto de las cadenas alpinas europeas y que se encuentran ocupando la mayor parte del territorio andaluz. En ellas, se pueden distinguir varias zonas, dominios y unidades:

- Zonas Externas: incluyen los dominios del Prebético, el Subbético y el Penibético.
- Zonas Internas: constituidas por 3 mantos superpuestos, el Complejo Nevado-Filábride, el Complejo Alpujárride y el Complejo Maláguide.
- Zonas Intermedias: comprenden las denominadas unidades del Campo de Gibraltar y su litología está representada principalmente por areniscas, margas y arcillas.

- Depresiones Postorogénicas: también denominadas neógenas, corresponden a áreas de subsidencia fruto de los fenómenos orogénicos ocurridos durante el Mioceno debido al acercamiento y colisión de la Zona Interna y la Zona Externa. Estas áreas de subsidencia fueron posteriormente rellenadas por materiales sedimentarios desde el Mioceno Superior hasta el Cuaternario.

Dentro de esta última categoría y en lo correspondiente a la actual cuenca del río Guadalhorce, existen dos zonas principales de relleno postorogénico. La primera, la Depresión de Antequera, se localiza al norte de la provincia, en el entorno de los municipios de Archidona, Teba, Campillos y Antequera. La segunda, al sur de la cuenca, conforma el valle del Bajo Guadalhorce, zona relativa a nuestro tramo de estudio.

En lo que respecta a los materiales sedimentarios encontrados en la zona, destacan los de origen cuaternario (conglomerados, arenas y arcillas) que originan abanicos aluviales y, en algunos casos, terrazas fluviales.

A continuación, se muestra un mapa descriptivo, elaborado con ArcGIS, relativo a la geología presente en la cuenca del río Guadalhorce:

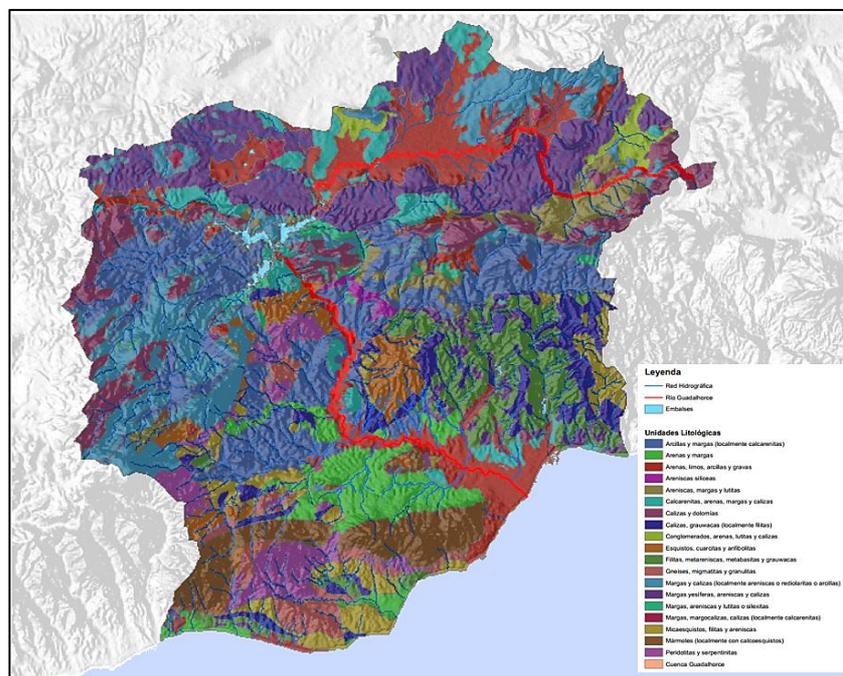


Figura 4-4. Mapa geológico de la cuenca del Guadalhorce.

Como puede apreciarse, en el tramo de estudio analizado, el cauce y los alrededores del río, se componen predominantemente de arenas, gravas, limos, arcillas.

Finalmente, con respecto a los valores de pendiente, cabe resaltar que las zonas planas y moderadamente inclinadas (pendientes inferiores al 7%) ocupan 943 km<sup>2</sup>, equivalente al 28,8% de la cuenca. Aparecen distribuidas de manera discontinua a lo largo del cauce del río Guadalhorce, constituyendo áreas de moderada extensión en el entorno de la Depresión de Antequera y del Valle del Bajo Guadalhorce. Mas concretamente, dentro de nuestra zona de estudio, la pendiente se sitúa por debajo del 3% lo que la constituye como terrenos con planos suavemente inclinados.

## 4.4 Hidrología

El río Guadalhorce, desde su nacimiento hasta su desembocadura, puede ser estructurado en 4 grandes tramos hidrológicos:

- Tramo alto: corresponde al tramo de río que transcurre entre su nacimiento y la confluencia con el río Turón, siendo este y el río Guadalteba, los principales afluentes de este tramo.
- Tramo medio: en este, el Guadalhorce recibe diferentes afluentes tanto por su margen derecha como izquierda, como son el río Grande, el arroyo de Las Piedras o el arroyo de Casaboronela.
- Tramo bajo: en este, el Guadalhorce recibe por su margen izquierdo importantes aportes hídricos procedentes del río de Campanillas, del río Fahala, el arroyo de la Breña Higuera y el arroyo del Cañaverál, ya próximo a la desembocadura.
- Desembocadura al mar Mediterráneo: en ella, el Guadalhorce origina un delta aluvial delimitado por dos brazos del río: el Brazo Mayor y el Brazo Menor, o río Viejo.

El río Guadalhorce y sus principales afluentes, el río Guadalteba y el río Turón, se encuentran regulados mediante un sistema de embalses. Éste está formado por tres embalses principales próximos entre sí: el embalse de Guadalhorce (en el tramo alto del Guadalhorce), el embalse de Guadalteba (sobre el río homónimo) y el embalse del Conde de Guadalhorce (sobre el río Turón). Los tres embalses, con una capacidad próxima a los 400 hm<sup>3</sup>, son empleados para producción hidroeléctrica, abastecimiento humano y abastecimiento para regadío.

Finalmente, referente a la presencia de masas de agua artificiales en la cuenca, es necesario destacar la presencia del canal de la Laguna Herrera en la orilla derecha del río Guadalhorce a su paso por los Llanos de Antequera.

A continuación, se adjunta el siguiente mapa, elaborado con ArcGIS, en el que se distinguen los principales afluentes localizados exclusivamente dentro de la zona de estudio:

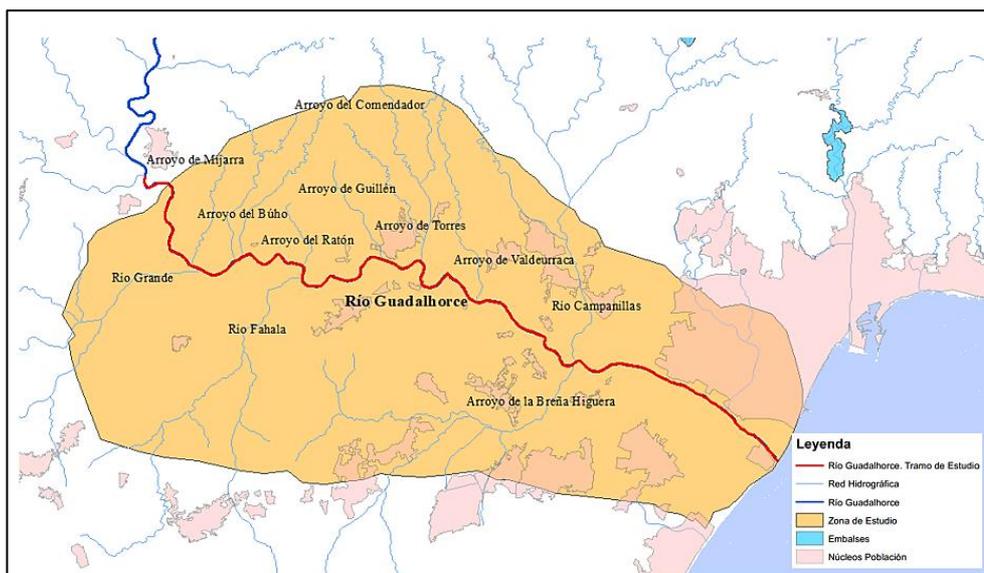


Figura 4-5. Mapa hidrológico de la zona de estudio.

## 4.5 Usos de suelo

Para el análisis de los usos de suelo se ha empleado información espacial en formato GIS procedente de los Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA), así como diversos Mapas de Usos y Coberturas Vegetales de la Junta de Andalucía y del proyecto europeo Corine Land Cover. El territorio de la cuenca del río Guadalhorce se encuentra principalmente destinado a los siguientes usos:

- Agrícola (61%): predominan los cultivos en secano (viñedos, cultivos herbáceos u otros cultivos leñosos) y las plantaciones de olivar, con 613 km<sup>2</sup> (19% de la cuenca y 31% del territorio agrícola). Por su parte, los regadíos, aparecen asociados al cauce del río Guadalhorce y de algunos de sus afluentes. Predominan especialmente en el entorno del Valle del Bajo Guadalhorce, favorecidos por la regulación ejercida por el sistema de embalses aguas arriba, concentrándose en esta zona la gran mayoría de las plantaciones de cítricos de la provincia.
- Áreas forestales y naturales (33,8%): predominan en el sector central de la cuenca debido al predominio de alineaciones montañosas. Abarcan las superficies de matorrales y las zonas con escasa cobertura vegetal. La superficie forestal restante corresponde a pastizales, masas forestales mezcla de coníferas y quercíneas y eucaliptales.
- Zonas urbanas, industriales e infraestructuras (3,7%): se concentran principalmente en el entorno de la Hoya de Málaga y del Valle del Guadalhorce, correspondiendo principalmente a urbanizaciones y zonas comerciales e industriales pertenecientes los términos municipales de Málaga y de Alhaurín de la Torre, así como a vertederos, zonas en construcción y explotaciones mineras.
- Zonas húmedas y superficies de agua (1,5%): se debe, en su mayor parte, a la presencia del Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce, de los embalses de Guadalhorce, Guadalteba y del Conde de Guadalhorce y del cauce del río Guadalhorce.

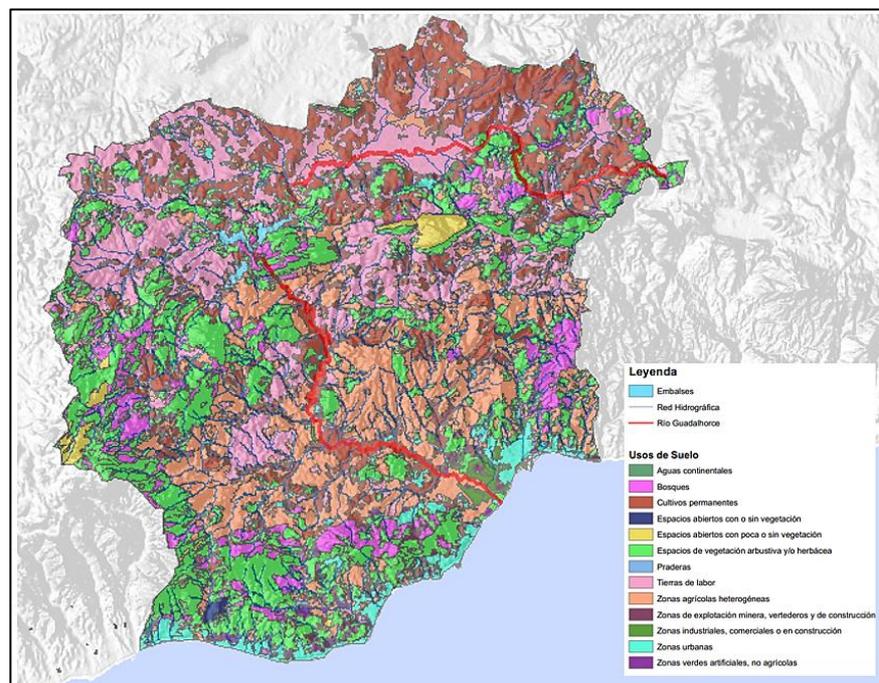


Figura 4-6. Mapa de usos de suelo de la cuenca del Guadalhorce.

## 4.6 Zonas y bienes protegidos

De entre todas las zonas y espacios naturales protegidos presentes en el territorio que configura la cuenca del río Guadalhorce, destaca, por su localización en el tramo de estudio, como puede apreciarse en la siguiente figura, el denominado “Paraje Natural - Desembocadura del Guadalhorce”.



Figura 4-7. Espacios y bienes protegidos en la cuenca del Guadalhorce.

Este complejo lagunar de génesis artificial, fue declarado espacio natural protegido en 1989 en la Ley 2/89, y desde 1998 ha sido objeto de numerosas actuaciones de acondicionamiento y mejora ambiental.

Ocupa una superficie de unas 67 ha entre los dos brazos del río Guadalhorce y está situado dentro del casco urbano de la ciudad de Málaga, lo que constituye un hecho a destacar en el contexto de los humedales andaluces, ya que casi todos ellos están localizados en áreas eminentemente agrícolas. Con respecto a la salinidad de sus aguas, resalta su variabilidad en función de su situación relativa respecto al litoral y al río.

Otro aspecto importante, es el elevado interés ornitológico del complejo como lugar de escala hacia las áreas de invernada de una gran cantidad de aves, habiéndose registrado en este espacio protegido una de las mayores representaciones del total de especies de aves acuáticas censadas en la provincia.

## 4.7 Vegetación y Fauna

### 4.7.1 Vegetación

Desde un punto de vista biogeográfico, la cuenca del río Guadalhorce pertenece al reino Holártico, región Mediterránea occidental, superprovincia Mediterráneo-Ibero-Atlántica, provincia Bética. Esta provincia, que se caracteriza por presentar una elevada diversidad tanto a nivel biológico como edáfico, climático, geológico o morfológico, se divide en 7 sectores, de los cuales cuatro se encuentran presentes en el territorio de la cuenca vertiente al río Guadalhorce: sector Hispalense, sector Rondeño, sector Malacitano-Almijarense y sector Subbético.

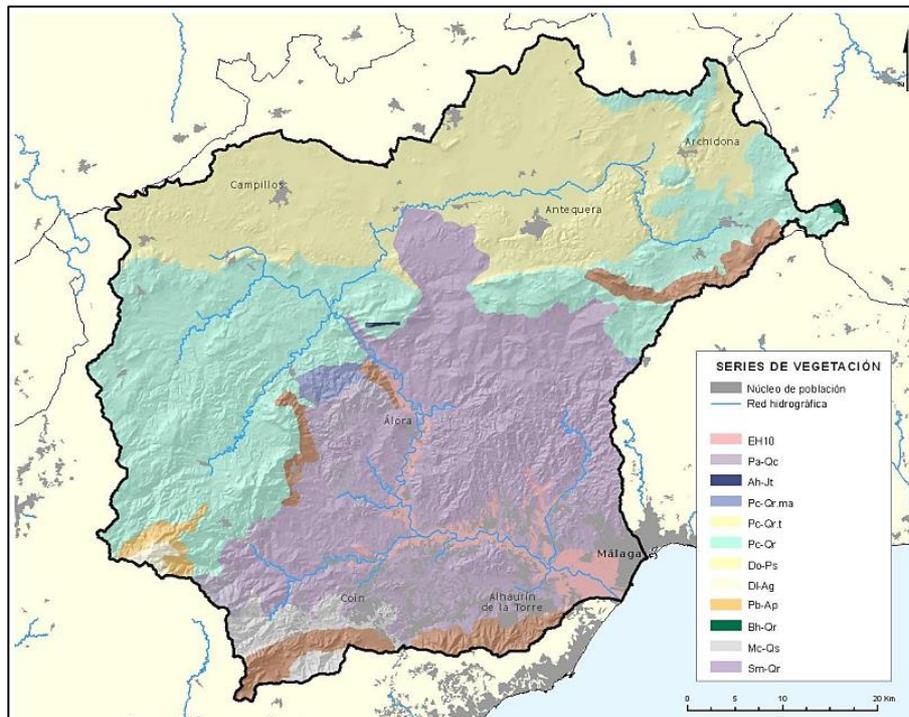


Figura 4-8. Distribución de las series de vegetación en la cuenca del Guadalhorce.

Como puede apreciarse en la figura anterior, la serie que discurre por la zona de estudio (ribera del Bajo Guadalhorce y su llanura de inundación), es la EH10. Geoserie edafohigrófila mesomediterránea inferior y termomediterránea rondeña, malacitano-almijareense, alpujarreña, almeriense-occidental y manchego-espunense mesótrofa. Aparece en ríos y arroyos sobre sustratos que combinan materiales silíceos y carbonatados.

#### 4.7.2 Fauna

Dentro de los distintos parajes aún naturales en la zona de estudio, las especies se distribuyen según una serie de factores, como son el clima, la vegetación, la altitud, la presencia o no de agua, etc. Es por ello, que se hace importante, en una descripción de este tipo, conocer los distintos hábitats y familias de especies existentes.

Las principales amenazas existentes sobre la fauna en el territorio que configura la cuenca del río Guadalhorce provienen de la destrucción y fragmentación del hábitat. Entre los motivos se encuentran la construcción de infraestructuras lineales, la conversión de zonas naturales y forestales a superficies edificadas, la homogeneización de cultivos y la pérdida de ecosistemas riparios. Este problema es especialmente acusado en la zona urbana y periurbana de Málaga y en el entorno del Valle del Guadalhorce. A esto se le suma el furtivismo, especialmente importante en la desembocadura del río.

Algunos ejemplos de las familias localizadas en la zona de estudio, son los siguientes:

- Comunidad de peces: abundan el barbo común, el cachuelo y la boga de río. En la zona relativa a los embalses, se introdujeron, para su pesca deportiva, la carpa, el blackbass y el lucio. No obstante, esta comunidad aparece notablemente reducida, debido a diversas causas como la proliferación de las obras hidráulicas, las variaciones estacionales de caudal, la concentración de sales en el agua, etc.
- Comunidad de reptiles: proliferan el camaleón, el lagarto ocelado, las lagartijas, salamanquesas, y otras culebras como la bastarda, la de herradura y la de escalera y, aunque más escaso, el galápagos leproso.
- Comunidad de aves: se trata del grupo más abundante de la zona, con más de 260 especies diferentes, entre las que se encuentran el cormorán común, la garza real, la garceta común, el martinete, la garcilla bueyera o la cigüeña común, entre muchas otras.

- Comunidad de mamíferos: destacan el erizo, las musarañas, los topillos, las ratas y ratones, y los murciélagos. Dentro de esta comunidad, encontramos también a los carnívoros y depredadores de la zona, como el zorro, la comadreja o la gineta.

## 4.8 Paisaje

La elevada superficie de la cuenca vertiente superficial del río Guadalhorce, la diversidad geomorfológica del territorio en que se engloba y la presencia de altos valores naturales, faunísticos y florísticos conllevan que la cuenca del río presente una alta riqueza paisajística. Desde un punto de vista geomorfológico, esta riqueza se manifiesta en la presencia de paisajes pertenecientes a cinco áreas paisajísticas distintas: Campiñas intramontanas, Campiñas de piedemonte, Valles, vegas y marismas interiores, Valles, vegas y marismas litorales y Serranías de montaña media.

De manera general, puede afirmarse que la naturalidad paisajística de estas áreas se ha visto mermada debido a las actividades antrópicas (urbanización, roturación y puesta en cultivo de las tierras, construcción de embalses, etc.). No obstante, el tramo bajo estudio y en general la cuenca del Guadalhorce presenta unas cualidades estéticas destacadas procedentes de los contrastes paisajísticos (masas de pinos densos/roquedos, plantaciones agrícolas/zonas húmedas, etc.), de la diversidad de formas (por ejemplo, verticalidad y abruptosidad de las calizas frente a la disposición horizontal y redondez de las areniscas), de color (tierra/agua, estacionalidad de los cultivos, vegetación/afloramientos calizos) y de texturas (matorrales, roquedales, tierras de labor, etc.).

# 5 ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

---

*Si hay magia en este planeta, está  
contenida en el agua.*

*- Loran Eisely -*

**E**n el presente apartado, se analizarán los datos relativos a las precipitaciones producidas en la zona de estudio y que darán pie, como se verá en el siguiente punto, al posterior estudio hidrológico.

## 5.1 Caracterización de la zona

La configuración orográfica de la cuenca, da lugar a diversos contrastes pluviométricos, que no sólo revelan diferencias en cuanto a volúmenes anuales o mensuales, sino también respuestas diferentes ante la circulación general atmosférica a lo largo de la cuenca. En primer lugar, la cercanía del Atlántico y la progresiva amplitud del Mediterráneo matizan las precipitaciones de oeste a este. Al mismo tiempo, la presencia de grandes relieves al suroeste implica una reducción en las precipitaciones hacia el noreste. Como consecuencia, las zonas de menores precipitaciones se localizan en los fondos del Valle del Guadalhorce y a sotavento de algunas alineaciones montañosas, con valores promedio en torno a 500 mm/año.

De manera general, pueden identificarse tres áreas pluviométricas en la cuenca:

- Zona típicamente húmeda, con valores de precipitación anual media superiores a 800 mm. Abarca el extremo occidental de la cuenca, siendo su punto máximo el entorno de la Sierra de las Nieves, donde la precipitación toma valores medios de 1000-1400 mm/año.
- Zona subhúmeda, con valores pluviométricos en torno a 600-800 mm/año. Corresponde a los límites periféricos del Valle del Guadalhorce. Incluye también la mayor parte de la zona nororiental de la cuenca.
- Zona seca-semiárida, con valores pluviométricos medios anuales de 400-600 mm. Corresponde al Valle del Guadalhorce, las zonas bajas y medias de los Montes de Málaga, así como también la parte más septentrional de la cuenca (entorno de la Depresión de Antequera). Dentro de esta zona destacan, por presentar valores de precipitación anual especialmente bajos, la zona de Campillos y Fuente de Piedra y el entorno de la ciudad de Málaga, con precipitaciones anuales medias inferiores a 400 mm.

Al mismo tiempo, es necesario considerar la irregularidad interanual de las precipitaciones. Durante los años secos, las precipitaciones sufren una reducción del orden del 30% de su volumen promedio anual y bajo estas condiciones puede considerarse toda la cuenca como netamente seca-semiárida, o más propiamente, semiárida. Por el contrario, cuando se presentan años húmedos, la Sierra de las Nieves pasa a ser zona hiperhúmeda; el área húmeda abarca el arco montañoso que se extiende desde el Torcal hasta el límite más oriental de la cuenca. El resto de zonas, pueden considerarse en tales circunstancias como subhúmedas, con la salvedad de los fondos del valle del Guadalhorce y el entorno de Fuente de Piedra.

Con todo ello, la distribución pluviométrica media anual en la cuenca del Guadalhorce, es la siguiente:

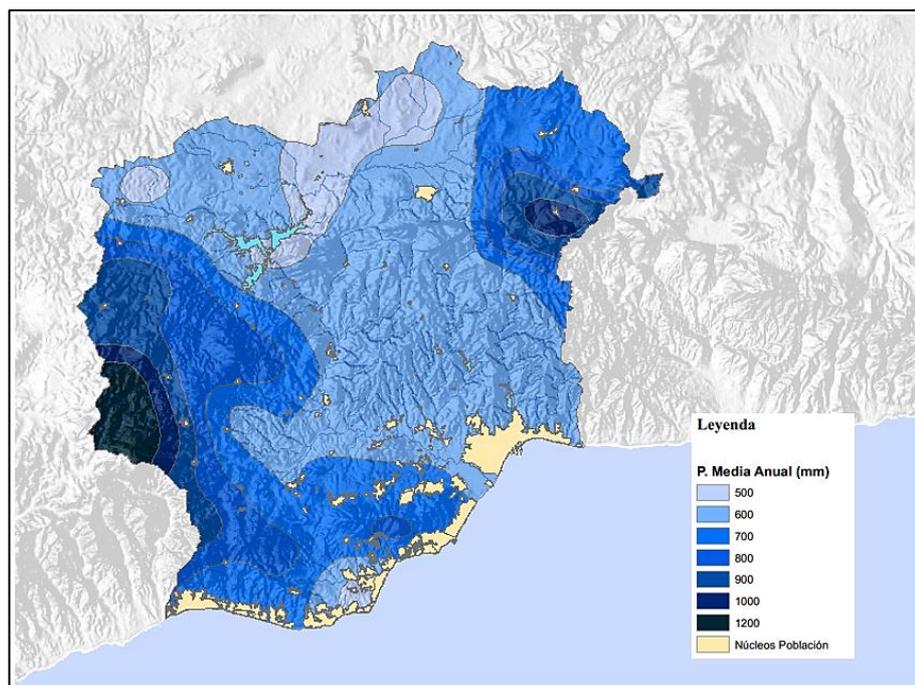


Figura 5-1. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del Guadalhorce.

Respecto a la distribución media mensual de las precipitaciones, éstas presentan sus máximos valores en los meses de noviembre y diciembre. Hay un mínimo muy acusado en verano, con precipitaciones escasas en junio, julio y agosto.

Los valores de precipitación máxima en 24 h son elevados, especialmente en la zona de la Sierra de las Nieves; en este sentido, destaca el hecho de que en Málaga capital, con valores de precipitación media considerablemente inferiores a otras zonas de la cuenca, presenta valores máximos diarios absolutos de precipitación de hasta 185 mm (Pita et al., 1999).

Otro aspecto importante ligado con las precipitaciones y con las temperaturas, es la evapotranspiración potencial. En la zona de estudio, su máximo se produce en los meses de verano, coincidiendo con las máximas temperaturas y los valores más bajos de precipitaciones. Los valores medidos de ETP sobre las tres estaciones elegidas en el apartado anterior son los siguientes:

Tabla 5-1. Evapotranspiración potencial media mensual en algunas estaciones de la cuenca.

Clave	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
6119I	18,7	22,4	35,6	46,3	73,8	105,0	136,0	130,0	95,1	59,4	32,6	22,1	777,6
6146I	21,3	26,0	39,3	52,6	83,1	116,0	148,0	142,0	99,7	61,4	36,0	24,7	849,7
6171A	23,6	26,4	44,4	60,0	92,4	128,0	161,0	156,0	111,0	68,2	40,1	27,1	937,1

Las siguientes figuras, muestran, a modo de ejemplo, la distribución de los valores medios mensuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración a lo largo del año en la cuenca, tomados de diferentes estaciones climáticas.

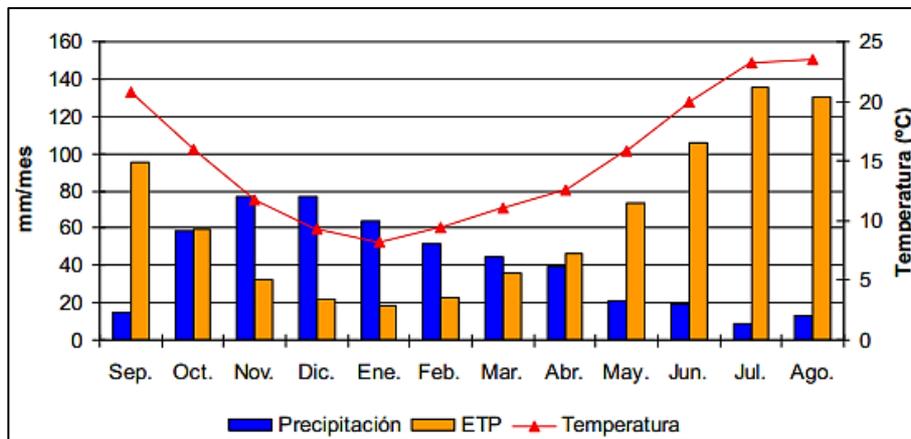


Figura 5-2. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6119I Ardales "Vivero".

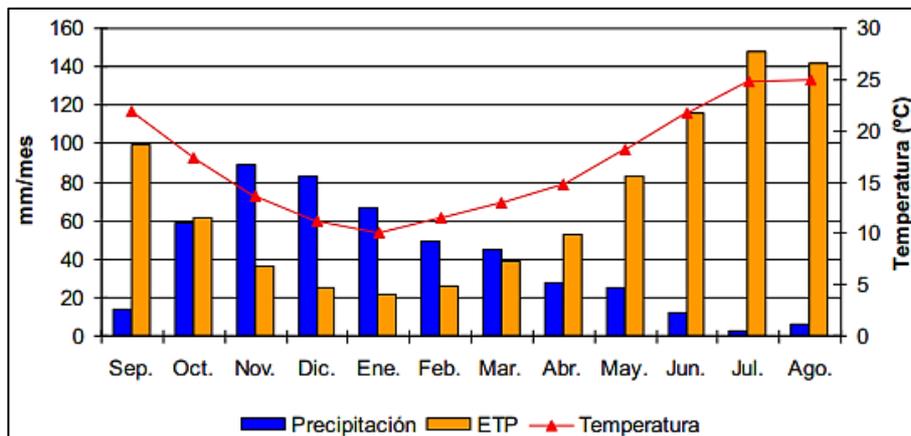


Figura 5-3. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6146I Cártama "Puente Fahala".

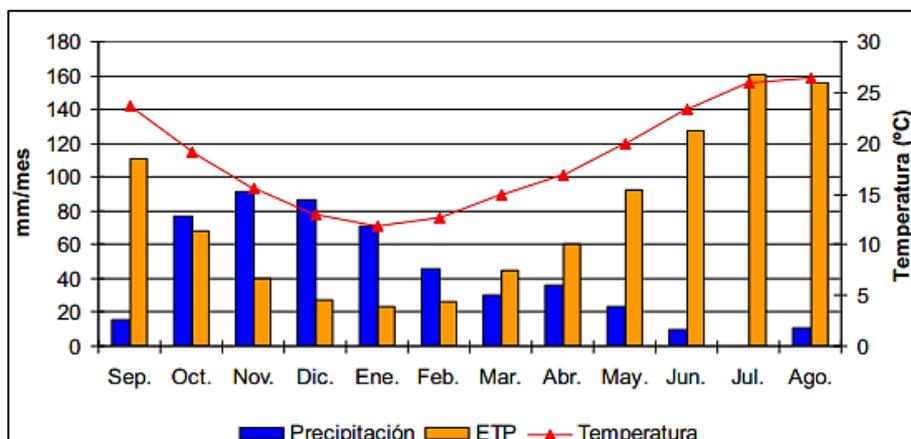


Figura 5-4. Precipitación, temperatura y ETP mensual media en la estación 6171A Málaga "Carmelitas".

## 5.2 Parámetros de estudio

Continuando con el proceso seguido, descrito en el “Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y para la ordenación de la cuenca del río Guadalhorce”, se determinaron las precipitaciones máximas diarias asociadas a las distintas subcuencas y períodos de retorno, a partir de ajustes estadísticos de pluviómetros presentes en la cuenca, que fueron aceptados por su consistencia y longitud de registro, aplicando el método de los polígonos de Thiessen para obtener las precipitaciones correspondientes. Una vez conocidas estas, la definición de la tormenta de diseño en cada caso, pasa por la elección de una determinada duración de la precipitación, de una determinada distribución temporal y de una determinada distribución espacial de la misma.

La duración pésima de la lluvia, es decir, aquella que da lugar a los mayores caudales de avenida no es algo que se pueda estimar a priori, pues depende tanto de la geometría de la cuenca como de otros fenómenos como la infiltración, la laminación y el rutado de hidrogramas. Por consiguiente, el procedimiento habitual consiste en efectuar pruebas con diferentes duraciones de lluvia hasta establecer el caudal máximo posible, que será el empleado posteriormente en el diseño. Las duraciones analizadas para el estudio fueron las siguientes:

1 h, 2 h, 3h, 4 h, 5h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h, y 24 h

Una vez seleccionada la duración de la lluvia y el período de retorno de cálculo, la determinación del volumen total precipitado en dicha tormenta se estableció a través de las curvas de Intensidad Duración-Frecuencia, que relacionan para cada período de recurrencia, las intensidades correspondientes a cada duración de lluvia. Dado que la información pluviográfica disponible no era suficiente para la obtención de ajustes de máximos fiables, se optó por el empleo de la IDF adimensional de Témez con un factor de torrencialidad de 10,5. Un ejemplo de aplicación de dicha expresión se recoge en la siguiente gráfica:

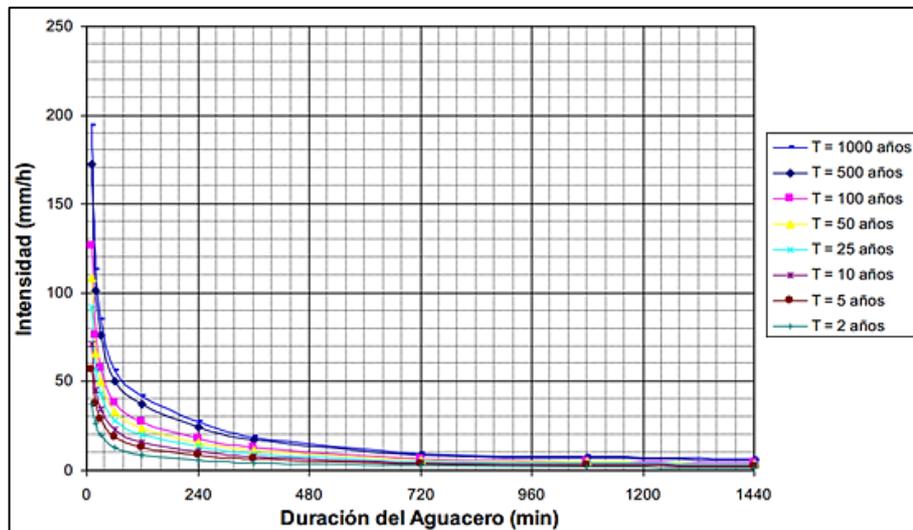


Figura 5-5. Curvas IDF de la estación E047.

Por otro lado, el volumen total estimado a partir de las curvas IDF debía afectarse por un factor minorador en función del área drenante al punto de interés en el que se quiere efectuar el proceso de maximización del caudal. Este factor tiene en cuenta la distribución espacial típica de las tormentas y la menor probabilidad de que una determinada lluvia afecte a toda la cuenca con la misma intensidad. La relación entre la duración de la lluvia, la extensión de la cuenca y el factor corrector se obtuvo del Weather Bureau Tecnichal Papel N° 40.

Por último, la altura de agua precipitada debe repartirse temporalmente a lo largo del suceso según el patrón más probable del mismo, para así no disminuir artificialmente su probabilidad de ocurrencia. Típicamente, las lluvias suelen presentar una mayor intensidad en su parte central, disminuyendo en los primeros y últimos intervalos. Para ello, se aplicó el método estadístico de Huff con el que obtener los hietogramas más probables de la zona para distintas duraciones de lluvia:

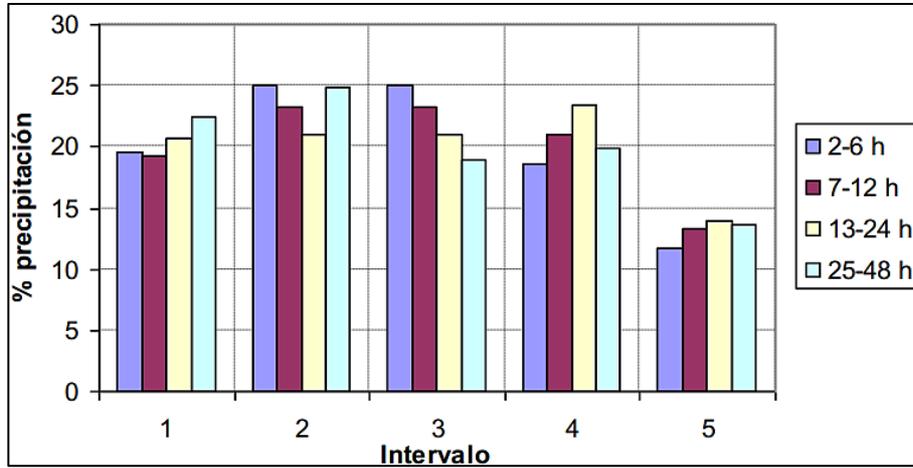


Figura 5-6. Hietogramas de diseño.

# 6 ESTUDIO HIDROLÓGICO

*Sólo aquellos que tengan la paciencia de hacer perfectamente las cosas simples, adquirirán la habilidad de hacer las difíciles fácilmente.*

*- Friedrich Schiller -*

Siguiendo con la línea del apartado anterior y considerando los datos pluviométricos analizados, el presente apartado, tiene por objeto explicar, de manera esquematizada, el proceso seguido para la obtención de los caudales de diseño en los distintos períodos de retorno, necesarios para su empleo en el estudio hidráulico y posterior delimitación de zonas inundables.

El estudio hidrológico aplica procedimientos hidrometeorológicos, que se basan en la transformación a escorrentía, de la lluvia que precipita una tormenta de proyecto en un conjunto de subcuencas conectadas entre sí por tramos fluviales, representando, a modo de esquema en red arborescente, la cuenca completa a modelar. Con todo ello, el estudio seguido se estructuró en las siguientes fases:

## 6.1 Caracterización de las subcuencas y de los tramos fluviales de estudio

Para la elección de los distintos puntos de desagüe, se empleó como criterio, además del cubrir de la manera más precisa posible todo el ámbito del estudio hidráulico posterior, la ubicación de las principales confluencias y estaciones de aforo existentes. En la figura adjunta, se presenta la división de cuencas finalmente adoptada:

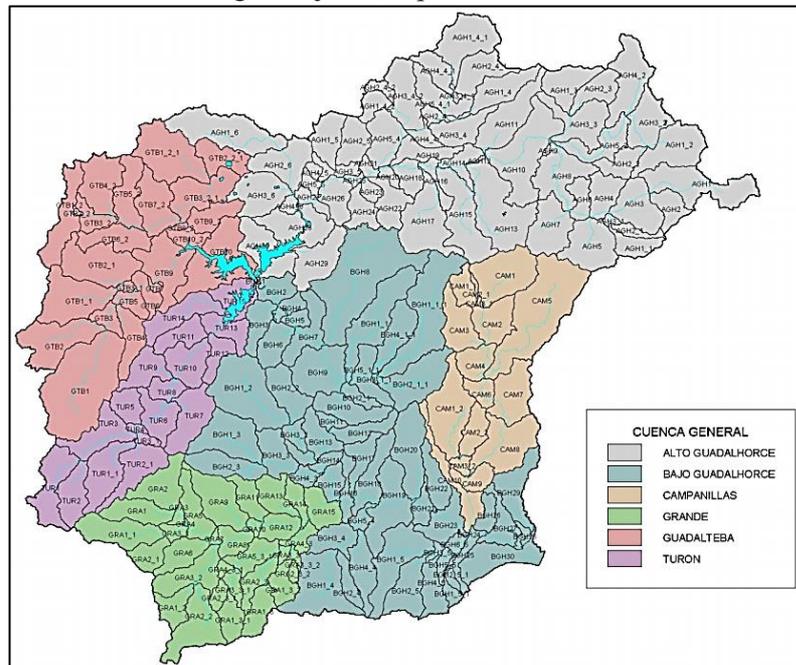


Figura 6-1. División de cuencas.

## 6.2 Elección del modelo de cálculo y de los métodos para la estimación de los procesos hidrometeorológicos

El modelo hidrológico seleccionado para la realización del estudio fue el HEC-HMS del Centro de Ingeniería Hidrológica del U.S. Army Corps of Engineers Ver 3.1.0. El modelo HECHMS constituye una potente herramienta de simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en sistemas de drenaje dendríticos, estando especialmente indicado para la hidrología de avenidas.

Las metodologías adoptadas para cada uno de los procesos hidrológicos simulados fueron:

### a) Estimación de pérdidas por infiltración:

Partiendo de la información disponible y teniendo en cuenta su contrastada fiabilidad, se optó por seguir el método de la proporcionalidad entre la capacidad de infiltración y la lluvia disponible del SCS, definido según:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Siendo:

- $I_a$ : pérdidas totales hasta el inicio de la disponibilidad de agua en superficie ( $P_0$ ).
- $F_a$ : pérdidas acumuladas.
- $P$ : lluvia acumulada.
- $P_e$ : lluvia eficaz acumulada.
- $S$ : máxima retención potencial.

### b) Cálculo de hidrogramas:

El cálculo de los hidrogramas de avenida se reduce a la estimación, por un lado, de la denominada escorrentía directa y, por otro lado, de las denominadas escorrentía subsuperficial y subterránea que englobadas conforman el llamado caudal base.

Para la primera, el método de transformación lluvia neta - escorrentía directa empleado, fue el del hidrograma unitario del SCS, dado el elevado contraste de la formulación basada en la gran cantidad de mediciones y el reducido tamaño de las subcuencas.

De forma simplificada, el drenaje de la cuenca, previa a la llegada de una avenida, se encuentra fundamentalmente dominado por el caudal base hasta el inicio de la escorrentía superficial directa, a partir del cual, la escorrentía superficial se suma a la subterránea para dar lugar al hidrograma final. A su vez, una vez superado el pico de la avenida y tras la curva de descenso correspondiente, existe un determinado umbral a partir del cual el escurrimiento superficial termina y el flujo vuelve a estar definido por el escurrimiento subterráneo más la componente de escorrentía subsuperficial, es decir, por el caudal base.

### c) Propagación de los hidrogramas

El transporte de los hidrogramas de escorrentía de las distintas subcuencas a través de los diferentes tramos de río entre ellas, provoca un efecto laminador que se manifiesta fundamentalmente en un retardo del tiempo del pico del hidrograma y en una reducción del caudal pico del mismo. La mayor o menor repercusión del rutado en la forma del hidrograma dependerá de las características del tramo de río.

De entre los distintos métodos disponibles para definir el tránsito de los hidrogramas, se adoptó el de Muskingum por su facilidad conceptual y porque depende de parámetros fácilmente estimables y posteriormente calibrables.

d) Laminación en embalses

Los embalses de entidad existentes en la cuenca de estudio son los de Guadalhorce, Guadalteba, Conde de Guadalhorce y Tajo de la Encantada en el cauce medio del río, cuyos usos se reparten entre el abastecimiento, el regadío y la producción hidroeléctrica. No obstante, su presencia también contribuye a la laminación de avenidas.

Como criterio conservador a la hora de calcular los caudales de avenida, se supuso que dichos embalses se encuentran situados en su Nivel Máximo Normal previa la llegada de la crecida.

### 6.3 Confección del modelo matemático preliminar con la evaluación teórica de los parámetros característicos de cada elemento

Para la formación del modelo hidrológico en bruto, los distintos parámetros necesarios para la aplicación de las metodologías adoptadas en el apartado anterior deben ser previamente estimados a partir de las características físicas de la zona de estudio. Posteriormente y durante el proceso de calibración correspondiente, los valores calculados pueden ser convenientemente modificados para que el modelo refleje fielmente la realidad observada. Los parámetros y/o variables analizadas fueron:

a) Geometría de las subcuencas:

Para la división de cuencas finalmente adoptada, se calcularon los siguientes parámetros geométricos a partir del MDT 1:20.000 y la cartografía oficial 1:10.000 de la Junta de Andalucía: área, máxima longitud de vaguada, cota máxima y mínima de vaguada, pendiente de vaguada, longitud de cauce fluvial, pendiente de cauce fluvial, tiempo de concentración según formulación de Témez y el  $T_{lag}$  del hidrograma unitario del SCS.

b) Número de Curva:

En la estimación de las pérdidas por infiltración se siguió el método del SCS para la obtención del correspondiente Número de Curva, adaptado por Témez en 1987 para el cálculo del umbral de escorrentía. La distribución espacial de dichos factores se obtuvo en función de los tipos y usos de los suelos analizados y sus pendientes.

c) Caudal base:

Para la estimación de los parámetros que definen el caudal base, se pudo disponer de información foronómica relativa a la rama de descenso de los hidrogramas de avenida en las cuencas de estudio. El análisis consistió en la separación del hidrograma en el correspondiente al caudal base y el debido a la escorrentía directa mediante el procedimiento de Barnes. Dicho método consiste en la representación del hidrograma en papel semilogarítmico de forma que la curva de recesión de la escorrentía subterránea y de la escorrentía subsuperficial una vez restada a la total la subterránea queden alineadas.

d) Traslación de hidrogramas:

Para la aplicación del método de rutado de hidrogramas de Muskingum, resultó necesario estimar el valor de los parámetros K y X, así como el número de subtramos en los que se debe dividir cada tramo. El factor de ponderación X adopta usualmente valores entre 0,2 y 0,3. Para el caso de estudio, se adoptó de forma previa un valor de 0,2.

Por otro lado, según el Manual de Ingeniería del USACE EM 1110-2-1417 "Flood-Run off Analysis", la velocidad de la onda de avenida puede estimarse como 1,33-1,67 veces la velocidad media de la corriente, calculada mediante la formulación de Manning. El rango de variación depende de la geometría de la sección transversal del canal: 1,33 para canales triangulares, 1,44 para parabólicos y 1,67 para rectangulares.

## 6.4 Calibración del modelo matemático

Para que un modelo matemático sea operativo y tenga credibilidad, debe demostrar previamente su capacidad para representar con suficiente fidelidad los sucesos observados. Por lo tanto, con la calibración se persigue contrastar las abstracciones realizadas y ajustar los parámetros estimados para poder conseguir dicho paralelismo.

Para ello, es necesario contar con datos hidrológicos de al menos un suceso, si bien es preferible disponer de varios eventos que permitan la verificación de los parámetros obtenidos en una calibración. Para este estudio, se llevó a cabo una doble calibración; por un lado se calibró con el resto de métodos hidrológicos, como es el caso del método racional y por otro se llevó a cabo la calibración del modelo con los eventos y resultados obtenidos del estudio, validado y utilizado diariamente para la operatividad de los embalses de la cuenca por la Demarcación de Málaga de la Agencia Andaluza del Agua, “Análisis y evaluación de avenidas en los embalses de la cuenca del río Guadalhorce” realizado por la consultora Intecsa-Inarsa.

Durante el proceso de calibración del modelo hidrometeorológico, se ajustan los parámetros de las ecuaciones representativas de los distintos procesos y se validan los métodos seleccionados hasta que los resultados obtenidos reproduzcan suficientemente los valores registrados fundamentalmente en relación a:

- Caudales máximos.
- Tiempos de pico.
- Volumen de escorrentía.
- Forma general del hidrograma.

La gran mayoría de los parámetros empleados, suponen estimaciones obtenidas mediante formulaciones sencillas que a priori no siempre pueden ajustar la realidad de los procesos naturales. En este sentido, los parámetros más sensibles a la estimación y que pueden ser modificados para mejorar el ajuste a la realidad, son en principio, el tiempo de concentración, el umbral de escorrentía, el umbral de recesión y los coeficientes K y X de Muskingum.

Finalizado todo el proceso y tras analizar los resultados obtenidos, se concluyó que la calibración con el estudio de base que se disponía era suficientemente representativa como para que los caudales de cálculo se consideraran acertados en el ámbito de estudio, así como su extrapolación a toda la cuenca, ayudada por los resultados también de la aplicación del método racional modificado.

## 6.5 Cálculo de los caudales de proyecto

Los caudales de proyecto para distintos períodos de recurrencia a lo largo de los ríos de la Cuenca del Guadalhorce, fueron estimados a partir de los siguientes métodos:

- a) Ajustes estadísticos de extremos de los datos foronómicos de las estaciones existentes.

Consistió en el análisis estadístico de los registros de aforo disponibles en las cuencas de estudio, de forma que se pudieran estimar los caudales punta de avenida asociados a distintos períodos de retorno. Estos valores servirían como comparación del resto de métodos empleados. La metodología seguida en este punto fue la siguiente:

- I) Estimación de caudales máximos instantáneos. Para ello, se emplearon los métodos de Fuller, de Fill & Steiner y el método de correlaciones directas.

- II) Obtención de las series anuales de caudales máximos. Para validar un determinado año se debe contar con todos los datos mensuales, o en su defecto, poseer la seguridad de que los datos disponibles albergan el mayor episodio de avenida anual. Esto puede contrastarse mediante la comparación con las estaciones cercanas, ya que, si en un determinado mes no se han registrado avenidas en una estación próxima, es lógico suponer que tampoco lo ha hecho en la estación en estudio.
- III) Ajustes de funciones de máximos. Para ello se aplicaron ajustes a distribuciones conocidas como la función generalizada de extremos (GEV), la de Gumbel o la función de distribución (SQRT), entre otras. Las leyes finalmente seleccionadas fueron las que presentaban una mayor bondad en base a los resultados estadísticos obtenidos, además de un mejor ajuste gráfico para los períodos de retorno más altos.

b) Ábaco de Heras de caudales específicos para crecidas máximas.

Cuando debido a la falta total o parcial de datos de todo tipo, no es posible estudiar con cierta garantía la hidrología extrema de una cuenca, puede recurrirse a la correlación con los valores de crecidas de cuencas afines en función del régimen común de precipitaciones, la extensión, orografía y forma de la cuenca, la geología, la vegetación, etc.

El análisis y la ponderación de todos estos factores no es fácil, y por ello, resulta más práctico recurrir a una síntesis a escala regional. En este sentido R. Heras realizó una exhaustiva recopilación de datos de avenidas en las distintas cuencas hidrográficas españolas, resumiendo la información en una serie de envolventes confeccionadas en función del periodo de retorno y la superficie de la cuenca.

A continuación, se presenta el ábaco original de Heras para las Cuencas del Sur. Conocida la superficie vertiente de una cuenca determinada y mediante su aplicación, es posible estimar de forma rápida el caudal específico y, por consiguiente, el caudal de diseño para cada periodo de retorno.

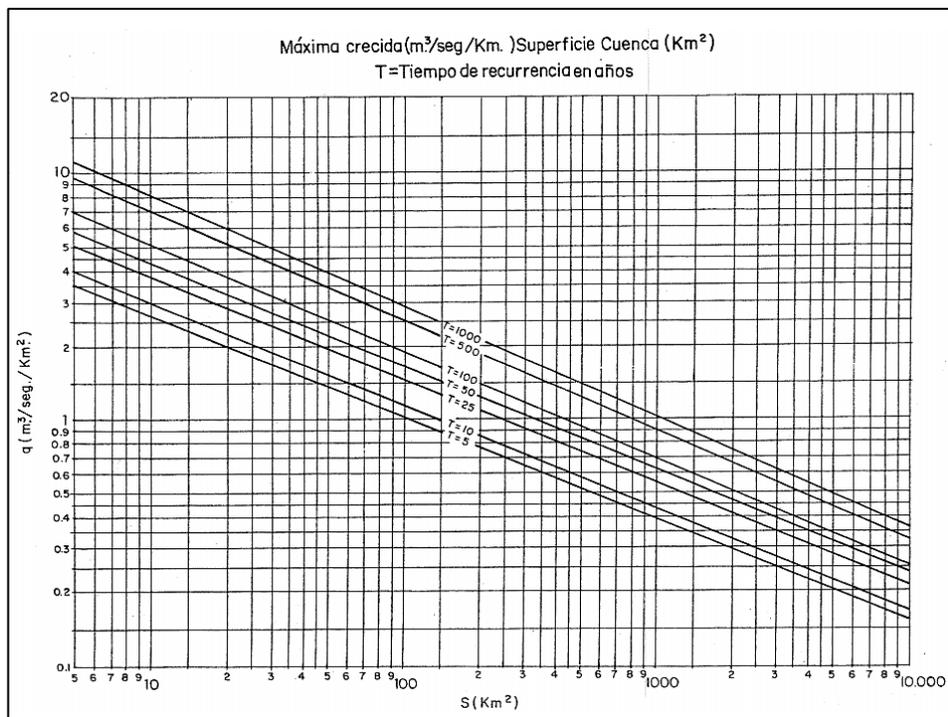


Figura 6-2. Ábaco de Heras para las Cuencas del Sur.

Como puede apreciarse, el caudal específico de las distintas crecidas disminuye al incrementarse el área de la cuenca vertiente. Este hecho se deriva de la menor probabilidad de ocurrencia de lluvias intensas de larga duración sobre una superficie vertiente de mayor extensión.

c) Método racional mejorado por Témez.

Este método, asociado a un período de retorno de 1000 años y a falta de mejores datos, proporcionaba una estimación suficientemente conservadora de los caudales máximos de avenida, por lo que resultó idóneo para el objetivo perseguido.

La presencia de embalses no puede ser contemplada por esta formulación y, por ello, mediante este análisis no pudo tenerse en cuenta el efecto laminador que los embalses de Guadalhorce-Guadalteba, Conde de Guadalhorce, Tajo de la Encantada y Casasola poseían sobre el régimen fluvial. En cualquier caso, los caudales obtenidos se encontraron del lado de la seguridad.

El método racional mejorado de Témez supone que el caudal máximo es el generado por la lluvia de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y conserva la expresión tradicional para el cálculo del caudal incorporándole el factor K, denominado de uniformidad. De tal forma:

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6} * K$$

Donde:

- Q: caudal pico (m<sup>3</sup>/s).
- C: coeficiente de escorrentía.
- I: intensidad de la tormenta de diseño (mm/h).
- A: superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>).
- K: coeficiente de uniformidad.

Las fases propuestas por Témez para el cálculo de cada parámetro son las siguientes:

- Tiempo de concentración.

Se determinó mediante una simplificación y adaptación de la fórmula del US Army Corps of Engineers:

$$T_c = 0,3 \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

Donde:

- T<sub>c</sub>: tiempo de concertación (h).
- L: longitud del curso principal (km).
- J: pendiente media del curso principal (m/m).
- Máxima precipitación diaria.

Se determinó a partir de los planos de isomáximas trazadas de acuerdo a los valores de las lluvias puntuales en diversas estaciones pluviométricas.

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15}$$

Siendo (A), la superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>.

- Leyes Intensidad-Duración.

La curva de intensidad-duración propuesta tuvo la siguiente expresión:

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

Donde:

- I: intensidad media en el intervalo de duración t (mm/h).
- I<sub>d</sub>, I<sub>1</sub>: intensidad media diaria y horaria del mismo período de retorno (mm/h).
- T: duración de la tormenta de diseño e igual al T<sub>c</sub>.

- Coeficiente de escorrentía.

Se determinó considerando como punto de partida el modelo de infiltración del Soil Conservation Service, de tal forma que dicho coeficiente depende tanto del modelo de infiltración como del aguacero. El resultado es:

$$C = \frac{(P_d - P_o) * (P_d + 23P_o)}{(P_d + 11P_o)^2}$$

Donde:

- P<sub>d</sub>: precipitación máxima diaria (mm).
- P<sub>o</sub>: umbral de escorrentía (mm).

- Coeficiente de uniformidad.

Su valor medio en una cuenca concreta depende principalmente del valor de su tiempo de concentración. Pudo estimarse mediante:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$$

Finalmente, y tras la comparación de todos los métodos anteriores y de los resultados correspondientemente obtenidos, se realizó una propuesta de caudales de proyecto a emplear en el estudio hidráulico posterior.

## 6.6 Comparación de caudales máximos generados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con los caudales de avenida que se obtuvieron en las cuencas generales de los ríos localizados en el área de estudio y para cada uno de los métodos utilizados:

Cuenca general	Elemento	Área (km <sup>2</sup> )	T = 5 años		T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 500 años	T = 1000 años	
			HMS	TÉMEZ	HMS	HMS	HMS	HMS	HMS	HMS	HMS
Alto Guadalhorce	PAGH18	966.948031	245.7	194.3	349.7	511.1	648.5	799.5	1198.0	1671.1	1451.2
Guadalteba	PGTB6	471.47796	209.6	216.0	308.1	463.1	601.5	760.7	1220.8	1975.5	1583.7
Turón	PTUR8	268.962948	235.1	224.2	421.7	618.9	800.2	849.8	1379.3	1657.0	1536.5
Grande	PGRA10	335.3283	388.2	454.0	569.3	802.5	1006.3	1242.2	1863.8	2327.2	2218.5
Campanilla	PCAM7	290.469042	197.0	232.3	286.6	420.4	544.4	916.3	942.3	1087.3	1081.6
Bajo Guadalhorce	PBGH23	857.523249	1104.2	815.7	1512.1	2047.6	2497.7	3974.2	4947.1	5949.3	5341.4

Figura 6-3. Caudales máximos generados por cada método.

A la vista de los valores obtenidos, pudo concluirse que modelo hidrometeorológico HEC-HMS confeccionado arrojaba, en general, valores superiores al resto de métodos, lo que, unido a su mayor fiabilidad, aconsejaba su adopción para la caracterización del régimen de caudales de avenida a emplear en la simulación hidráulica conducente a la obtención de la delimitación de zonas inundables.

### 6.7 Elección de caudales de diseño

Partiendo de los resultados obtenidos en la tabla anterior y analizando nuevamente la disposición de cada una de las subcuencas en las que se divide la cuenca del río Guadalhorce “Figura 6-1. División de cuencas”, puede observarse, como el caudal circulante por el tramo de estudio, es la resultante, considerando el efecto laminador y regulador de los embalses en la cabecera, de las aportaciones de las subcuencas del Alto Guadalhorce, Guadalteba y Turón, aguas arriba de los embalses y de las de Campanillas y Grande, en la zona próxima a la desembocadura del río Guadalhorce. Los puntos de aporte de caudal, correspondientes a los de salida de las subcuencas son los mostrados a continuación:

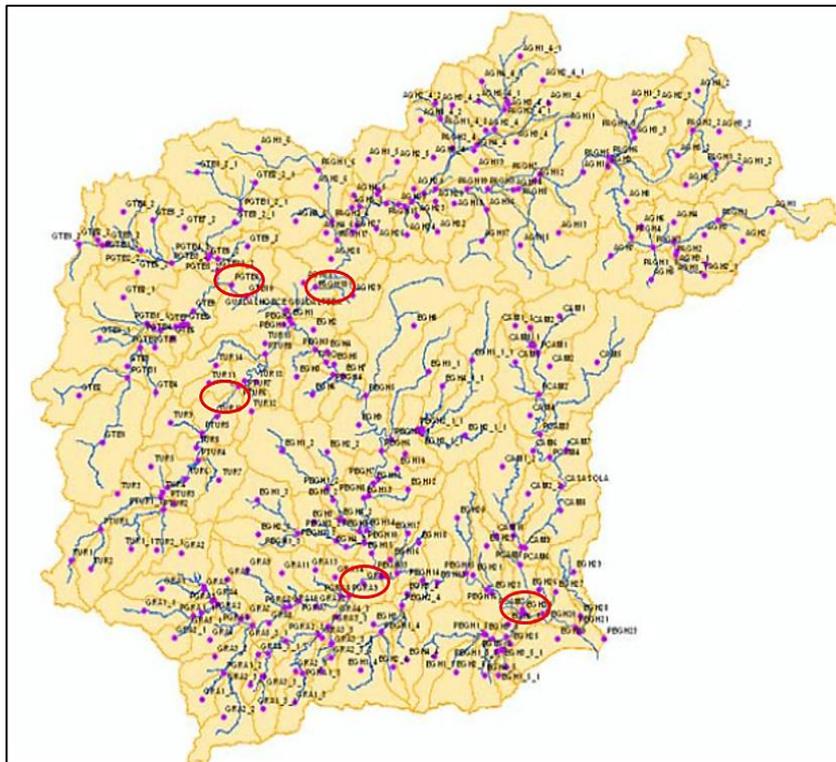


Figura 6-4. Localización de los puntos de salida de las subcuencas.

Observando la disposición de cada uno de los puntos y sabiendo el caudal de aportación en los mismos, puede determinarse el caudal circulante por cada una de las secciones relativas a nuestro tramo de estudio, sin más que restar al caudal del Bajo Guadalhorce, las aportaciones de Campanilla y Grande según corresponda. Así pues, los caudales de cálculo, tomados para el dimensionamiento del modelo, serían los siguientes:

Tabla 6-1. Caudales de cálculo por periodo de retorno.

Nº Sección	T = 10 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 500 años
1 (351)	656.2	947.0	1815.7	2141.0
68 (283)	1225.5	1953.3	3057.9	4004.8
264 (87)	1512.1	2497.7	3974.2	4947.1

La numeración entre paréntesis, indica el orden seguido por lo programas ArcGIS y HEC-RAS, siendo la sección (351) la localizada más aguas arriba y la (1) la localizada más aguas abajo. Para los cálculos y resultados mostrados en los anexos, es justamente, al contrario, la sección 1, se corresponde con la localizada más aguas arriba.

# 7 INTRODUCCIÓN AL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

---

*Lo que sabemos es una gota de agua, lo que ignoramos es el océano.*

*- Isaac Newton -*

## 7.1 Introducción

El transporte de sedimentos, ha sido y es, un tema muy importante dentro del estudio hidráulico fluvial. A lo largo de la historia, ha gozado de un enorme interés para todas las civilizaciones, desde los egipcios y los mesopotámicos, que montaron sus asentamientos a orillas de grandes ríos, como el Nilo, o el Tigris y el Éufrates respectivamente, o las tribus asentadas en los alrededores del Amazonas en Sudamérica, permitiendo así, un acceso fácil y rápido al agua, lo que favoreció al gran desarrollo y explotación de las ciudades y territorios que ocupaban.

El aprovechamiento de los ríos, dio paso a una idea mucho más ambiciosa, que pretendía alcanzar un cierto nivel de regulación y dominio sobre los mismos, concretamente, controlando las avenidas de estos sobre los territorios colindantes. De esta necesidad, surgieron las ideas y posteriores teorías sobre el comportamiento del agua y de los elementos que conforman el sistema hidráulico, siendo los sedimentos y materiales sólidos, los principales componentes de estudio. Nace así, el concepto de hidráulica fluvial, entendiendo como tal, al campo de la hidráulica, cuyo fin es el estudio de los fenómenos que dan lugar al flujo de agua sobre un lecho, el cual presenta la posibilidad de modificar sus características, en respuesta a las solicitaciones que el flujo provoca, implicando alteraciones tanto cualitativas como cuantitativas en los parámetros del mismo.

El transporte de sedimentos en ríos es, por tanto, un proceso continuo y complejo, pues depende generalmente de diversos factores hidrológicos, hidráulicos, geológicos, geográficos y biológicos.

Los sedimentos transportados son los del fondo y las orillas del cauce, además de partículas muy finas procedentes de los terrenos de la cuenca. Dichas partículas, entran en movimiento tan pronto como el esfuerzo cortante aplicado en el material del fondo exceda al esfuerzo cortante crítico o de inicio de movimiento. Generalmente las partículas de limo y arcilla entran en suspensión, y las partículas de arena y grava ruedan y se deslizan en una capa delgada cerca del fondo.

Los sedimentos tienen funciones esenciales en los ríos, como: el desarrollo del cauce en sus cambios de forma (ancho, profundidad, formación de islas o bancos de arena), minimizar la degradación del fondo, favorecer a la formación de hábitats para un gran número de organismos vivos, etc. No obstante, también implica una serie de riesgos como: el cambio del ancho del cauce durante las avenidas, los deslizamientos de materiales, y los flujos de lodos y escombros en las inundaciones.

En la práctica, para estimar el transporte de sedimentos en un río frecuentemente se usan fórmulas empíricas o semiempíricas. La ventaja de este tipo de fórmulas es que son simples de aplicar, sin embargo, se corresponden a características específicas del río, en el instante y lugar en que se llevaron a cabo las mediciones, por lo que, al aplicar diferentes fórmulas, se obtienen resultados muy dispersos. Para obtener resultados más aproximados, es necesario hacer mediciones de campo en puntos específicos, llevando así, registros del transporte de sedimentos en el cauce a través de un cierto intervalo de tiempo.

No obstante, debido a la enorme complejidad que supone la determinación, cuantificación, descripción y el correcto establecimiento de la capacidad de un río para transportar sedimentos, no ha sido posible la formulación de una única ecuación o fórmula, que permita solucionar todos los problemas o situaciones obteniendo un resultado fiable, debido a la gran particularidad y variedad de cada sistema fluvial.

Es por ello normal, que el modelado, procedimiento en auge hoy en día, se haya convertido en una herramienta más que eficaz, para conseguir describir, simular, predecir y realizar un acercamiento real de los sistemas, partiendo de los factores, variables, parámetros y fenómenos propios de cada uno y que participan y definen el movimiento y transporte de sedimentos, para así lograr aproximaciones a sus comportamientos reales.

### 7.1.1 Objetivos

Con este estudio, se pretenden aclarar aspectos importantes sobre el análisis del transporte de sedimentos en los ríos, más concretamente, sobre el funcionamiento de los modelos implementados para tal fin, y la ambigüedad existente en los resultados obtenidos mediante estos, aspecto que se verá marcado, como se analizará más adelante, por la elección del coeficiente ( $n$ ) de Manning.

Se analizarán en detalle las características de los sedimentos localizados en los ríos y los diferentes enfoques de los modelos realizados a partir de experimentaciones, soluciones numéricas y programas o herramientas computacionales, con el fin de entender los efectos derivados de dicho transporte en los riesgos de inundación.

El proceso a seguir, consistirá en el estudio del régimen fluvial del río Guadalhorce, concretamente en la provincia de Málaga, en la zona próxima a su desembocadura. Dicho análisis, se realizará empleado el software HEC-RAS 4.1, muy útil para este tipo de trabajos. Además, dicho modelo, se desarrollará a través de dos vertientes, por un lado, se aplicará para el coeficiente de rugosidad ( $n$ ) de Manning, los valores obtenidos directamente de las tablas simplificadas al uso, lo que se ha denominado Estudio Hidráulico 1, mientras que, por otro lado, en el Estudio Hidráulico 2, se repetirá dicho cálculo, pero determinando el parámetro ( $n$ ) de una forma menos directa, aunque mucho más realista, utilizando para ello las fórmulas y correcciones oportunas. Este último modelado, permitirá ajustarse en mayor medida a las fluctuaciones de avenidas que pueden sufrir los ríos y que son de vital importancia en el estudio de prevención de inundaciones.

Para todo ello, y antes de entrar en el propio proceso de cálculo, se introduce el presente apartado, con el fin de alcanzar unos conocimientos básicos previos, que sirvan de base para el resto del trabajo. Dentro de este, se abarcarán los siguientes objetivos:

- Describir las características y propiedades de las partículas de sedimentos.
- Identificar los diferentes modos de transporte de sedimentos en un río.
- Identificar las diferentes clases de modelos para cuantificar y calificar el transporte de sedimentos.
- Revisar las diferentes ecuaciones que describen el fenómeno del transporte de sedimentos en ríos.
- Describir los diferentes métodos existentes para la solución de problemas del transporte de sedimentos.
- Identificar los aspectos que definen y rigen un río, para aproximar la realidad a los modelos y poder hacer estudios de los mismos.

Como se ha mencionado, este estudio inicial o introductorio, está centrado únicamente en la descripción y revisión de los diferentes parámetros y modelos empleados en el estudio del transporte de sedimentos y sus características, con el fin de lograr una aproximación más o menos acertada sobre el comportamiento de la hidráulica fluvial.

### 7.1.2 Estructura

El presente apartado, se ha dividido en cinco grandes puntos, a saber:

➤ Punto 1 - Procesos de erosión y propiedades de los sedimentos:

Se analizan las características propias de los sedimentos, se introducen las nociones básicas sobre el inicio de su movimiento y sus modos de transporte y finalmente se describe la evolución del fondo del cauce con ayuda de ecuaciones y parámetros característicos de los ríos, dando las bases conceptuales para el desarrollo del documento.

➤ Punto 2 - Transporte de sedimentos:

Se describen y plantean algunas de las fórmulas para el transporte de sedimentos más empleadas y se muestran los diferentes tipos de soluciones numéricas que pueden aplicarse para abordar el complejo problema del transporte de sedimentos en ríos.

➤ Punto 3 - Tipos de modelos:

Se presentan los diferentes modelos usados para el modelamiento del transporte de sedimentos en ríos y su respectivo alcance, se dan detalles para la elección del modelo y se describen los parámetros para tener en cuenta cuando se plantean modelos de este tipo.

➤ Punto 4 - Modelos computacionales:

Se ilustran brevemente los principales modelos comerciales existentes, según sean de una, dos y tres dimensiones, usados en el modelamiento de transporte de sedimentos en ríos.

➤ Punto 5 - Aplicaciones y soluciones de los modelos vigentes:

Se detallan las posibles visiones de los modelos bajo los diferentes regímenes de flujo, señalando las fases de una modelación matemática y dando algunos ejemplos para una, dos y tres dimensiones. Además, se hace un análisis sobre los últimos avances en el modelamiento del transporte de sedimentos en ríos y se hace una reflexión sobre la confiabilidad, valor y significado de los modelos.

## 7.2 Proceso de erosión y propiedades de los sedimentos

El término erosión, empleado en el ámbito de ríos, referencia al descenso del fondo debido a fenómenos relacionados con la dinámica fluvial, que puede ser natural o inducido por acciones humanas. La erosión puede ser de dos tipos, temporal o espacial, estando esta última dividida, además, en erosión de fondo o local y suelen describirse en tres etapas: desprendimiento, transporte y deposición.

Cuando se habla de erosión temporal, se asocia al tiempo de desgaste sobre la superficie, que puede ser transitorio o permanente. La erosión transitoria, se determina a partir del criterio de inicio de movimiento y suponiendo que no hay transporte de sedimentos. En primer lugar, se determina la posición de la superficie libre durante una avenida, la cual se supone fija y, para mantener el equilibrio, el lecho se va socavando por acción de la tensión misma del agua, aumentando entonces el área hidráulica. Posteriormente, el lecho puede recuperar su cota original o no, siendo la diferencia la conocida erosión residual. La erosión permanente, por otro lado, se presenta a medio y largo plazo y afecta a una sección grande del lecho. Los ríos, tienden a socavarse en sus inicios o tramos altos y a sedimentarse en sus tramos bajos o cercanos a su desembocadura.

## 7.2.1 Propiedades de los sedimentos

A continuación, se describen las propiedades características y representativas de los sedimentos en ríos:

- Densidad: relación entre la masa y el volumen de la partícula. La densidad natural o típica de los sedimentos es del orden de  $2650 \text{ Kg/m}^3$ .
- Peso específico: se define como la relación entre el peso de la partícula y su volumen, o lo que es lo mismo, como el producto de la densidad y la aceleración de la gravedad.
- Gravedad específica: relación entre la densidad de la particular y la densidad del agua.
- Porosidad: relación entre el volumen de vacíos y el volumen del sedimento.
- Distribución del tamaño de partículas: el análisis granulométrico, es el método más útil y conveniente para conocer la distribución del tamaño de las partículas de sedimentos.
- Ángulo de reposo: depende de la forma de la partícula y se define como el ángulo de máxima pendiente encima de la cual el material no cohesivo permanece en reposo.
- Velocidad de sedimentación: cuando una partícula asienta, adquiere una velocidad terminal constante cuando la fuerza de arrastre del fluido es igual al peso sumergido de la partícula. Esta velocidad, que es la máxima que la partícula alcanza cuando cae libremente en el agua, se conoce como velocidad de caída de la partícula o velocidad de sedimentación.

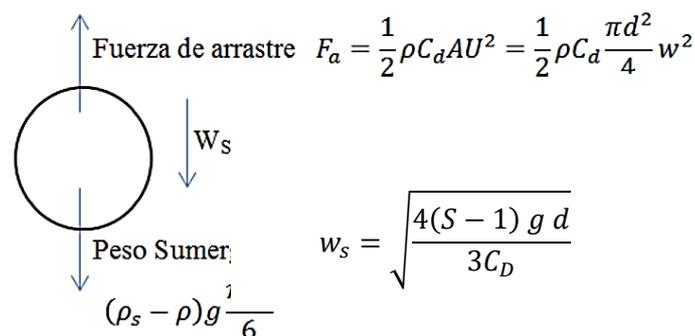


Figura 7-1. Fuerzas sobre la partícula.

Siendo ( $C_D$ ) el coeficiente de arrastre. Este valor, depende del número de Reynolds, es decir, del tipo de régimen que experimente el flujo.

- Tamaño: es una característica muy importante y relativamente fácil de identificar, cuantificar y diferenciar, sin embargo, cuando la forma, densidad y su distribución son semejantes, puede afirmarse que la variación del tamaño define la variación del comportamiento del sedimento.

Con respecto a los diámetros de referencia que definen el tamaño de los sedimentos se tiene:

- Diámetro nominal ( $D_n$ ): diámetro de una esfera del mismo volumen que la partícula:

$$D_n = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3}$$

Siendo ( $V$ ), el volumen de dicha partícula.

- Diámetro de sedimentación ( $D_s$ ): diámetro de una esfera de la misma densidad que la partícula y que cae con la misma velocidad terminal uniforme en el mismo fluido y a la misma temperatura.
- Diámetro del tamiz ( $D_i$ ): diámetro de la malla del tamiz cuyas aperturas permiten atravesar las partículas en una distribución granulométrica concreta.
- Diámetro medio ponderado ( $D_m$ ):

$$D_m = \frac{\sum(D_i P_i)}{\sum P_i}$$

Siendo ( $D_i$ ), el diámetro medio de cada tamaño de clase o fracción y ( $P_i$ ), el peso del material retenido en cada malla.

- Forma de la partícula: generalmente, las partículas son elipsoides triaxiales de un determinado diámetro. El factor de forma de Corel, da la descripción más aproximada de la forma de la partícula, con un valor típico de 0,7:

$$S_{Corel} = \frac{D_i}{\sqrt{D_n D_s}}$$

Donde:

- $D_i$ : diámetro del tamiz.
- $D_n$ : diámetro nominal.
- $D_s$ : diámetro de caída o sedimentación.

## 7.2.2 Inicio del movimiento de los sedimentos

El problema denominado umbral o inicio del movimiento del fondo en un río, consiste en establecer cuándo las partículas son desplazadas por las fuerzas de arrastre del agua, con el fin de conocer el comienzo y fin del flujo bifásico (Agua-Sedimento).

Los estudios llevados a cabo para conocer a qué profundidad se produce este fenómeno, han sido en su mayoría experimentales, realizados en laboratorio y con arenas uniformes, que simultáneamente han provocado teorías mecanicistas y análisis dimensionales. La más conocida, es la realizada en 1936 por Albert Shields (Diagrama de Shields).

El agua, en su recorrido por el lecho, crea esfuerzos cortantes sobre el fondo ( $\tau_o$ ) y, teniendo en cuenta que la resistencia de la partícula al movimiento depende de su peso sumergido (función de su peso específico sumergido  $\gamma_s - \gamma$ ) y su diámetro ( $D$ ) característico, aparece una fuerza que va en dirección del flujo conocida como fuerza de arrastre, la cual actúa sobre las partículas cercanas al fondo y/o a las orillas del cauce. A partir de estas tres características, se puede definir el parámetro adimensional ( $\bar{\tau}$ ) o esfuerzo de corte adimensional:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)D}$$

Este parámetro, relaciona la fuerza que tiende a producir el movimiento y la fuerza que estabiliza o mantiene el reposo.

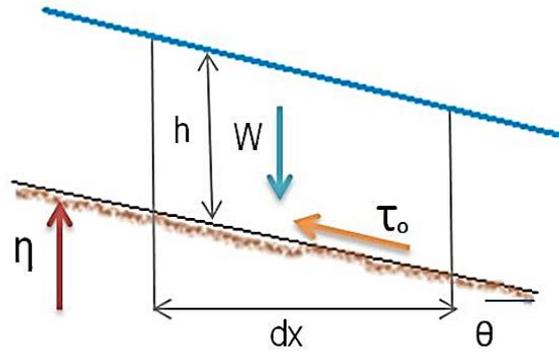


Figura 7-2. Equilibrio de fuerzas en el lecho.

De la figura anterior se tiene que, por equilibrio de fuerzas, en el sentido de la corriente, la componente del peso es contrarrestada por la fuerza de rozamiento. Suponiendo un cauce prismático, el peso del fluido es  $W$  (producto del peso específico por el volumen de control):

$$W = \gamma * A * dx$$

Donde  $A$  es el área transversal del cauce. La componente del peso en la dirección del flujo es entonces:

$$Wx = \gamma * A * dx * \sin \theta$$

Si el ángulo ( $\theta$ ) es muy pequeño entonces  $\text{Sen}\theta \approx \text{Tan}\theta \approx S$ , donde ( $S$ ) es la pendiente del lecho. La fuerza de fricción actúa sobre todo el perímetro mojado de la sección, por lo que, analizando nuevamente el equilibrio:

$$\tau_o * P * dx = \gamma * A * S * dx$$

$$\tau_o = \gamma * R * S$$

Donde ( $R$ ), es el radio hidráulico. En cauces muy anchos ( $B > 20h$ ), se tiene que  $R \approx h$ , por tanto:

$$\tau_o = \gamma * R * S = \gamma * \frac{bh}{b + 2h} * S = \gamma * h * S$$

Por otro lado, la velocidad de corte ( $u^*$ ), es un parámetro que representa igualmente la acción del agua sobre el fondo del canal:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \rightarrow \tau_o = \rho * u_*^2$$

El parámetro de estabilidad o de esfuerzo de corte adimensional, se conoce como Parámetro de Shields, y puede definirse en términos de la velocidad de corte así:

$$\bar{\tau} = \frac{\rho * u_*^2}{(\gamma_s - \gamma) D} = \frac{u_*^2}{\frac{g (\rho_s - \rho) D}{\rho}} = \frac{u_*^2}{g \Delta D}$$

Donde:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g = (S - 1)$$

El último término, tiene forma de número de Froude. El número de Reynolds, puede expresarse de igual manera en términos de la velocidad de corte:

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$$

El movimiento de una partícula dependerá siempre de las condiciones instantáneas del flujo y de su resistencia al movimiento. Cuando se inicia el flujo, el lecho del río está compuesto de partículas sueltas, de baja cohesión y de tamaño uniforme, sometidas a una serie de fuerzas hidrodinámicas. En el caso en que el caudal aumente, las fuerzas crecen proporcionalmente y llegan a un punto en el que las partículas no pueden permanecer unidas, haciendo que se separen e inicien su movimiento “independientemente”, siendo este instantáneo para las partículas de un mismo tamaño. En lechos con materiales cohesivos, se debe hablar particularmente de erosión del lecho o transporte de fragmentos de suelo, siendo mayor la resistencia al esfuerzo cortante en suelos sueltos o granulares.

Entre el gran número de fórmulas y relaciones empleadas para determinar el inicio del movimiento de las partículas sedimentadas, existen algunas que relacionan la velocidad de caída ( $w$ ) y la velocidad de corte ( $u^*$ ):

- $6 > w/u^* > 2$  Transporte de fondo, deslizamiento y rodamiento.
- $> w/u^* > 0.7$  Transporte de fondo por saltación.
- $0.7 > w/u^* > 0$  Transporte en suspensión.

Donde la velocidad de corte puede expresarse como:

$$u_* = \sqrt{gRS}$$

Siendo ( $R$ ) el radio hidráulico y ( $S$ ) la pendiente. Así pues, el movimiento de los sedimentos se iniciará, cuando el esfuerzo cortante del lecho supera al esfuerzo cortante crítico.

➤ Equilibrio del fondo en presencia de transporte de sedimentos

El equilibrio se presenta en el fondo del lecho, cuando la cantidad de partículas erosionadas es la misma que las sedimentadas, de modo que la cota de fondo no varía.

Para entender este fenómeno de equilibrio móvil de fondo, se emplea la denominada “Balanza de Lane (1955)”. Este principio de estabilidad, iguala el producto del caudal sólido ( $q_s$ ) por el tamaño de sedimento ( $D$ ), con el producto del caudal líquido ( $q$ ) por la pendiente ( $i$ ). así, por ejemplo, cuando el caudal de sedimentos o el tamaño de las partículas del sedimento es excesivo, el equilibrio se alcanza con el caudal y la pendiente del lecho, resultando en una gradación (acumulación) o degradación (socavación) del lecho y/o las orillas.

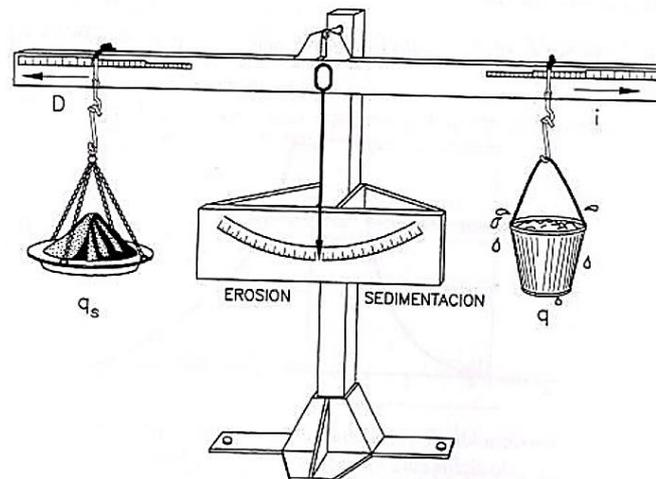


Figura 7-3. Balanza de Lane.

### 7.2.3 Modos de transporte

El transporte de sedimentos en un río, se clasifica según el modo de transporte y/o el origen del material. Según este último, destacan el procedente del cauce o de la cuenca, siendo por lo general materiales muy finos (limos y arcillas de  $D < 0.0625\text{mm}$ ), transportados en suspensión y considerados como cargas de lavado (si es de la cuenca) o foránea (si es del cauce).

Según el modo de transporte, las partículas pueden ser transportadas por la corriente, o pueden moverse cercanas al fondo ya sea rodando, deslizándose o saltando (depende del tamaño de la partícula). En general si una partícula está en reposo, puede iniciar su movimiento rodando o saltando al superar el umbral de movimiento, pero, si la corriente aumenta su velocidad y volumen, la partícula puede ser transportada por suspensión. A mayor intensidad de la corriente, mayor probabilidad de que las partículas vayan suspendidas.

Dado lo anterior, puede afirmarse que el transporte en suspensión representa casi el 90% de la carga solida de un río, mientras que la carga de fondo define y es causante de múltiples variaciones en el lecho, como, por ejemplo, las referidas a el ancho, la pendiente, el caudal, la granulometría, etc.

Tabla 7-1. Clasificación de sedimentos según su modo de transporte.

<b>Carga o material lavado (<math>q_w</math>)</b>	Partículas muy finas transportadas por el agua sin entrar en contacto con el lecho.
<b>Material de lecho (<math>q_{sf}</math>)</b>	Es la parte de la carga total que está en mayor contacto con el lecho. Se determina en base al valor del esfuerzo cortante efectivo sobre la superficie.
<b>Material suspendido (<math>q_{ss}</math>)</b>	Es la parte de la carga total que se mueve sin contacto continuo con el lecho.

En el sistema internacional (SI) la unidad para el transporte total de sedimentos ( $q_t$ ), es el ( $\text{m}^3/\text{m}^*\text{s}$ ) o metro cúbico de sedimento por metro de ancho y por segundo:

$$q_t = q_w + q_{sf} + q_{ss}$$

### 7.2.4 Evolución del fondo

En los sistemas fluviales, donde sus orillas están expuestas a deposición y erosión, es necesario modelar el movimiento de los sedimentos con el flujo. El modelo matemático para transporte de sedimentos, se basa generalmente en las leyes de conservación. Algunas de las ecuaciones empleadas son:

- Transporte de cargas en suspensión:

$$\frac{\partial}{\partial x} (A C_j) + \frac{\partial}{\partial x} (Q C_j) = \frac{\partial}{\partial x} \left( Dt A \frac{\partial G_j}{\partial x} \right) + \Phi_{s,j}$$

- Transporte de cargas de fondo:

$$\frac{\partial G_j}{\partial t} + u_{b,j} \frac{\partial G_j}{\partial x} = u_{b,j} \Phi_{b,j}$$

- Conservación del material de fondo (Continuidad de sedimentos):

$$\frac{\partial (\bar{C}A)}{\partial t} + (1 - p) \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} + Cl ql + \sum_j \Phi_{s,j} + \sum_j \Phi_{b,j} = 0$$

- Conservación del material de fondo:

$$(1 - p) \frac{\partial (\beta_j A_m)}{\partial t} + (1 - p) \beta_j \Phi_o H \{ \Phi_o \} + (1 - p) \beta_{o,j} \Phi_o H \{ -\Phi_o \} + \Phi_{s,j} + \Phi_{b,j} = 0$$

Donde:

- $A_m$ : área sección transversal de la capa activa.
- $A_s$ : área del material de lecho.
- $C_j$ : concentración de carga en suspensión para la clase  $j$ .
- $\bar{C}$ : concentración total de carga en suspensión.
- $C_L$ : concentración de sedimentos de flujo lateral.
- $D_L$ : coeficiente de dispersión en dirección longitudinal.
- $G_j$ : velocidad del tamaño  $j$  del transporte de sedimentos.
- $p$ : porosidad en sedimentos del fondo.
- $Q_s$ : caudal de sedimentos.
- $q_L$ : caudal lateral por unidad de longitud.
- $u_{bj}$ : velocidad promedio de la carga de fondo en la fracción de tamaño  $j$ .
- $\beta_{oj}$ : fracción de material por debajo de la capa activa pertenecientes al tamaño  $j$ .
- $\beta_j$ : fracción de material en la capa activa perteneciente al tamaño  $j$ .
- $\Phi_{sj}$ : flujo neto de la carga suspendida de la capa activa de la corriente de agua.
- $\Phi_{bj}$ : intercambio de sedimentos en el tamaño  $j$  entre la capa activa y la capa de transporte de sedimentos de fondo.
- $H\{\Phi_o\}$ : función de paso:

$$H\{\Phi_o\} = \begin{cases} 1 & \Phi \geq 0 \\ 0 & \Phi < 0 \end{cases} \quad ; \quad \Phi_o = \frac{\partial A_s}{\partial t} - \frac{\partial A_m}{\partial t}$$

En segunda instancia, si los parámetros en la función de transporte de sedimentos para la sección transversal se asumen instantáneas, permanente y constante, se tiene:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{dQ_s}{dx}$$

Esta suposición es válida solo si hay una pequeña variación en la geometría de la sección transversal, es decir que no haya erosión o/y deposición en la etapa de tiempo. En la práctica, esta condición se da en pequeñas escalas de tiempo.

La distribución de los sedimentos del fondo durante los procesos de erosión/deposición es sencillo en modelos de dos y tres dimensiones, donde los sedimentos se distribuyen uniformemente a través del modelo computacional.

En modelos de una dimensión, se deben emplear técnicas especiales para representar la variación no uniforme de la sección transversal de los sedimentos depositados. En muchos ríos, los sedimentos se depositan llenando las partes más bajas del canal y forman un levantamiento del fondo en la sección transversal, como se puede apreciar en la siguiente figura:

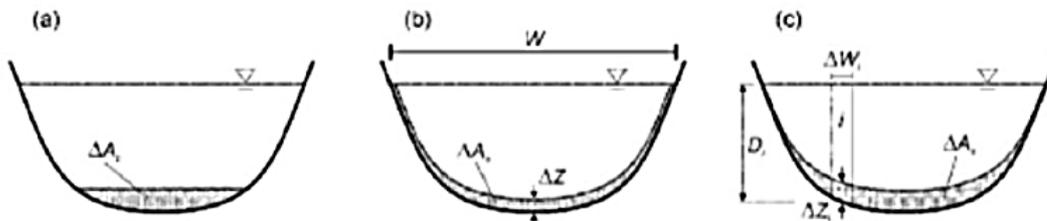


Figura 7-4. Métodos de distribución de partículas para modelos de una dimensión.

Las 3 situaciones, hacen referencia a:

- a) Distribución horizontal durante la deposición.
- b) Distribución uniforme.
- c) Distribución proporcional a los parámetros del flujo.

El método más común usado en modelos de una dimensión es el de extender los cambios a lo largo de la sección transversal ( $\Delta A_x$ ), con una constante de espesor (medida verticalmente) a lo largo del perímetro. El grosor ( $\Delta Z$ ) de los materiales depositados/erosionados es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\Delta Z = \frac{\Delta A_s}{W}$$

Donde (W) es el ancho superficial del canal.

➤ *Ecuaciones auxiliares*

Las ecuaciones diferenciales presentadas anteriormente requieren relaciones adicionales para definir las condiciones de frontera. Para los modelos de dos y tres dimensiones es primordial representar los efectos en los límites de los sólidos y el líquido, estas relaciones son importantes porque el proceso de transporte de sedimentos se da en la región cercana al fondo, por lo tanto, es importante la predicción exacta de los parámetros del flujo en esta región.

En modelos de una sola dimensión, los efectos de la fricción se calculan con una ecuación como la de Manning, en términos del transporte (K):

$$Q = K S_f^{1/2} = \frac{\delta}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde:

- Q: caudal de flujo.
- A: área transversal del flujo.
- R: radio hidráulico (A/P).
- P: perímetro mojado.
- S<sub>f</sub>: pendiente de fricción.
- n: coeficiente de rugosidad de Manning.
- δ: depende del sistema de unidades usado (para el métrico es 1 y el inglés 1.49).

La ecuación anterior, se formuló para casos de flujo permanente, sin embargo, se usa también en modelos hidráulicos para regímenes no permanentes. En flujos unidimensionales, los coeficientes de rugosidad contienen más que las pérdidas por fricción, incluyendo también el grado de sinuosidad, la densidad, el tipo de vegetación, los cambios en forma y tamaño de la sección transversal, las irregularidades de su sección transversal, etc. Existen muchos trabajos publicados sobre fórmulas para encontrar la resistencia del flujo, pero siguen siendo particulares y no alcanzan la generalidad para ser usados en modelos numéricos.

A modo de ejemplo, en el método de Cowan, 1956, se selecciona una (n) de Manning que se modifica de acuerdo con las características del canal, siendo el valor final de la misma, el correspondiente a:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Donde:

Tabla 7-2. Modificaciones para el parámetro (n) de Manning según el método de Cowan.

<b>Material considerado (n0)</b>			
<i>Tierra</i>	0,020	<i>Roca cortada</i>	0,025
<i>Grava Fina</i>	0,024	<i>Grava gruesa</i>	0,028
<b>Factor por grado de irregularidad o rugosidad (n1)</b>			
<i>Liso</i>	0,000	<i>Moderado</i>	0,010
<i>Menor</i>	0,005	<i>Severo</i>	0,020
<b>Factor por variaciones en la sección transversal del canal (n2)</b>			
<i>Gradual</i>	0,000	<i>Frecuente</i>	0,010-0,015
<i>Ocasional</i>	0,005	-	-
<b>Factor por efectos de obstrucciones (n3)</b>			
<i>Despreciable</i>	0,000	<i>Apreciable</i>	0,020-0,030
<i>Menor</i>	0,010-0,015	<i>Severo</i>	0,040-0,060
<b>Factor por vegetación (n4)</b>			
<i>Baja</i>	0,005-0,010	<i>Alta</i>	0,025-0,050
<i>Media</i>	0,010-0,025	<i>Muy alta</i>	0,050-0,100
<b>Factor por sinuosidad o cantidad de meandros (m5)</b>			
<i>Menor</i>	1,000	<i>Severa</i>	1,300
<i>Apreciable</i>	1,150	-	-

Los efectos causados por la vegetación son muy complejos y no existe en general un modelo válido para predecir sus efectos, debido principalmente a que las características de la resistencia por vegetación dependen de muchos parámetros como la flexibilidad o rigidez de la planta, su densidad, las características de las hojas (área, forma y densidad), etc.

En el “*Apartado 9: Estudio Hidráulico 1. Modelado con (n) de Manning Clásico*” y en el “*Apartado 10: Estudio Hidráulico 2. Modelado con (n) de Manning Modificado*”, se explica en mayor detalle el procedimiento seguido para la definición y elección del parámetro (n) de Manning empleado en cada caso.

### 7.3 Formulación y métodos

El cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos se realiza empleando fórmulas empíricas, para condiciones de flujo permanentes y uniformes. La complejidad que reside dentro de este proceso, se basa fundamentalmente, en la no existencia de una ley o ecuación universal capaz de englobar y resolver correctamente el transporte y las mezclas de sedimentos, así como la carencia de metodologías con una generalidad suficiente para poder ser aplicadas.

En el proceso habitual de determinación de la capacidad total de transporte de sedimentos, se puede seguir uno de los tres pasos siguientes:

- a) Realizar el cálculo directo para cada fracción de tamaño.

Para ello, se calcula directamente la tasa de transporte de sedimento para cada grano presente en la mezcla ( $q_{sj}$ ), siendo, la tasa de transporte total por unidad de ancho ( $q_s$ ):

$$q_s = \sum_j q_{sj}$$

- b) Realizar la corrección del esfuerzo cortante del fondo para cada fraccionamiento de cada clase de tamaño.

Consiste en introducir un factor de corrección al cálculo del esfuerzo cortante actuante sobre las partículas de diferentes tamaños presentes en el fondo. El fraccionamiento de capacidad para cada tamaño, se lleva a cabo determinando, en primer lugar, la capacidad de transporte para cada fracción de tamaño ( $j$ ), ( $C_j$ ), que se calcula con la fórmula de sedimentos con granulometría uniforme, como si ese tamaño fuera el único que estuviera presente en el fondo:

$$C_{tj} = p_j C_j$$

Donde:

- $p_j$ : % de material perteneciente al tamaño de la clase ( $j$ ) presente en el fondo.
- $C_{tj}$ : transporte potencial real para el tamaño de la  $j$ -ésima clase.

La capacidad total de transporte, ( $C_t$ ), sería:

$$C_t = \sum_j C_{tj}$$

Esta ecuación, es la más utilizada para el transporte fraccional en modelamientos numéricos. No obstante, como se indica a continuación, también pueden emplearse funciones de distribución, para calcular la capacidad de transporte en cada tamaño de clase.

- c) Usar una función de distribución que represente la muestra.

Para ello, debe calcularse en primer lugar la capacidad de transporte total, usando una ecuación para la carga de material en el fondo y distribuirla en capacidades de transporte fraccionadas, usando una función de distribución:

$$C_{tj} = F_j C_j$$

Con:

$$\sum_j F_j = 1$$

La principal ventaja de este método, reside en que la función de distribución ( $F_j$ ) no tiene por qué parecerse a la distribución de tamaño de los materiales del lecho. Esto permite incluir y mostrar los efectos de las condiciones hidráulicas y las propiedades de los sedimentos.

En función de los parámetros hidráulicos, la distribución de sedimentos y la composición del fondo, algunas partículas pueden erosionar, depositarse o incluso no moverse en el fondo. Por ejemplo, todas las partículas finas, pueden erosionarse y dejar una capa de materiales más gruesos que no puede ser transportada, evitando así su erosión y favoreciendo al acorazamiento del fondo, el cual evita la socavación de materiales subyacentes. Si se produce un incremento en la velocidad del flujo, se origina un aumento en la capacidad de transporte de sedimentos, causando un rompimiento del acorazamiento y un posterior reanudamiento del proceso de erosión.

### 7.3.1 Fórmulas experimentales para el transporte de material de fondo

La manera más habitual de expresar el transporte de material de fondo ( $Q_B$ ), es en su forma adimensional:

$$\Phi_B = \frac{Q_B}{d\sqrt{(S-1)g*d}}$$

➤ Fórmula de Kalinske-Frijlink

Sugerida en 1952, trataba simplemente de dar respuesta al problema, ajustándose a los datos disponibles de la época:

$$Q_B = 2d_{50} * \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \exp\left(\frac{-0,27 * (S-1) d_{50} * \rho g}{\tau'_b}\right)$$

Donde:

- $\tau_b$ : esfuerzo contante del fondo.
- $\tau'_b$ : esfuerzo cortante efectivo.

➤ Fórmula de Meyer-Peter y Müller

Obtenida en 1948, tras recabar una gran cantidad de datos experimentales. Se utiliza cuando el material es granular y abarca, desde arenas con diámetro mayor de 0.0002m, hasta gravas gruesas con diámetro menor o igual de 0.03m.

$$Q_B = 8 * D_m^{1,5} * g^{0,5} * \Delta^{0,5} * b * \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{1,5} * \left( \frac{d_m * S}{\Delta * D_m} \right) - 0,047 \right]^{1,5}$$

Donde:

- $Q_B$ : arrastre en la capa de fondo (m<sup>3</sup>/seg).
- $D_m$ : diámetro medio del material del fondo (m):

$$D_m = \frac{\sum D_i * P_i}{100}$$

- $n$ : rugosidad total en el tramo de estudio. Se obtiene de la expresión de Manning, a partir de datos de campo:

$$n = \frac{(d_m)^{2/3} * S^{0,5}}{U}$$

- $n'$ : rugosidad debida a las partículas:

$$n' = \frac{(D_{90})^{1/6}}{26}$$

- $b$ : ancho medio del fondo (m).
- $A$ : área de la sección (m<sup>2</sup>).
- $B$ : ancho de la superficie libre (m).
- $S$ : pendiente del lecho.
- $dm$ : tirante medio de la corriente, denominado a veces “radio hidráulico” (m):

$$dm = \frac{A}{B}$$

- $\Delta$ : densidad relativa de las partículas sumergidas (adim.):

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g = (S - 1)$$

➤ Fórmula de Einstein-Brown

Brown en 1950, desarrolló una función de transporte de material, basado en el principio de Einstein (1942), el cual defendía, que:

*“El número de partículas depositadas por unidad de área depende del número de partículas en movimiento y de la probabilidad de que las fuerzas hidrodinámicas existentes, permitan que la partícula sedimente. Del mismo modo, el número de partículas erosionadas en la misma unidad de área, depende del número de partículas y de la probabilidad de que las fuerzas hidrodinámicas actuantes sean lo suficientemente fuertes como para moverlas.”*

En condiciones de equilibrio, el número de partículas depositadas debe ser igual al número de partículas erosionadas, cumpliéndose por tanto que:

$$\Phi_B = 40 * K * (\theta')^3$$

Donde:

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{(S-1)g * d_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{(S-1)g * d_{50}^3}}$$

Siendo (v) la velocidad de las partículas en movimiento, y ( $\theta'$ ) el parámetro efectivo de Shields, definido como:

$$\theta' = \frac{\tau'_b}{(S-1) d * \rho g}$$

### 7.3.2 Métodos por solución numérica

En la mayoría de los casos, no existen soluciones analíticas para las ecuaciones que gobiernan y describen el transporte de sedimentos. No obstante, si se disponen de herramientas y/o métodos numéricos, que ayudan a encontrar soluciones aproximadas del problema. La descripción de un resultado numérico de un modelo matemático, consiste en ecuaciones algebraicas que pueden ser programadas y resueltas mediante ordenador.

Existen muchos métodos o técnicas para abordar las soluciones de ecuaciones diferenciales complejas como las descritas anteriormente, destacan sobre todo el método de las diferencias finitas, el de los elementos finitos y el de los volúmenes finitos, como se verá más adelante. El fundamento principal de estos, reside en la disposición de cuadrículas discretizadas, en las que las variables continuas para las soluciones buscadas, son resueltas en puntos específicos del dominio.

La transformación de un problema de formulación continua a uno de formulación discreta, proporcionará una solución que deberá converger a la solución dada por la primera, siendo dicha convergencia, un término que denota la relación entre una solución numérica y otra analítica.

➤ Método de diferencias finitas

Se trata del método más simple y común en fluidos y en otras disciplinas, para encontrar soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales parciales. Para los casos de flujo en lámina libre, suele emplearse el esquema de 4 puntos o de Preissmann, denominado también esquema de caja.

Este tipo de métodos, están basados en las aproximaciones, mediante diferencias discretas, de los términos de la derivada individual, formando un conjunto de ecuaciones algebraicas con incógnitas definidas en puntos discretos sobre todo el dominio del problema. Dicha discretización, permite representarse de diferentes maneras, sin perder el rigor matemático.

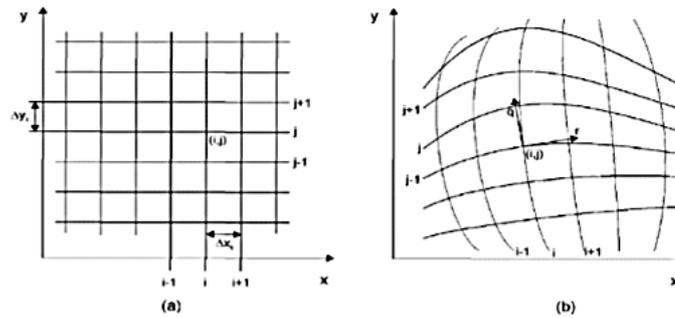


Figura 7-5. Mallas típicas empleadas por métodos de diferencias finitas.

La aplicación directa del esquema de Preissmann a las ecuaciones de Saint Venant, lleva a un sistema no lineal de ecuaciones algebraicas. Para evitar los problemas que implican los sistemas no lineales, en la práctica el sistema es linealizado usando las series de expansión de Taylor.

➤ Método de elementos finitos

Empleado exitosamente desde 1960, es excepcionalmente útil para resolver problemas con geometrías complejas. Para cuadrículas no estructuradas, los nodos de cálculo no necesitan estar definidos ordenadamente.

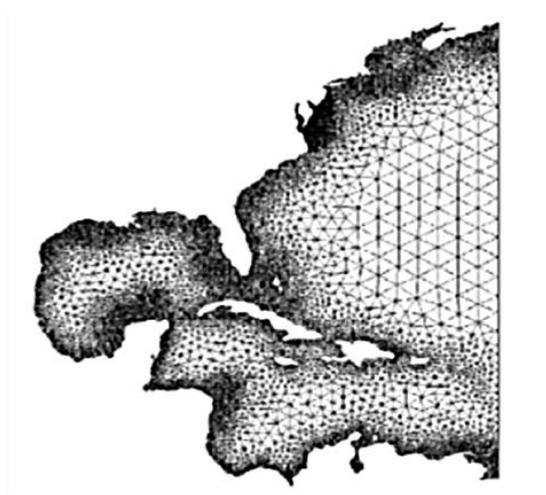


Figura 7-6. Ejemplo de malla de elementos finitos.

Hay dos estrategias para la formulación de un método por elementos finitos, la primera, es a través de una forma variacional, donde el principio de variación que gobierna la ecuación es minimizado, la segunda, es a través de un proceso de ponderación residual, orientado a minimizar el tipo de error de las ecuaciones.

Otra característica del método de los elementos finitos, es que el dominio, es dividido en subdominios poliédricos (elementos) que no se superponen, considerando en cada subdominio las condiciones de frontera o contorno.

Dentro de cada elemento, las variables dependientes son aproximadas por funciones de interpolación, la forma asumida de la función es determinada por el tipo de elemento usado, siendo los más utilizados para la mecánica de fluidos:

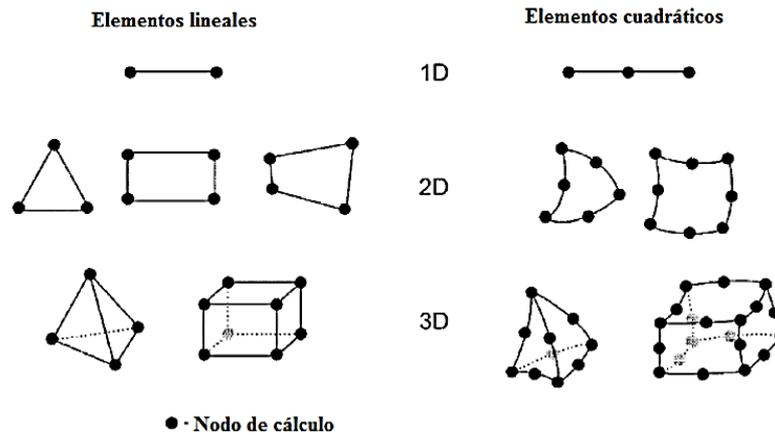


Figura 7-7. Elementos finitos más comunes.

➤ Método de volumen finito

Es equivalente al método de diferencias finitas y se fundamenta, principalmente, en las leyes de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. El dominio de cálculo, es subdividido en un número arbitrario de volúmenes de control y se plantean las ecuaciones de gobierno, para todos los volúmenes elementales, con diversos esquemas de discretización para los flujos que atraviesan las fronteras del volumen de control.

Hay dos maneras para definir la forma y posición del volumen de control respecto a los puntos de la malla discreta:

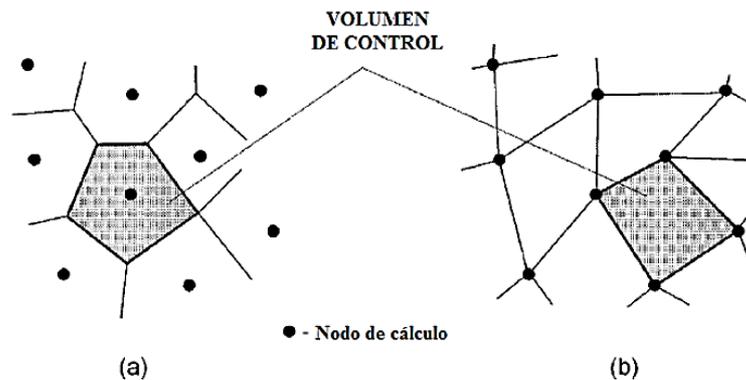


Figura 7-8. Esquemas de volúmenes de control.

El esquema de nodo central (a), que pone el nodo de la malla en el centroide del volumen de control, haciendo que este sea idéntico a la celda. Y el esquema centrado en la celda (b), en el que el volumen de control se forma al conectar los nodos adyacentes.

La ventaja principal del método de volumen finito, es que la discretización espacial se hace directamente en el espacio físico, sin la necesidad de hacer transformaciones de un sistema coordenado a otro. Además, se trata de un método flexible, que puede aplicarse en mallas estructuradas o no estructuradas.

## 7.4 Tipos de modelos

Pese a que existe una amplia gama de modelos para el estudio del transporte de sedimentos, no hay ninguno en concreto que destaque por encima del resto. Esto se debe principalmente, a la gran diversidad presente entre todos ellos, en base al nivel de complejidad, a los requerimientos de datos de calibración y entrada, a los costes computacionales, etc.

Así pues, los modelos pueden clasificarse en tres categorías, dependiendo del proceso físico modelado, de los algoritmos que describen el modelo y de la dependencia de los datos.

### 7.4.1 Modelos empíricos

Son los más sencillos, y se basan principalmente en el análisis por observación. Muchos modelos empíricos, emplean técnicas estocásticas para recopilar la información necesaria para el análisis, esto hace que sean criticados, al asumir hipótesis no realistas acerca del comportamiento físico del sistema.

### 7.4.2 Modelos conceptuales

Este tipo de modelos, sirven para mostrar los efectos cuantitativos y cualitativos de un efecto, sin necesidad de disponer de una gran cantidad de información. Se suelen emplear en la hidráulica fluvial, para el análisis de los posibles cambios en el uso de tierras. Los parámetros de los modelos conceptuales, se obtienen de calibraciones de datos observados, como caudales o mediciones de concentración.

### 7.4.3 Modelos físicos

Se basan principalmente, en las soluciones de las ecuaciones físicas fundamentales, que describen el flujo en ríos y sedimentos, siendo estas las de conservación de la masa y cantidad de movimiento para el agua y la de conservación de la masa únicamente, para los sedimentos.

En general los parámetros usados en los modelos físicos son medibles y “conocidos”, sin embargo, en la práctica la gran cantidad de parámetros y la heterogeneidad de las características de un lugar específico, demandan una calibración con datos observados.

El origen de los modelos físicos basados en expresiones matemáticas, muestra muchos supuestos que a veces no son relevantes en situaciones reales. En general, las ecuaciones que dominan los procesos en un modelo físico provienen de escalas pequeñas y bajo condiciones físicas específicas.

### 7.4.4 Selección del tipo de modelo

Este aspecto es realmente importante a la hora de realizar el análisis, ya que cada modelo definido, tiene un propósito o finalidad específica y no todos valen por igual para cualquier casuística. Para una correcta elección, es fundamental conocer y definir en primer lugar, el objetivo o problema que se desea estudiar.

Los modelos numéricos, al igual que los físicos, son usados frecuentemente, siendo una alternativa prometedora cuando el problema no puede ser resuelto con un simple prototipo.

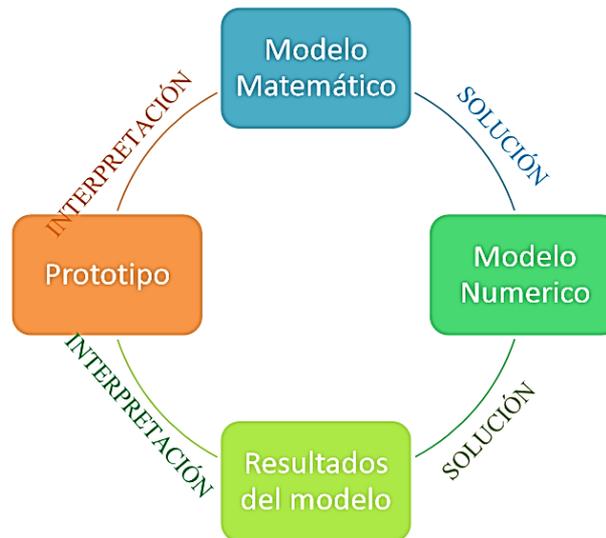


Figura 7-9. Ciclo del modelamiento computacional.

Dentro del esquema adjunto, el prototipo corresponde a la situación o problemática que se desea estudiar, siendo definida por los datos de entrada iniciales. Estos datos, corresponden a las características físicas fácilmente identificables (condiciones de batimetría, caudal, turbulencia, mecanismos en el transporte de sedimentos, etc.). Por consiguiente, los pasos para definir un modelo son:

1. Comprender y armar el prototipo.
2. Interpretar los parámetros físicos identificados y medidos en el problema, traduciéndolos en ecuaciones con las que poder definir el modelo matemático, siendo este una primera aproximación y, por tanto, un prerequisite para definir el modelo numérico.
3. Plantear una solución para resolver el modelo matemático.
4. Finalmente, la interpretación de los resultados y posterior ajuste a las condiciones del problema, para ofrecer una respuesta válida.

La elección del modelo, por tanto, deberá tener en cuenta los requerimientos del problema, el conocimiento del sistema y la información disponible, residiendo la complejidad del proceso, en la cantidad y calidad de la misma. En definitiva, el éxito de un estudio depende, de la capacidad del entendimiento del proceso fluvial, las teorías asociadas, las capacidades y limitaciones de los modelos computacionales.

#### 7.4.5 Formulación de modelos conceptuales

El modelo empleado en el presente trabajo, ha sido de tipo conceptual. La formulación de estos modelos, consiste en un proceso continuo y dinámico, que precisa de una cierta cantidad de datos e información, para su posterior análisis. Pueden incorporar diferentes escalas de tiempo y espacio, según sea el alcance del estudio, así, los procesos de un río, pueden manejarse teniendo en cuenta los fenómenos geológicos (deslizamientos, flujo de derrubios, etc.) más recientes o aquellos debidos a una escala temporal mucho mayor.

Para procesos hidrológicos, el marco temporal de los fenómenos que afectan a la zona de aguas arriba, puede abarcar varios años o décadas, mientras que, para aquellos asociados a flujos individuales como aguas abajo de compuertas o deposición de sedimentos, se requiere escalas temporales de días, horas o incluso minutos. Es por ello, que una de las principales ventajas de los modelos conceptuales frente a los numéricos, es su mayor facilidad a ajustarse a escalas espacio temporales muy diversas.

El tipo, cantidad y calidad de datos, dependerá siempre del tipo de modelo a realizar y la precisión del mismo. Entre los métodos más habituales para la caracterización y definición de los estudios hidrológicos, destacan:

- Recopilación de mapas históricos y aerofotografías, esenciales para conocer la historia del río y el uso de los suelos adyacentes.
- Estudio topográfico del río, llanuras de inundación, terrazas y marcas de los niveles del agua. Describen las relaciones entre el flujo del río y la elevación de la superficie del agua, permitiendo así, el cálculo del caudal circulante y de los límites de inundación de la zona.
- Medición de la gradación del tamaño de las partículas del lecho y materiales de las orillas, con el fin de determinar la capacidad de transporte de sedimentos y valorar la estabilidad del canal.
- Parametrización del río (altura, pendiente, composición, vegetación, etc.).
- Perfiles del suelo y análisis de radiocarbono de materiales depositados en las terrazas, para la determinación de la edad mínima de los depósitos, siendo información valiosa para definir las zonas de inundación y migración de sedimentos y las frecuencias de flujos anómalos.
- Medición de la velocidad del flujo (dirección y magnitud) ayudan a calibrar los modelos físicos y numéricos y proporcionan información sobre las áreas existentes de deposición.

➤ Parámetros en los modelos conceptuales

Entre los parámetros más importantes para la correcta definición y ejecución de un modelo conceptual, se encuentran:

- Procesos Geomórficos:

Un análisis geomórfico, otorga el contexto para comprender el cauce del río, la trayectoria histórica del cauce, las tasas de migración, la interacción entre zonas de inundación y las terrazas y la fuente de sedimentos, permitiendo así, la identificación de las posibles influencias aguas arriba y abajo del cauce, los controles geológicos y las acciones humanas que afectan los procesos naturales.

- Geología:

Para un río, la geología es el conjunto de propiedades que determinan el movimiento del agua y los sedimentos. Las características geológicas, dependen de la composición y estructura del suelo.

- Clima:

Algunos de los aspectos atmosféricos más importantes de la cuenca son, la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias y las temperaturas medias y extremas anuales, entre otros. Las fechas y duraciones de las fluctuaciones climáticas son usadas frecuentemente para identificar las causas de los cambios del comportamiento de un río.

- Topografía:

La topografía se define básicamente como el relieve de la cuenca del río. Este, analiza los cambios de elevación que afectan a la pendiente y gradiente del cauce, a la corriente, a la deposición de sedimentos y a la morfología de la desembocadura.

- Suelos:

El desarrollo de los suelos es influenciado por factores como la geología, el clima y la topografía. Los suelos, intervienen en la escorrentía y el tipo de vegetación, además, afectan la calidad del agua circulante, a la pendiente del lecho y a la estabilidad de las orillas.

- **Morfología del Canal:**

La morfología del cauce se describe por la forma, pendiente y patrones del mismo, incluyendo las llanuras de inundación y las terrazas. La forma natural es irregular, pero puede modelarse en base a algunos parámetros característicos, como el ancho del canal, la profundidad máxima y promedio del cauce, la pendiente de las orillas, la sección transversal, el perímetro mojado, etc. La forma del canal, incluye las formas de fondo como las dunas o los rizos, y su representación en planta, se ha dividido tradicionalmente en tres clases: canales rectos, meandros y trezados, siendo los segundos, los más comunes.

- **Vegetación:**

La geología, el clima, la topografía y el suelo, condicionan el tipo de vegetación a desarrollarse en un terreno. Para los ríos, la vegetación ayuda en la estabilidad de las orillas y es un indicador de la edad de los depósitos fluviales y de la morfología del terreno.

## 7.5 Modelos conceptuales

La modelación física y la simulación matemática, corresponden a dos técnicas distintas para afrontar la solución de problemas hidráulicos complejos. Como apoyo a la modelación física para la búsqueda de respuestas de los comportamientos naturales de los ríos y sus avenidas, se dispusieron de otras herramientas, basadas en la aplicación de modelos matemáticos a la hidráulica del flujo laminar libre, aprovechando el auge y vigencia del desarrollo de computadores y lenguajes de programación. En la actualidad, la modelación matemática en el campo específico de la hidráulica y sus interacciones con estructuras, se aplica principalmente en redes de flujos unidimensionales y bidimensionales.

En un principio, los problemas se abarcaban desde un punto físico o numérico, sin embargo, fue necesario unir los dos propósitos para tener un acercamiento más real al problema. Por ejemplo, en un problema hidráulico complejo, con interacciones suelo-agua-estructuras, donde las variables son tridimensionales y existen flujos turbulentos, el uso únicamente de un modelo matemático, se queda corto para describir los efectos tridimensionales de las condiciones de contornos locales complejas. Sin embargo, hoy en día, existen suficientes herramientas computacionales, para simular el comportamiento real con bastante aproximación.

La modelación matemática del flujo de agua en un río, es una técnica empleada para determinar las variables hidráulicas de (profundidad, velocidad, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de las ecuaciones de comportamiento, correspondiendo a una aproximación de la realidad y siendo más precisa, cuanto mejor se adaptan y asocian las ecuaciones de partida y esquemas numéricos.

Con el fin de unificar todos los procesos y conseguir una rápida y eficiente resolución del problema, surgen los modelos computacionales.

El uso de modelos computacionales para el cálculo del transporte hidrodinámico de sedimentos, implica, dentro de su solución numérica, una o más de las ecuaciones diferenciales de gobierno, tales como la de la energía de un fluido o la ecuación de continuidad, particularizada además para sedimentos.

Una de las principales ventajas en el uso de los modelos computacionales, es su versatilidad frente a los modelos físicos, ya que, mientras que los primeros son siempre fácilmente adaptables a diferentes condiciones físicas, los segundos, son planteados fundamentalmente, para representar un lugar y unas situaciones específicas.

### 7.5.1 Tipos de modelos

La evolución de los modelos discurre desde:

- Años 60 → modelos de una única dimensión (1D) y secciones transversales sencillas.
- Años 80 → modelos de dos dimensiones (2D), caracterizados por incluir profundidades.

- Actualidad → se aumenta el número de variables a considerar, logrando modelos en tres dimensiones (3D).
- Modelos de una dimensión (1D):

Desde comienzos de los 60's, los modelos de 1D han sido empleados con éxito en la ingeniería. La mayoría de estos modelos, se formularon en el sistema de coordenadas cartesianas y resuelven las ecuaciones diferenciales de conservación de la masa y momento del flujo (Saint Venant) junto con la ecuación de continuidad de masa de sedimentos (Exner) usando esquemas de diferencias finitas.

En general los modelos de una dimensión predicen los parámetros básicos de un canal particular, incluyendo su velocidad, elevación de la lámina de agua, variación en la elevación del lecho y el transporte de los sedimentos. Este tipo de modelos, siguen siendo una opción muy utilizada para conocer las características de un lecho, gracias a su simplicidad, a la baja cantidad de datos que precisa y a los mínimos requerimientos computacionales que consume.

- Modelos de dos dimensiones (2D):

La mayoría de modelos de 2D, promedian en la profundidad las ecuaciones de Navier-Stokes y las resuelven, junto con la ecuación de balance de masa de sedimentos, con métodos de diferencias finitas, elementos finitos o volumen finitos.

Los modelos matemáticos actuales, empleados en el ámbito de la hidráulica fluvial para una y dos dimensiones, se fundamentan en las ecuaciones clásicas de Saint Venant.

- Modelos de tres dimensiones (3D):

En muchas aplicaciones de la ingeniería hidráulica, los modelos en 2D quedan limitados para lograr una simulación más real. Es por ello, que surgen los modelos en tres dimensiones, que definen y describen con certeza los procesos de transporte de sedimentos. La mayoría de modelos 3D resuelven las ecuaciones de continuidad y las de Navier-Stokes junto a la ecuación de balance de masa de sedimentos por medio de métodos como diferencias finitas, elementos finitos o volumen finito.

De entre todos los modelos existentes, destacan a nivel mundial los siguientes:

Tabla 7-3. Principales modelos computacionales.

<b>Modelos</b>	<b>Desarrollador</b>	<b>Alcance</b>
HEC	US Army Corps of Engineers. USA	Unidimensional. El más conocido y aplicado en hidráulica fluvial. Permite régimen no permanente y transporte de sedimentos.
MIKE	Danish Hydraulic Institute DHI. Dinamarca	Tiene un entorno integral para modelación hidrodinámica en una dimensión (MIKE11) y dos dimensiones (MIKE21).
TELEMAC	Electricité de France, EDF. Francia	Trabaja con elementos finitos módulos de simulación en 1, 2 y 3 dimensiones y considera transporte de sedimentos.
DELFT 3D	DELTARES	Permite simulación en 2D y 3D.
INFOWORKS	HR Wallingford	Está integrado a un GIS, tiene módulos para modelación de ríos, saneamientos, módulos costeros y gestión de recursos hídricos.

Dentro de estos, y para el caso específico de análisis en una dimensión (1D), resalta el modelo tipo HEC-RAS, el cual, además, será el que se empleará en el presente trabajo para el modelado del flujo y transporte de sedimentos y su repercusión en los riesgos de inundación, tal y como se analizará en los siguientes apartados.

## 7.6 Aplicaciones y soluciones de los modelos vigentes

Los modelos unidimensionales en régimen permanente gradualmente variado y de fondo fijo, se usan para obtener valores de velocidades y niveles de agua, siendo herramientas más que suficientes, cuando el estudio en el tiempo no es un factor fundamental en el análisis. Además, para flujos unidimensionales, los esquemas numéricos son simples y eficaces, y permiten considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas, llanuras de inundación, singularidades, etc.

Cuando la complejidad aumenta, es decir, cuando si se consideran variaciones temporales (flujos no permanentes), es necesario recurrir a ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable o Ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales. Para resolverlas, se han empleado una gran variedad de esquemas numéricos, tanto con las ecuaciones completas, como simplificadas (despreciando términos irrelevantes), creándose nuevos métodos conocidos como hidrológicos, onda cinemática y onda difusiva.

Los modelos, en el contexto de la evolución de un río, son simplificaciones abstractas de un sistema fluvial, que busca representar procesos y propiedades que afectan a los cambios de la dinámica y formas del sistema.

La modelación permite definir ambientes, que pueden ser virtuales (modelos matemáticos) o físicos (modelos de laboratorio) donde se pueden realizar análisis repetitivos y controlados sin ningún tipo de problema. Las principales ventajas de su uso son, permitir la simulación y observación de eventos pasados, aprendiendo sobre su comportamiento y predecir la ocurrencia de nuevos fenómenos.

### 7.6.1 Régimen permanente gradualmente variado

Para el caso de flujo unidimensional, se trata de la aproximación más utilizada para el estudio de niveles y velocidades del agua en ríos. Sus hipótesis y ecuaciones principales son:

- Movimientos unidimensionales.
- Conservación de la energía: se define una sección de control, donde el caudal de entrada y salida coinciden, garantizando la continuidad del caudal.
- La curvatura de la superficie libre es pequeña, se simplifica la distribución de presiones a una vertical como en la presión hidrostática.

Se parte de la ecuación de conservación de la energía simplificada o Bernouilli:

$$\frac{d}{dx} \left( z + y + \alpha \frac{v^2}{2g} \right) = -S_f$$

Donde:

- x: abscisa o dirección del flujo.
- z: cota piezométrica.
- y: profundidad.
- v: velocidad media en la sección.
- g: aceleración de la gravedad.
- $\alpha$ : coeficiente de Coriolis.
- $S_f$ : pendiente evaluada con la fórmula de Manning:

$$S_f = \frac{n^2 * v^2}{R^{4/3}}$$

- n: coeficiente de rugosidad de Manning.
- v: velocidad media en la sección considerada.
- R: radio hidráulico, relación entre área de flujo y el perímetro mojado.

### 7.6.2 Régimen no permanente rápida o gradualmente variado

Se trata de un régimen gradualmente variado, cuando los cambios en profundidades y caudal se dan en largos periodos de tiempo y grandes distancias (propagación de una avenida en un gran río de régimen lento). Por el contrario, se trata de un régimen rápidamente variado, cuando dichas variaciones, se producen en intervalos de tiempo cortos y distancias reducidas (resalto hidráulico, frente de onda producido por rotura de presa, etc.).

Las ecuaciones de Saint-Venant describen ambos tipos de régimen, para obtenerlas, se hacen simplificaciones de las ecuaciones de las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Sus hipótesis y ecuaciones principales son:

- El fondo es fijo.
- Baja pendiente del lecho.
- La distribución de presiones en la vertical es del tipo hidrostática.
- La profundidad de la lámina de agua es pequeña en relación a las otras dimensiones del problema.

Las ecuaciones de Saint Venant para canales naturales o no prismáticos, se pueden escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \frac{\partial}{\partial x} F = H$$

Donde:

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} ; \quad F = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{bmatrix} ; \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ gI_2 + g A(S_o - S_f) \end{bmatrix}$$

Siendo (A), el área de la sección mojada, (Q) el caudal circulante e ( $I_1$ ) la fuerza debida a la presión del agua en una sección, que puede escribirse como el momento geométrico, o momento de primer orden de la sección, respecto de la superficie libre:

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) b(x, \eta) d\eta$$

Por su parte, ( $I_2$ ), puede definirse como la contribución de las fuerzas de presión del contorno:

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b(x, \eta)}{\partial x} d\eta$$

Donde (b) es el ancho superficial y (h) la profundidad.

En canales prismáticos, aunque tengan una sección cualquiera, el término ( $I_2$ ), es idénticamente nulo.

### 7.6.3 Modelamientos numéricos o matemáticos

Son la expresión formal, en lenguaje matemático, de las relaciones existentes entre las componentes del modelo. Entre sus características, destaca, la búsqueda de un cierto nivel de exactitud en la explicación del sistema, pero siempre desde una relativa simplicidad computacional, sin necesidad de representar fielmente la realidad y permitiendo que los resultados puedan ser comparados y verificados con datos reales, obtenidos previamente.

Los modelos numéricos, sirven para representar procesos fluviales en tiempo y espacio. Para la componente espacial, si se quiere modelar un río, se necesita información referente a las secciones transversales, a las profundidades en las secciones, las erosiones y los depósitos de material.

Tomando como base el concepto de los modelos numéricos, surgen los siguientes subtipos:

➤ Modelos estocásticos deterministas y no deterministas

Los primeros, siempre van a producir el mismo conjunto de variables de salida a partir de un conjunto de parámetros de entrada, mientras que los no deterministas, implican procesos aleatorios que modifican las variables resultantes.

Por ejemplo, para estimaciones de riesgos de inundación, es muy difícil establecer con certeza la altura máxima de la lámina de agua. Sin embargo, empleando modelos estocásticos, se pueden obtener distribuciones de probabilidades de altura de agua, lo que hace que estos sean una herramienta interesante para la planificación del territorio.

➤ Modelos agregados o distribuidos

La principal diferencia entre ambos, es que, mientras los primeros consideran el área de estudio como una unidad (Cuenca Hidrográfica), en la que todos los parámetros del modelo tienen un único valor, los modelos distribuidos, sí consideran las variaciones espaciales y dividen el área de estudio en porciones y cada una de estas tendrá su conjunto respectivo de parámetros y variables, que se interrelacionarán con sus vecinas.

➤ Modelos estáticos o dinámicos

Los estáticos dan un resultado para todo el periodo de tiempo considerado (un caudal medio o pico). Los modelos dinámicos, por el contrario, devuelven series temporales de las variables consideradas en el periodo de estudio.

Por ejemplo, para un modelo estático de una cuenca, el caudal medio depende de la precipitación media y de los parámetros de la cuenca, mientras que, en uno dinámico, el caudal en cada intervalo de tiempo considerado, depende de la precipitación, no solo en el periodo estudiado, sino también en intervalos anteriores, además de depender de los parámetros de la cuenca.

❖ **Fases de la modelización:**

El proceso a seguir es el siguiente:



Figura 7-10. Fases de una modelización.

- 1) Identificación: se establecen las componentes y sus relaciones, así como las ecuaciones matemáticas que representan el modelo.
- 2) Calibración: se determinan los valores de los parámetros, ya sea mediante trabajos de campo o con modelos empíricos.
- 3) Validación: se evalúa el error cometido y se determina si es asumible.
- 4) Simulación: se obtienen las series de variables en un tiempo futuro, a partir de series simuladas de datos de entrada.
- 5) Análisis de sensibilidad: se encuentra y analiza, la influencia de cada uno de los parámetros definidos, con los resultados obtenidos por el modelo.

### ❖ Modelos de una dimensión

La mayoría de los modelos de transporte de sedimentos empleados en la ingeniería fluvial, son unidimensionales (1D), especialmente los empleados en simulaciones y ríos largos. Este tipo de modelos, requieren de datos de campo y ensayos para su calibración y están basados en las ecuaciones de Saint-Venant, siendo estas:

➤ Ecuación de Conservación de la Masa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Donde:

- A: área de la sección transversal.
- Q: caudal.
- q: afluente por unidad de longitud.

➤ Ecuación de conservación del momento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial \eta}{\partial x} + g A (S_f - S_o) = 0$$

Donde:

- Sf: pendiente friccional.
- So: pendiente del fondo.
- β: coeficiente de corrección del momento (≈ 1).

Estas ecuaciones, conocidas como las ecuaciones de Saint Venant, parten de las siguientes premisas:

- La pendiente del fondo del canal es pequeña.
- No se tienen en cuenta, los efectos de curvatura.
- Todas las variables son uniformes en la sección transversal.
- La pendiente friccional, es dependiente del flujo:

$$S_f = \frac{Q |Q|}{K^2}$$

Siendo (K) el transporte.

El transporte, puede determinarse, empleando la ecuación de Manning o Chézy. Cuando se tienen condiciones de frontera especiales, el flujo no puede representarse en una sola dimensión.

Las ecuaciones descritas anteriormente, son correctas solo si (dx=ds), es decir, si la relación entre la longitud del canal (s) y la distancia río abajo (x) se mantiene igual a 1. No obstante, esto no se da en la mayoría de los ríos, donde, los grandes incrementos en el caudal se deben a la existencia de cauces sinuosos.

En los siguientes apartados, más concretamente en el “*Apartado 10.2: Transporte de sedimentos. Modelización del río Guadalhorce aguas abajo de los embalses*” se analizará el caudal de transporte sólido obtenido en algunos puntos del río, poniendo de manifiesto la considerable presencia de este en la zona de estudio y justificando su impacto sobre la mancha de inundación. Finalmente, el modelo utilizado para su dimensionamiento ha sido el software HEC-RAS ya mencionado, cuyos parámetros serán definidos más adelante.

## 8 ESTUDIO DE INUNDACIÓN

*Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.*

*- Theodore von Karman -*

Los estudios de inundabilidad, forman parte de los instrumentos de prevención de riesgos de inundación establecidos por la Ley de Aguas de Andalucía. Estos, se fundamentan a su vez, en una gran variedad de estudios topográficos, geológicos, pluviométricos, hidrológicos, etc. así como en la evaluación de las (ARPSIs) y de los mapas de peligrosidad. Su principal función, es la de disminuir los riesgos de inundación y reducir las consecuencias negativas derivadas de la misma.

Las inundaciones, son la catástrofe natural que mayor daño genera en España. Según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, en nuestro país, los daños por inundaciones se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales.

En la siguiente tabla, se muestran el número de víctimas mortales en años anteriores debidas a inundaciones en España, según los datos suministrados por la Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio del Interior.

Tabla 8-1. Porcentaje de víctimas mortales debidas a inundaciones en relación a otras catástrofes naturales.

<b>Años</b>	<b>Inundaciones</b>	<b>Otros Fenómenos</b>	<b>% Inundaciones</b>	<b>Totales</b>
1995-2006	247	614	28,7	861
2007	11	7	61,1	18
2008	6	13	31,6	19
2009	6	30	16,7	36
2010	12	36	25,0	48
2011	9	32	22,0	41
<b>TOTAL</b>	291	732	28,4	1023

En cuanto a los daños materiales y a modo de ejemplo, cabe destacar que sólo en bienes asegurados, en el período 1971-2012 y según las estadísticas del Consorcio de Compensación de Seguros, el 42,9% de los expedientes tramitados fueron debidos a daños por inundaciones, lo que supuso el 60,3% del total de las indemnizaciones, las cuales, de media, suponen más de 130 millones de euros cada año.

Con relación a los daños producidos en la actividad agrícola, gestionadas a través de la Entidad Nacional de Seguros Agrarios y Agroseguro, se cuenta con los datos del Informe Anual 2011 de este último, según el cual, el número de siniestros ocasionados por inundaciones a nivel nacional ascendieron a 1.825. Por su parte, las indemnizaciones debidas a daños por inundaciones dentro del sector agrario en el año 2012, fueron de 19.551.000 €.

Las inundaciones, pueden comúnmente dividirse, en base a su origen, en dos tipos:

a) Inundaciones de origen fluvial:

Para el cálculo de las zonas inundables, es necesario realizar estudios hidrológicos e hidráulicos. Mediante el estudio hidrológico se estiman los caudales de cálculo asociados a los distintos escenarios de probabilidad que se introducirán en el modelo de simulación hidráulica. Por último, el estudio hidráulico, requiere de una buena caracterización física del cauce, mediante información cartográfica actual y de calidad suficiente de los tramos de estudio. Este proceso, se desarrolla, a lo largo de todo el trabajo.

b) Inundaciones producidas por el mar:

Dentro de estas, la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar ha empleado una base metodológica, con la que quedarse siempre del lado de la seguridad. Para el caso de la ciudad de Málaga, zona de desembocadura del río Guadalhorce, el plan no contempla ningún riesgo de inundación, ni por marea ni por oleaje.

Tal y como se indicó en el “*Apartado 3: Legislación*” del presente trabajo, para la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) y la identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs), se ha empleado toda la información contenida en el Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en cauces urbanos andaluces, siguiendo las siguientes pautas:

➤ *Preselección de zonas de riesgo potencial de inundación:*

El procedimiento que se sigue para la identificación de estas zonas de riesgo, consiste en analizar la información disponible sobre inundaciones históricas y los estudios previos de inundabilidad y riesgo redactados por las distintas administraciones, e identificar aquellas zonas susceptibles de sufrir inundaciones a partir de las características geomorfológicas de los cauces.

➤ *Identificación de los umbrales de riesgo significativo:*

Tras la preselección de las zonas con riesgo de inundación, se identificaron aquellas en las que tal riesgo era significativo o en las cuales la materialización de ese riesgo podía considerarse probable. Por ello, se establecieron unos umbrales de riesgo para la evaluación de los impactos significativos, tal y como se muestra en la “*Tabla 3-1. Puntos de Riesgo de la Cuenca del Guadalhorce*”, de donde destacan, para la zona de estudio en cuestión, los núcleos de Cártama, Málaga y Pizarra, con unos niveles de riesgo tipo D, A y C, respectivamente.

➤ *Selección de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs):*

Para la identificación de las Áreas de Riesgo, y como ya se comentó en el “*Apartado 3: Legislación*”, se ha elaborado el siguiente mapa, mostrando las ARPSIs de la zona de estudio.

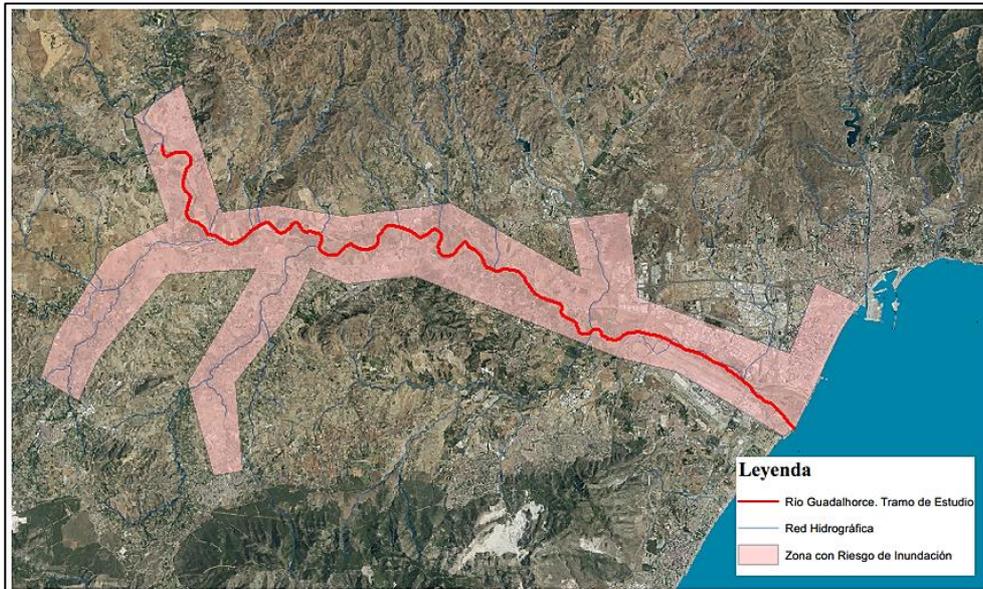


Figura 8-1. Mapa de las ARPSIs de la zona de estudio.

Como se puede apreciar, a lo largo de toda la zona de estudio, existe una alta probabilidad de riesgo de inundación, donde, las avenidas, en función de su periodo de retorno, pueden llegar a provocar ciertos desbordamientos del cauce, inundando terrenos de cultivo, viviendas e incluso zonas industrializadas.

Con todo ello, queda evidenciado que, el objetivo último del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación es, para aquellas zonas determinadas en la evaluación preliminar del riesgo, conseguir que no se incremente el riesgo de inundación actualmente existente y que, en lo posible, se reduzca a través de los distintos programas de actuación, que deberán tener en cuenta todos los aspectos de la gestión del riesgo de inundación, centrándose en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana, y teniendo en cuenta las características de la cuenca o subcuenca hidrográfica consideradas, lo cual adquiere más importancia al considerar los posibles efectos del cambio climático.

De este modo, los objetivos generales y la tipología de medidas para alcanzarlos que se recogen en el Plan Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación, son los siguientes:

- Incremento de la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, los agentes sociales y económicos.
- Mejorar la capacidad predictiva ante situaciones de avenida e inundaciones.
- Contribuir a mejorar la ordenación del territorio y la gestión de la exposición en las zonas inundables.
- Conseguir una reducción, en la medida de lo posible, del riesgo a través de la disminución de la peligrosidad para la salud humana, las actividades económicas, el patrimonio cultural y el medio ambiente en las zonas inundables.
- Mejorar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad de los elementos ubicados en las zonas inundables.
- Contribuir a la mejora o al mantenimiento del buen estado de las masas de agua a través de la mejora de sus condiciones hidromorfológicas.

La visualización de los resultados obtenidos referentes al estudio de inundación de la zona, se encuentran disponibles el “*Apartado 11: Estudio comparativo*”, en el cual, tras la realización de los estudios hidráulicos correspondientes, se analizan y comparan las manchas de inundación obtenidas en uno y otro.

# 9 ESTUDIO HIDRÁULICO 1. MODELADO CON (N) DE MANNING CLÁSICO

---

*Las matemáticas son el alfabeto con el cual Dios  
ha escrito el universo.*

*- Galileo Galilei -*

## 9.1 Introducción

El objetivo fundamental de un estudio de prevención de inundaciones y ordenación hidráulica, es la obtención razonada de la delimitación de zonas inundables asociada a cada tramo fluvial, de forma que se cuente con una herramienta objetiva para la identificación de riesgos, la priorización de los mismos y la clasificación del territorio en función de su vulnerabilidad ante crecidas extraordinarias. Este tipo de información, es el punto de partida para la definición de las obras de defensa necesarias para mitigar los daños potenciales existentes en los distintos núcleos urbanos implicados y para la asignación de los usos compatibles con las zonas afectadas por la inundación.

Así pues, en el presente apartado, se recogen los resultados de la simulación hidráulica del cauce en estudio, empleando para ello, el software HEC-RAS del US Corps of Engineers, capaz de evaluar, en régimen permanente gradualmente variado, un curso fluvial caracterizado fundamentalmente por una serie de secciones transversales del cauce y las llanuras de inundación, por la geometría de los obstáculos existentes en el mismo y por sus coeficientes de rugosidad de Manning. Los caudales simulados corresponden a períodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años.

Como resultados principales, se presentan los datos numéricos de las variables hidráulicas que caracterizan el flujo y una visualización gráfica de las zonas inundables afectadas por las avenidas.

## 9.2 Ámbito de estudio

Hidrológicamente, la zona objeto de estudio comprende el tramo bajo de la cuenca fluvial del río Guadalhorce, ubicada en la provincia de Málaga, desde el embalse de Conde de Guadalhorce hasta su desembocadura. No obstante, y dadas las elevadas dimensiones de esta área, se desarrolló en primer lugar una labor de selección previa de los tramos de mayor interés desde el punto de vista de la prevención de inundaciones. Así pues, se escogió la parte más baja del tramo, abarcando los municipios de Pizarra, Cártama y Málaga, hasta su desembocadura en la costa al Sur del núcleo urbano de Málaga, por ser aquella que más podía afectar a los núcleos de población cercanos.

Para apoyar esta determinación, se ha empleado nuevamente la información contenida en el “Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y para la ordenación de la cuenca del río Guadalhorce”, elaborado para la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. El procedimiento seguido en el mismo fue el siguiente:

- Definición de puntos de estudio, a partir de los puntos críticos identificados en el “Plan de Prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces” (Junta de Andalucía – 2002).
- Definición de las secciones críticas de estudio, así como la pendiente longitudinal del cauce.
- Asignación de un coeficiente de rugosidad de Manning conservador.
- Determinación del caudal de diseño asociado a un período de retorno de 1000 años.
- Estimación de la cota de inicio de daños y de la cota de lámina asociada a la avenida de T=1000 años mediante la formulación de Manning aplicada a la sección de estudio.
- Establecimiento justificado de los núcleos con riesgo de inundación, para los que el resguardo entre la cota de inicio de daños y la cota de lámina fue inferior a 40-50 cm.

Posteriormente, de los núcleos urbanos descartados por el estudio hidráulico, se seleccionaron aquellos que presentaban una diferencia entre la cota estimada de inicio de daños y la cota de lámina para un período de retorno de 1000 años inferior o igual a 1 metro, estudiándose bajo la óptica de posibles afecciones por presiones antrópicas.

Del mismo modo, se tuvieron en consideración las posibles variaciones debidas a las influencias de entidades puntuales (puentes, viaductos, vados, canteras, invernaderos, instalaciones agrarias, etc.), lineales (encauzamientos, canales, acequias, carreteras, caminos rurales, etc.) y/o poligonales (balsas, embalses, urbanizaciones, campos de golf, polígonos industriales, núcleos urbanos, etc.).

Con todo ello, y basándose en el tramo de estudio a analizar, se localizaron tres puntos de especial importancia (coincidentes con los núcleos evaluados en el “*Apartado 3.2: Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces*”):

Tabla 9-1. Niveles de riesgo de las zonas afectadas.

Municipio	Núcleo	Zona	Nivel de riesgo
Cártama	Estación de Cártama	Río Guadalhorce	D
Pizarra	Pizarra	Río Guadalhorce	C
Málaga	Málaga	Río Guadalhorce	A

### 9.3 Hidrología

En el “*Apartado 6: Estudio Hidrológico*” se muestran los caudales de diseño obtenidos para 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. Estos caudales, como puede verse en la siguiente tabla, han sido introducidos en 3 puntos del cauce. El primero de ellos, hace referencia al caudal proveniente de las subcuencas Alto Guadalhorce, Guadalteba y Turón, situadas aguas arriba de los embalses. Los puntos segundo y tercero, hacen referencia a los caudales aportados por las subcuencas Grande y Campanilla respectivamente:

Tabla 9-2. Caudales de cálculo (m<sup>3</sup>/s) por periodos de retorno.

Nº Sección	T = 10 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 500 años
1 (351)	656.2	947.0	1815.7	2141.0
68 (283)	1225.5	1953.3	3057.9	4004.8
264 (87)	1512.1	2497.7	3974.2	4947.1

Si bien el programa HEC-RAS incluye un módulo de cálculo en régimen variable capaz de analizar el tránsito de hidrogramas de forma eficiente, con el fin de dotar de coherencia al estudio, se emplearán los caudales previamente estimados, en los que ya se ha tenido en cuenta la laminación de los hidrogramas.

Estos valores se introducen en el modelo hidráulico como caudales constantes por tramos y se realiza una simulación en régimen permanente de forma que las láminas y velocidades obtenidas por un lado y los caudales introducidos por otro estén perfectamente integrados. Además, al inicio de cada tramo se introduce el caudal de diseño correspondiente al del punto final del mismo quedando, por tanto, las variables hidráulicas obtenidas del lado de la seguridad.

## 9.4 Hidráulica

### 9.4.1 Cartografía

Para la caracterización de la geometría de los distintos cauces y las llanuras de inundación asociadas, se ha empleado un Modelo Digital del Terreno, concretamente el MDT25 con paso de malla de 25 metros.

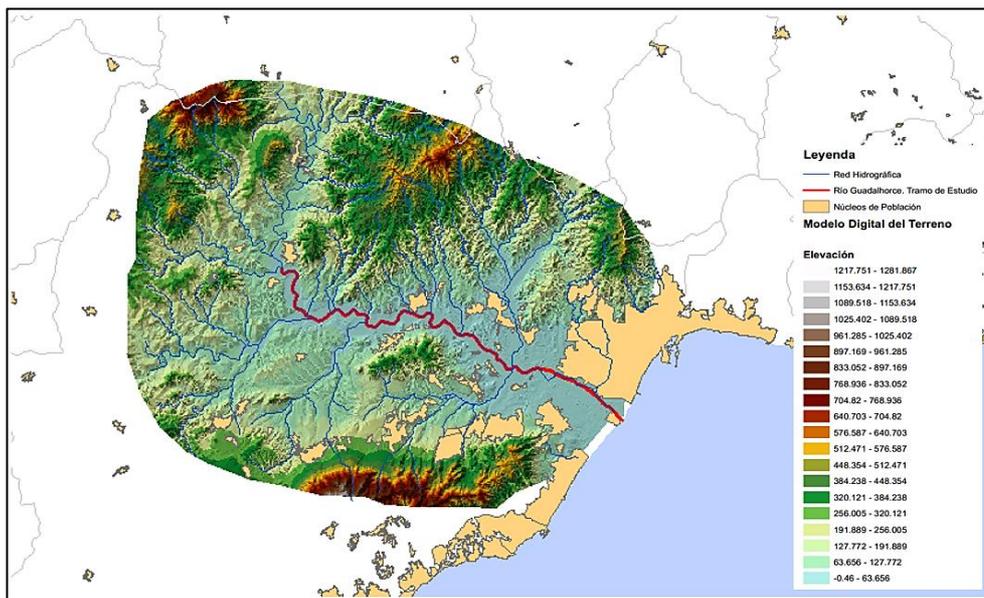


Figura 9-1. Mapa del modelo digital del terreno de la zona de estudio.

Adicionalmente, se han empleado Modelos Digitales de Superficies, obtenidos de los Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA), entre los que se encuentran las capas relativas al relieve, hidrografía, medio físico, usos del suelo, sistemas urbanos, etc. con las que modelar el dominio de estudio.

### 9.4.2 Software de cálculo

Para la ejecución de la simulación hidráulica del cauce en estudio, se ha empleado, como se ha comentado anteriormente, la versión 4.1.0 del Software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center para el U.S. Army Corp of Engineers.

Este programa permite resolver mediante técnicas numéricas flujos unidimensionales en régimen permanente y no permanente, pudiendo ser tanto en ríos de cauce único como en sistemas dendríticos y redes completas de drenaje. Además, es capaz de agregar a lo largo del cauce diversos tipos de estructuras (puentes, cubriciones, vertederos con compuerta, azudes, caños, etc.), resolviendo el flujo a través de ellas.

Cabe destacar en este sentido, que para el cauce principal del propio río Guadalhorce en su tramo bajo, no hay presencia de obras de drenaje o vados de ningún tipo. Con respecto a los puentes que se disponen a lo largo del mismo, los de mayor envergadura se caracterizan por períodos de retorno de rebosamiento superiores a los 1000 años, por lo que no se ha considerado su dimensionamiento en el modelo.

La simulación de los cursos fluviales se ha realizado en régimen permanente gradualmente variado, introduciendo los caudales obtenidos en el estudio hidrológico para los periodos de retorno considerados. El procedimiento de cálculo está basado en la resolución de la ecuación de la energía según la siguiente ecuación:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 * V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 * V_1^2}{2g} + \Delta H$$

Donde:

- $\Delta H$ , es la pérdida de energía entre secciones.
- $y_1$  e  $y_2$ , son los calados en las secciones de aguas arriba y aguas abajo.
- $z_1$  y  $z_2$ , son las cotas del lecho en las secciones de aguas arriba y aguas abajo.
- $V_1$  y  $V_2$ , son las velocidades de paso medias en las secciones aguas arriba y aguas abajo.
- $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , son los factores de ponderación de la velocidad en las secciones de aguas arriba y aguas abajo, debidos a que en una misma sección conviven distintas áreas con diferentes características físicas que se traducen en diferentes rugosidades y, por tanto, para igualdad de cota de lámina, en diferentes alturas de energía que deben ser compatibilizadas.

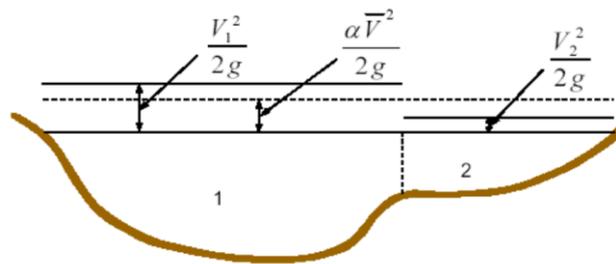


Figura 9-2. Simulación de cursos fluviales.

Por consiguiente, para poder estimar la altura de energía en una determinada sección, es necesario multiplicar el valor de la altura de energía obtenida mediante la velocidad media (caudal / área mojada) por un coeficiente ( $\alpha$ ) que cumpla que:

$$\frac{\alpha * \bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 * \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 * \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2}$$

Siendo  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $Q_1$  y  $Q_2$  respectivamente, las velocidades medias y caudales circulantes correspondientes a dos zonas diferenciadas dentro de una misma sección.

Por lo tanto, partiendo de las variables hidráulicas de la sección de aguas abajo, en el caso de régimen lento, y de aguas arriba, en el caso de régimen rápido, es posible obtener la altura de energía en la sección adyacente sin más que sumar o restar la pérdida de energía entre ambas. Una vez obtenida la altura de energía de la sección contigua y conocido el caudal circulante, el cálculo del calado y de la velocidad es inmediato. Sin embargo, como la pérdida de energía entre dos secciones depende de la velocidad tanto en la sección de aguas arriba como de la velocidad en las de aguas abajo, el proceso de cálculo debe ser necesariamente iterativo.

En este sentido, la pérdida de altura de energía entre dos secciones adyacentes depende por un lado, de las pérdidas de energía por fricción con el contorno del lecho (evaluadas a través de la ecuación de Manning), y por otro, de las pérdidas por contracción o expansión del flujo entre secciones adyacentes (evaluadas como el producto de un coeficiente de contracción-expansión por la diferencia de los términos de velocidad de la energía entre las secciones adyacentes) según se recoge en la siguiente expresión:

$$\Delta H = L * I + C * \left( \frac{\alpha_2 * V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 * V_1^2}{2g} \right)$$

Donde:

- L, es la longitud entre secciones promediada entre canal y llanuras en función del caudal circulante por cada una de las zonas.
- I, es la pendiente de la línea de energía obtenida mediante la formulación de Manning empleando un coeficiente de rugosidad medio de la sección.
- C, es el coeficiente de expansión o contracción entre secciones.

### 9.4.3 Geometría

La geometría de las secciones de cálculo se ha obtenido a partir del MDT disponible mediante la extensión HEC-GEORAS 4.1.1 compatible con ArcGIS, tomando una pendiente en todo el cauce del 0,177%, obtenida directamente del perfil longitudinal del mismo

Para su ubicación, se ha fijado un ancho de sección de 1 kilómetro y una distancia media de separación de 100 metros, debido a la gran longitud del tramo en estudio. Este margen, permite evaluar las zonas más conflictivas del cauce sin los problemas derivados de una separación menor, en los que la calibración del modelo se hace mucho más compleja. Con todo ello, el número total de secciones a analizar es de 351.

Del mismo modo, se ha tomado especial cuidado, en la orientación y extensión de las secciones, que deben ser sensiblemente perpendiculares al flujo para que se cumplan los principios teóricos del cálculo unidimensional.

En definitiva, la ubicación de las secciones, además de la separación deseada, ha permitido una correcta caracterización de las irregularidades del cauce y llanuras de inundación (estrechamientos, ensanchamientos, cambios de sección o pendiente, etc.), ha permitido disponer de puntos de cálculo en los elementos de interés para la protección frente a avenidas y se ha basado en criterios hidráulicos en relación a una correcta representación del flujo.

### 9.4.4 Parámetros de cálculo

Para la correcta simulación del régimen hidráulico de una determinada avenida, una vez fijada la geometría del cauce y de las llanuras de inundación, así como de las distintas estructuras a considerar, es necesario adoptar valores coherentes y adecuados de los siguientes parámetros:

- Coeficientes de rugosidad (n) de Manning de cauce y llanuras.
- Coeficientes de expansión y contracción entre secciones.

Como ya se ha comentado anteriormente, el estudio hidráulico se llevará a cabo de dos formas distintas. La primera, consiste en tomar un valor de rugosidad o parámetro (n) de Manning habitual, directamente de las tablas empleadas para ello y sin tener en cuenta el transporte sólido. Por otro lado, el segundo caso, consiste en calcular y modelar el parámetro (n), considerando, ahora sí, dicho transporte, y obteniendo una idea más real y precisa del comportamiento natural del río. Es por ello, debido a la importancia de dicho parámetro, que se han analizado ambos procedimientos de manera separada, comenzando en este caso por el más clásico.

El coeficiente (n) de Manning, es un factor de rugosidad relativo al medio acuoso, el cual ha sido determinado experimentalmente y se encuentra incluido en la propia ecuación de Manning, aplicable a flujos turbulentos. Dicha ecuación, en términos del transporte (K), puede escribirse:

$$Q = K S_f^{1/2} = \frac{\delta}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde:

- Q: caudal de flujo.
- A: área transversal del flujo.
- R: radio hidráulico (A/P).
- P: perímetro mojado.
- Sf: pendiente de fricción.
- n: coeficiente de rugosidad de Manning.

- $\delta$ : depende del sistema de unidades usado (para el métrico es 1 y el inglés 1.49).

Esta ecuación, es el resultado de un proceso de ajuste de curvas, lo que la hace totalmente empírica en su naturaleza. Gracias a los resultados satisfactorios que presenta y a la simplicidad en su forma, es la fórmula más usada para cálculos de flujo en canales abiertos.

➤ Factores que afectan al coeficiente de Manning:

El coeficiente ( $n$ ) de Manning tiene valores muy variables, los cuales dependen de una serie de factores como:

- Rugosidad de la superficie:

Dependerá del tamaño y forma de los granos del material. Se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardante sobre el flujo. En general, los granos finos resultan en un valor relativamente bajo de ( $n$ ) y los granos gruesos dan lugar a un valor alto de ( $n$ ).

- Vegetación:

Puede ser vista como una clase de rugosidad superficial. Este efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación, y es muy importante en el diseño de canales pequeños de drenaje, ya que por lo común éstos no reciben mantenimiento regular.

- Irregularidad del canal:

Se refiere a las variaciones en las secciones transversales de los canales, su forma y su perímetro mojado a lo largo de su eje longitudinal. En general, un cambio gradual y uniforme en la sección transversal o en su tamaño y forma no produce efectos apreciables en el valor de ( $n$ ), pero cambios abruptos o alteraciones de secciones pequeñas y grandes requieren el uso de un valor grande de ( $n$ ).

- Alineamiento del canal:

Curvas suaves con radios grandes producirán valores de ( $n$ ) relativamente bajos, mientras que curvas bruscas con meandros severos incrementarán su valor.

- Sedimentación y erosión:

En general la sedimentación y erosión activa, dan variaciones al canal que ocasionan un incremento en el valor de ( $n$ ). Urquhart (1975) señaló que es importante considerar si estos dos procesos están activos y si es probable que permanezcan activos en el futuro.

- Obstrucción:

La presencia de obstrucciones tales como troncos de árbol, desechos de flujos, atascamientos, pueden tener un impacto significativo sobre el valor de ( $n$ ). El grado de los efectos de tales obstrucciones depende del número y tamaño de ellas.

➤ Determinación del coeficiente de rugosidad Manning:

Aplicando la fórmula Manning, la mayor dificultad reside en la determinación del coeficiente de rugosidad (n) ya que no hay un método exacto para definir dicho valor. La forma clásica de calcularlo, consiste en emplear una tabla tipo, como la mostrada a continuación, cuyos valores han sido tomados con una determinada correlación, en función de las características del cauce que se analice.

Tabla 9-3. Valores del parámetro (n) de Manning según el método clásico.

<b>Características del Cauce</b>	<b>Coeficiente (n)</b>
<i>Cunetas y canales sin revestir</i>	
En tierra ordinaria, superficie uniforme y lisa	0,020-0,025
En tierra con ligera vegetación	0,025-0,035
En tierra con vegetación espesa	0,035-0,045
En tierra excavada mecánicamente	0,040-0,050
En roca, superficie uniforme y lisa	0,028-0,033
En tierra con ligera vegetación	0,030-0,035
En roca, superficie con aristas e irregularidades	0,035-0,045
<i>Cunetas y canales revestidos</i>	
Hormigón	0,013-0,017
Hormigón revestido con gunita	0,016-0,022
Encachado	0,020-0,030
Paredes de hormigón, fondo de grava	0,017-0,020
Paredes encachadas, fondo de grava	0,023-0,033
Revestimiento bituminoso	0,013-0,016
<i>Corrientes naturales</i>	
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente	0,027-0,033
Ídem, pero con algo de vegetación	0,033-0,040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0,060-0,080
Ídem, pero con vegetación densa	0,100-0,200
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0,050-0,080
Áreas de inundación adyacentes al canal ordinario	0,030-0,200

Por otro lado, y pese a que la expresión de Manning antes mostrada, se formuló para casos de flujo permanente, se usa también en modelos hidráulicos para regímenes no permanentes. En flujos unidimensionales, los coeficientes de rugosidad abarcan, además de las pérdidas por fricción, las relacionadas con el grado de sinuosidad, la densidad, el tipo de vegetación, los cambios en forma y tamaño de la sección transversal, las irregularidades de su sección transversal, etc.

Entre los diferentes métodos con los que considerar las distintas variables, destaca el de Cowan, 1956, visto anteriormente y que se empleará más adelante, en el que se selecciona una (n) de Manning, tanto para el cauce como para las llanuras de inundación, que se modifica de acuerdo con las características del canal, siendo:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Tabla 9-4. Modificaciones para el parámetro (n) de Manning según el método de Cowan.

<b>Material considerado (n0)</b>			
<i>Tierra</i>	0,020	<i>Roca cortada</i>	0,025
<i>Grava Fina</i>	0,024	<i>Grava gruesa</i>	0,028
<b>Factor por grado de irregularidad o rugosidad (n1)</b>			
<i>Liso</i>	0,000	<i>Moderado</i>	0,010
<i>Menor</i>	0,005	<i>Severo</i>	0,020
<b>Factor por variaciones en la sección transversal del canal (n2)</b>			
<i>Gradual</i>	0,000	<i>Frecuente</i>	0,010-0,015
<i>Ocasional</i>	0,005	-	-
<b>Factor por efectos de obstrucciones (n3)</b>			
<i>Despreciable</i>	0,000	<i>Apreciable</i>	0,020-0,030
<i>Menor</i>	0,010-0,015	<i>Severo</i>	0,040-0,060
<b>Factor por vegetación (n4)</b>			
<i>Baja</i>	0,005-0,010	<i>Alta</i>	0,025-0,050
<i>Media</i>	0,010-0,025	<i>Muy alta</i>	0,050-0,100
<b>Factor por sinuosidad o cantidad de meandros (m5)</b>			
<i>Menor</i>	1,000	<i>Severa</i>	1,300
<i>Apreciable</i>	1,150	-	-

Paralelamente, debido a la presencia de arenas en la traza, el método se ha implementado con las modificaciones ofrecidas por Arcement y Scheneider (1987):

Tabla 9-5. Modificaciones para el parámetro (n) según Arcement y Scheneider (1987).

<b>n0</b>	
Arena Fina	0.0265
Arena Gruesa	0.0305
Arenas	0.0285

Los efectos derivados de la resistencia por vegetación son muy complejos de medir y no existe en general un modelo válido para predecirlos, debido a que dependen de una gran variedad de parámetros, como el grado de rigidez de la planta, su densidad, la morfología de las hojas, etc.

Aparte de esta ayuda, se encuentran en la literatura numerosas fórmulas para expresar el coeficiente de rugosidad de Manning en función del diámetro de las partículas, las cuales tienen la forma  $n = m \cdot D^{1/6}$ , donde (m) es un factor de escala y (D) es un diámetro característico del material del lecho, siendo ( $D_{50}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{90}$ ) respectivamente, los diámetros correspondientes al 50, 75, 84 y 90% de la curva granulométrica del material de fondo.

Para la zona de estudio, y en consonancia con los materiales localizados en la traza del río, se adoptaron los siguientes valores:

Tabla 9-6. Valores de (n0) para los materiales localizados en el tramo de estudio.

<b>Tipología</b>	<b>n0</b>
Arenas	0.0285
Gravas	0.026
Limos	0.02
Arcillas	0.02

Realizando una media entre cada uno de los materiales encontrados, se obtuvo, para la definición de (n0), un valor de 0,024 aproximadamente.

Realizado este análisis, se obtuvieron los números de Manning para cada tramo fluvial, recogidos en el “*Anexo A: Coeficientes de Manning*”. Para su determinación, se emplearon los visores cartográficos disponibles en el MAPAMA y REDIAM, así como los archivos ArcGIS procedentes del DERA. En el caso del cauce, se adoptó un valor de rugosidad general de 0,035, valor típico para ríos mediterráneos.

Los valores anteriores estimados de forma teórica pueden ser calibrados si se dispone de datos históricos relativos a niveles de inundación y caudales de paso en los cauces de estudio. A falta de esta información, en el presente trabajo se ha decidido adoptar los valores de la metodología propuesta.

Sin embargo, el efecto del arrastre de sólidos por fondo sí se ha tenido en cuenta a la hora de establecer el número de Manning en el cauce, cuando este fenómeno puede suponer un incremento apreciable en los calados. El procedimiento aplicado, se recoge en detalle en el “*Apartado 10.3 Coeficiente de rugosidad (n) de Manning*”.

Con respecto a los coeficientes de pérdida de carga por contracción y expansión entre secciones, se adoptan los siguientes valores en concordancia con las recomendaciones del Hydrologic Engineering Institute:

- Coeficiente de contracción entre secciones naturales: 0,1.
- Coeficiente de expansión entre secciones naturales: 0,3.
- Coeficiente de contracción a la entrada de una estructura: 0,3.
- Coeficiente de expansión a la salida de una estructura: 0,5.

#### 9.4.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno adoptadas para la simulación del tránsito de avenidas en los distintos cursos fluviales son, típicamente, la formación de régimen permanente en las secciones situadas aguas arriba y aguas abajo, para lo que habitualmente es necesario especificar la pendiente longitudinal del río en dichos puntos. En este caso, el valor adoptado para todo el cauce es del 0,177%, obtenido directamente del perfil longitudinal generado con el software ArcGIS.

Para los casos, como este, en los que el cauce desemboque directamente en el mar, la condición de contorno aguas abajo debe corresponder a un determinado nivel de agua en función de las mareas. En este sentido, dado que el régimen mareal posee un amplio espectro de presentación temporal, parece lógico emplear el valor máximo probable de entre el rango de variación posible, de modo que los resultados obtenidos se encuentren siempre del lado de la seguridad. Este nivel máximo, no es inmediato y requiere la realización de un análisis detallado que se presenta a continuación.

Según el “*Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español*”, la información relativa al mareógrafo de Málaga puede ser de utilidad para el establecimiento de las condiciones de contorno de los modelos hidráulicos.



Figura 9-3. Localización de la información instrumental de medida.

➤ Marea astronómica:

Pese a que los parámetros medios de la marea astronómica se mantienen prácticamente constantes, la marea sí varía considerablemente a lo largo del año, por lo que resulta conveniente conocer el máximo que este valor puede alcanzar en este periodo, valor conocido como Marea Viva Equinoccial (MVE), y que se produce cuando Luna, Sol y Tierra están alineados (marea viva) y en las proximidades de uno de los dos equinoccios. Cada año, se registran dos mareas máximas, o vivas equinociales, las cuales deben ser analizadas en profundidad para conseguir un correcto conocimiento de la variabilidad de los valores máximos de la marea.

Los valores de PMVE y BMVE, analizados sobre un ciclo lunar, definen los niveles máximo y mínimo que puede presentar el mar en la zona como consecuencia de la marea astronómica (sin considerar variaciones en la presión atmosférica).

En la siguiente figura, se presentan los resultados relativos a la marea astronómica de Málaga en doble formato: función de distribución (probabilidad acumulada) y número de horas al año que se supera una cota dada. La relación entre ambos se establece de la siguiente manera:

$$N = 8760 (1-F)$$

Siendo 8760, el número de horas del año, (N), el número de horas al año que se supera la cota dada y (F), la probabilidad acumulada.

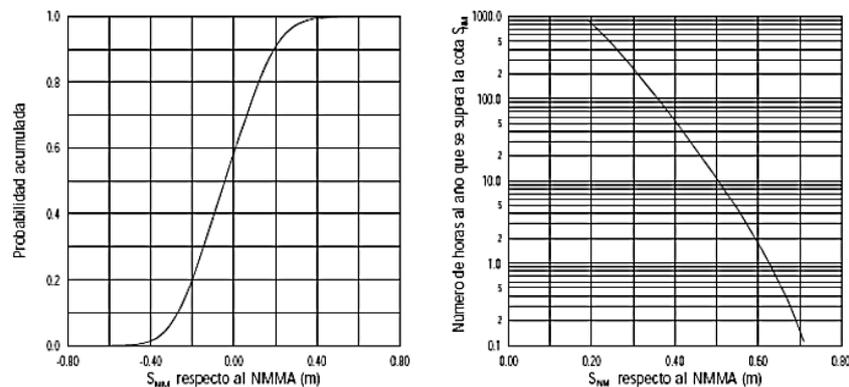


Figura 9-4. régimen medio del nivel de marea.

Según la Tabla 3.4.2.1.1 de las recomendaciones ROM 0.2-90 “Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias” los valores característicos del nivel medio del mar y de la carrera de marea del Puerto de Málaga son 0,5 m y 0,8 m respectivamente.

Por otro lado, en el “Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español”, se indican los siguientes valores para el mareógrafo de Málaga:

- PVME: +0,164 m.
- Carrera de marea: +0,82 m.
- Nivel Medio del Mar en Alicante: + 0,437.
- Nivel Medio del Mar respecto al 0 del mareógrafo: +0,574 m.
- Situación del mareógrafo respecto al nivel medio del mar de Alicante: -0,6 m.

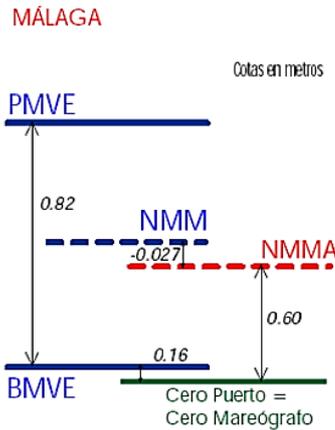


Figura 9-5. Niveles de referencia.

Teniendo en cuenta que la PMVE en el puerto de Málaga es de 0,82 y la NMMA es de 0,437, la cota absoluta de la PMVE se sitúa en la +0,38.

➤ Mareas meteorológicas:

Uno de los factores que puede provocar importantes cambios en el nivel del mar son las variaciones barométricas. En efecto, una disminución de la presión atmosférica sobre la superficie del mar provoca un ascenso del nivel de éste, mientras que un aumento de dicha presión se traduce en un descenso del nivel del mar. Una estimación de dicha variación motivada por la presencia de un frente de bajas presiones (borrasca) o de altas presiones (anticiclón) viene dada por la siguiente expresión (Storm surge and currents. Bretschneider, 1982):

$$S_{vp} = 10,26(p_e - p_o) \left( 1 - \exp\left(-\frac{R}{r}\right) \right)$$

Siendo:

- $S_{vp}$ , la variación del nivel medio del mar (metros).
- $p_e$ , la presión atmosférica en la periferia de la perturbación atmosférica (bares).
- $p_o$ , la presión atmosférica en el centro de la perturbación (bares).
- $R$ , el radio de la perturbación (kilómetros).
- $r$ , la distancia entre el punto de medida y el centro de la perturbación (kilómetros).

Una vez procesados los datos de presión atmosférica registrados durante el período 1987-1993, se realizó un estudio estadístico de los valores mínimos y máximos mensuales, obteniéndose las funciones de distribución extremal:

Tabla 9-7. Funciones de distribución extremal de presión atmosférica.

T (años)	P. máx. (mbar)	P. mín. (mbar)
10	1040	990
50	1050	978
100	1055	972

Supuesto un radio de la perturbación de 1000 km y una presión en el borde de 1,013 bar, en el centro de la perturbación se observarían las siguientes variaciones:

Tabla 9-8. Variaciones en el centro de la perturbación.

T (años)	Descenso (m)	Ascenso (m)
10	0,28	0,24
50	0,38	0,36
100	0,43	0,42

Estos resultados, son coherentes con el valor del máximo ascenso del nivel del mar por marea meteorológica incluido en la tabla 3.4.2.1.1 de la ROM 0.2-90 “Acciones en el proyecto de Obras marítimas y portuarias” para condiciones extremas y mar con marea astronómica, y que resulta ser de 0,5 metros. Por lo tanto, el máximo nivel alcanzable por las aguas por coincidencia en el mismo instante de la PMVE y del máximo ascenso debido a la marea meteorológica sería de +0,88 m.

Sin embargo, no resulta razonable adoptar un valor tan extremo, asociado a una probabilidad de ocurrencia muy baja, ya que tanto la marea meteorológica como la astronómica son sucesos independientes en los que la probabilidad de presentación debe multiplicarse. Por lo tanto, es necesario analizar la probabilidad conjunta de ambos fenómenos para disponer de un criterio objetivo a la hora de adoptar un determinado nivel.

➤ Estudio de la probabilidad combinada:

En un instante cualquiera de tiempo t, el nivel del mar X(t) se puede expresar, una vez eliminado el oleaje, como suma de tres componentes:

$$X(t) = Z_0(t) + M(t) + R(t)$$

Siendo:

- $Z_0(t)$ : nivel medio del mar, que varía muy lentamente con el tiempo.
- $M(t)$ : variaciones periódicas o marea propiamente dicha.
- $R(t)$ : componente residual o meteorológica que es, en cambio, irregular.

Cada una de estas componentes, está condicionada por procesos físicos diferentes, esencialmente independientes. Sin embargo, si se dispone de una serie larga de observaciones, se puede efectuar un análisis estadístico de las mismas. En el caso del mareógrafo de Málaga, se eligió presentar los resultados correspondientes en papel probabilístico Gumbel de máximos y en una doble escala: probabilidad acumulada y período de retorno, siendo la relación entre ambas escalas:

$$R = 1/(1-F)$$

Donde (R), el período de retorno en años y (F), es la probabilidad acumulada.

Igualmente, se obtuvieron las bandas de confianza del 90%.

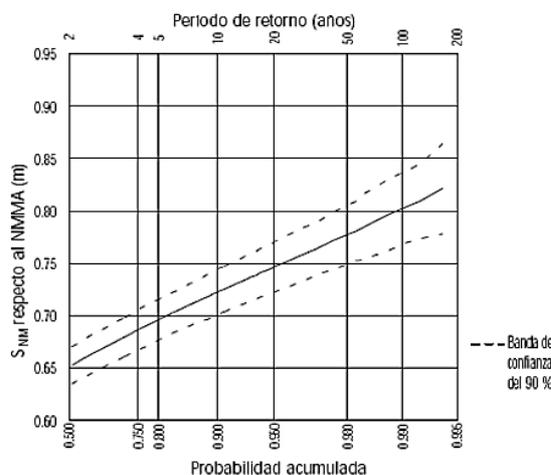


Figura 9-6. Régimen extremal de nivel de marea.

Teniendo en cuenta la gráfica anterior se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 9-9. Cotas del nivel del mar (m) por periodos de retorno.

<b>T (años)</b>	<b>Nivel del mar (m)</b>
10	0,72
50	0,77
100	0,80

## 9.5 Resultados

### 9.5.1 Variables hidráulicas

En el “*Anexo B: Resultados HEC-RAS*”, se recogen, para cada una de las secciones y periodos de retorno de cálculo, las siguientes variables representativas del régimen hidráulico, obtenidas de la simulación mediante HEC-RAS:

- Caudal.
- Cota de lámina.
- Velocidad del flujo.
- Calado máximo.
- Cota de energía.
- Número de Froude.

### 9.5.2 Delimitación de zonas inundables

En el “*Apartado 11: Estudio comparativo y conclusiones*”, se muestran las manchas de inundación asociadas a las avenidas correspondientes a 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. Además, se incluye en el mismo, una breve descripción de las afecciones más significantes.

# 10 ESTUDIO HIDRÁULICO 2. MODELADO CON (N) DE MANNING MODIFICADO

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.*

*- Isaac Asimov -*

## 10.1 Introducción

El objetivo principal de este apartado, es la demostración del efecto que el transporte de sedimentos provoca sobre los estudios hidráulico y de inundación de un cauce, a través de la rugosidad. Para ello, se repetirá el modelado anterior, manteniendo algunos parámetros y modificando otros:

➤ Parámetros comunes:

En lo que respecta al ámbito de estudio, no se realizan modificaciones de ningún tipo. Se analizará nuevamente el tramo final del Guadalhorce bajo, concretamente entre el municipio de Pizarra y su desembocadura en la costa de Málaga.

Los parámetros hidrológicos, siguen siendo los mismos que en el modelo anterior, a saber:

Tabla 10-1. Caudales de cálculo (m<sup>3</sup>/s) por periodos de retorno.

Nº Sección	T = 10 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 500 años
1 (351)	656.2	947.0	1815.7	2141.0
68 (283)	1225.5	1953.3	3057.9	4004.8
264 (87)	1512.1	2497.7	3974.2	4947.1

Con respecto a la hidráulica del modelo, se emplea nuevamente la misma base cartográfica anterior con un MDT25 y el software de cálculo HEC-GEORAS 4.1.1, nuevamente con un ancho de 1 kilómetro de longitud y una distancia media de separación de 100 metros, lo que hacía un total de 351 secciones.

Las condiciones de contorno, continúan fijadas por una pendiente del 0,177% aguas arriba y por el efecto de las mareas, en la zona de aguas abajo (desembocadura), tal y como se ha visto en el apartado anterior.

Por último, con respecto a los coeficientes de expansión y contracción entre secciones, se han adoptado nuevamente siguiendo las recomendaciones del Hydrologic Engineering Institute.

➤ Parámetros modificados:

Como ya se ha comentado en repetidas ocasiones, la mayor variación entre el Estudio Hidráulico 1 y el Estudio Hidráulico 2 reside en la variabilidad del parámetro de rugosidad (n) de Manning, debido al efecto derivado del transporte de sedimentos en el cauce. Antes de evaluar cómo de grande es dicha variación, se ha querido llevar a cabo un análisis cuantificativo sobre el caudal de transporte sólido generado en el río Guadalhorce, para entender aún mejor la importancia de éste en el estudio, y la esencia del mismo.

## 10.2 Transporte de sedimentos. Modelización del río Guadalhorce aguas abajo de los embalses

### 10.2.1 Introducción

A continuación, se realizará el análisis del flujo de sedimentos del sistema fluvial en la zona del bajo Guadalhorce, de modo que constituya una parte fundamental en la visión morfodinámica global del río.

Los ríos realizan tres tipos de labores geológicas muy estrechamente interrelacionadas: erosión, transporte y deposición fluvial. Estas funciones, no pueden separarse unas de otras, ya que cuando se produce erosión, debe existir algo de transporte, y finalmente las partículas transportadas deben acabar inmovilizándose.

➤ Erosión fluvial:

Se define como la progresiva extracción de materia mineral de las superficies de un cauce fluvial, que puede estar constituido por roca firme o regolita.

La naturaleza de la erosión fluvial depende principalmente de los materiales que constituyen el cauce del río y de los medios de erosión que este contenga. Unos de los medios más simples, es la acción hidráulica, es decir, la presión y empuje que el agua en movimiento ejerce sobre los granos que sobresalen del lecho y de las márgenes.

➤ Transporte fluvial:

Se define como el movimiento de partículas erosionadas en disolución química, en suspensión turbulenta o por rodamiento o arrastre a lo largo del lecho.

Se pueden distinguir tres formas de transporte fluvial de materia mineral. En primer lugar, la disolución proporciona sólidos disueltos, que pueden viajar indefinidamente río abajo y pueden llegar al océano. No afectan al comportamiento mecánico del río.

En segundo lugar, partículas de arcilla, limo y, a veces, arena fina son transportadas en suspensión. En esta forma de transporte, las corrientes ascendentes de los remolinos del flujo turbulento son capaces de mantener las partículas indefinidamente en el cuerpo de la corriente. El material transportado en suspensión, se denomina carga en suspensión y constituye una gran parte de la carga total de la mayoría de ríos.

Los comportamientos frente a este fenómeno son muy diversos, así, por ejemplo, las partículas de arcilla, una vez elevadas en suspensión, son tan fácilmente transportadas que recorren grandes distancias; las partículas coloidales más finas permanecen en suspensión hasta que alcanzan el océano; los limos se decantan rápidamente cuando la turbulencia se reduce y las arenas gruesas, raramente son transportadas en suspensión excepto durante las crecidas. Como resultado, la suspensión proporciona un medio de separación de partículas sólidas de diversos tamaños a una ubicación distinta, proceso conocido como clasificación.

La tercera forma de transporte es la rodadura o el deslizamiento de granos a lo largo del lecho del río. Estos movimientos de arrastre pueden incluirse adecuadamente en el término tracción, que resuelta tanto de la presión directa del flujo del agua sobre la cara que mira río arriba de un grano como de la acción de arrastre del agua en su fluir por encima de la superficie del mismo. Los fragmentos movidos por tracción se denominan colectivamente carga de fondo del río. En el movimiento de la carga de fondo, las partículas individuales ruedan, se deslizan o realizan pequeños saltos río abajo, descansando luego entre otros granos. La saltación de granos es relativamente poco importante en el movimiento de la carga de fondo de un río, pero es el proceso de transporte dominante de granos de arena por el viento.

En el tramo de estudio analizado, bajo Guadalhorce, básicamente se produce un transporte de sólidos por fondo, ya que se trata de ríos de grava. Tan solo en las partes correspondientes a las desembocaduras, se da en el lecho material más arenoso, tamizando el cuerpo deltaico formado por gravas procedentes de los tramos de aguas arriba.

➤ Deposición fluvial:

Se define como la acumulación de cualquier partícula transportada sobre el lecho del río, sobre la llanura de inundación adyacente, o en el fondo de un cuerpo estable de agua en el que desemboca el río.

### 10.2.2 Formulación utilizada. Transporte por fondo

Dado que el fin último de este trabajo, es la evaluación de la influencia que el transporte de sólidos puede tener sobre la rugosidad del río, afectando así, al estudio de inundaciones del mismo, se precisa un método de cálculo efectivo para la cuantificación de dicho transporte.

Durante muchos años, la única manera de evaluarlos, era por medio de fórmulas empíricas. Quizás, la más conocida y más empleada es la fórmula de Meyer-Peter-Müller (1948), obtenida, como ya se indicó en el “*Apartado 3.1: Fórmulas experimentales para el transporte de material de fondo*”, tras recabar una gran cantidad de datos experimentales. Se utiliza cuando el material es granular y abarca, desde arenas con diámetro mayor de 0.0002m, hasta gravas gruesas con diámetro menor o igual de 0.03m. Originariamente la fórmula era:

$$\frac{q_b}{[g(s-1)]^{1/2} * D^{3/2}} = 8 \left[ \frac{\tau_{oc} \left( \frac{f_c}{f'c} \right)^{3/4}}{\rho g (s-1) D} - 0,047 \right]^{3/2}$$

Donde 0.047 es un valor del parámetro de Shields, ( $\psi$ ), para el inicio del movimiento.

Esta ecuación se puede transformar en la siguiente:

$$\frac{q_b}{[g(s-1)]^{1/2} * D^{3/2}} \approx 8[\psi' - \psi_c]^{3/2}$$

Donde ( $\psi'$ ) es el parámetro de Shields de grano. El denominador en el lado izquierdo de la ecuación, puede escribirse como el producto de una escala de velocidades por una escala de longitud, en este caso el diámetro del grano (D):

$$u_{es} = [g(s-1)D]^{1/2}$$

### 10.2.3 Metodología de cálculo

En este apartado, se expone la metodología propuesta para la estimación del transporte sólido aportado por el cauce. Dicha metodología, es la empleada en el proyecto llevado a cabo para la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y anteriormente mencionado “Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y para la ordenación de la cuenca del río Guadalhorce”.

En primer lugar, hay que destacar, que en este estudio sólo se estimará el material transportado en el cauce (sin incluir llanuras ya vegetadas) ni el material de lavado procedente de la cuenca hidrográfica.

Normalmente, es necesario calcular el volumen medio anual que transporta un río en un determinado punto. Sin embargo, muchas veces este dato es difícilmente estimable al carecer de datos de campo que puedan compararse con los resultados teóricos o empíricos ni con los que calibrar los modelos utilizados. Además, hay que tener en cuenta que, en la mayoría de los ríos mediterráneos, el aporte de material es totalmente irregular en el tiempo, oscilando años secos con años húmedos, con lo que dicho aporte pasa a ser esporádico en épocas de crecidas.

Aun así, se propone una metodología general para el cálculo del transporte sólido de un río basada en el estudio del transporte del río Besos de J. P. Martín Vide y Marcelo H. García (1999), pero con algunas adaptaciones y modificaciones.

Para ello, se plantea un algoritmo tal que, a partir de la tramificación del río, contenga una variable que dé continuidad al modelo en cuanto al transporte de material. Para entender mejor el proceso, se muestra el siguiente esquema:

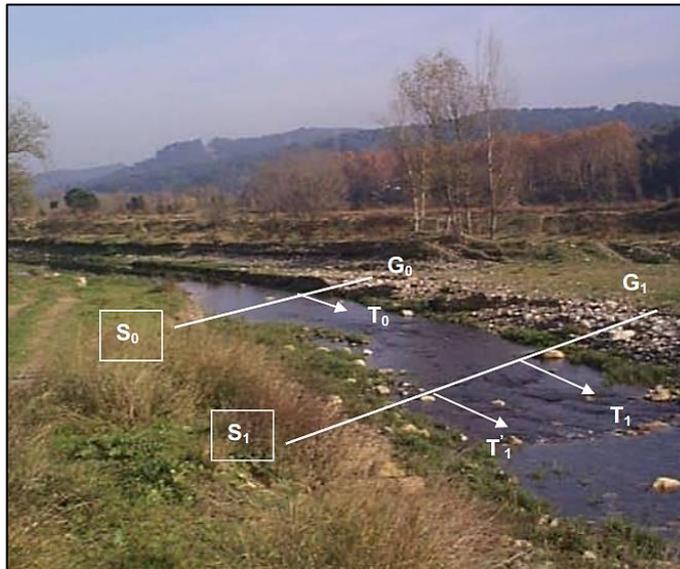


Figura 10-1. Esquema para el cálculo del transporte de sedimentos en el río Guadalhorce.

Donde:

- S0: sección aguas arriba.
- S1: sección aguas abajo.
- G0: granulometría asociada a la sección (S0).
- G1: granulometría asociada a la sección (S1).
- T0: transporte sólido en la sección (S0).
- T1: transporte sólido en la sección (S1).
- T'1: transporte sólido en la sección (S1), pero con la granulometría (G0).

Con todo ello, se plantea el algoritmo de cálculo antes mencionado, con el siguiente esquema metodológico:

Los casos posibles de comparación son 6. El análisis puede hacerse para cada fracción de material (j).

- 1)  $T_0 < T'1 < T_1$ . En este caso, llega poco volumen sólido, menos de lo que el río puede transportar tratándose de esa misma granulometría hacia aguas abajo y menos también de lo que el río puede tomar de su lecho. Como consecuencia de la primera parte de la desigualdad, el transporte real sería la disponibilidad  $T_0$ , pero, además, la corriente tendría todavía una capacidad “no satisfecha” o remanente, de valor  $(T_1 - T_0)$ , que se emplearía en tomar material del lecho hasta un límite lógico de erosión del cauce. Nótese que no tiene sentido una capacidad remanente en relación a  $T'1$  porque una vez transportado todo lo que llega (todo  $T_0$ ), el material susceptible de incrementar el transporte tiene la granulometría del lecho. En resumen, la salida  $S$  de material es:

$$S = T_0 + (T_1 - T_0)'$$

Donde (') indica un límite máximo a la erosión del cauce.

- 2)  $T_0 < T_1 < T'1$ . En este caso, se invierte la relación entre las capacidades, pero se puede seguir el mismo razonamiento anterior. De nuevo, habría una erosión en el cauce hasta un cierto límite.
- 3)  $T_1 < T'1 < T_0$ . En este caso, llega un gran volumen de sedimento, mayor que cualquiera de las dos capacidades. Por ser este volumen mayor de lo que el río puede transportar de esa misma granulometría, en principio sale solamente  $T'1$ . La salida por tanto es:  $S = T'1$ . El cauce debe sufrir acreción.
- 4)  $T'1 < T_1 < T_0$ . En este caso, al igual que el anterior, en principio la salida sería solamente  $T'1$ . Sin embargo, a pesar de que no todo el material recibido se transporta, queda una capacidad remanente cuyo valor es  $(T_1 - T'1)$ , con la cual, el límite lógico de erosión del cauce la salida es:

$$S = T'1 + (T_1 - T'1)'$$

Si no se alcanza el límite de erosión, resulta:  $S = T_1$ .

Es interesante observar, que en los casos 3 y 4, si no se supera el límite de erosión, se pueden resumirse en la expresión  $S = \text{máximo}(T_1, T'1)$  y en ambos casos hay acreción del cauce.

- 5)  $T_1 < T_0 < T'1$ . En este caso, el río podría transportar en esa misma granulometría más de lo que llega, o lo que sale en principio, como en los casos 1 y 2. Sin embargo, a diferencia de estos, no se produce capacidad remanente alguna, luego:

$$S = T_0.$$

No hay erosión ni acreción del cauce.

- 6)  $T'1 < T_0 < T_1$ . En este último caso, la capacidad en la misma granulometría pasa a controlar el transporte real, por lo que, en principio saldría  $T'1$ . Queda, sin embargo, un exceso de capacidad de transporte de valor  $(T_1 - T'1)$ , por lo que la salida es:

$$S = T'1 + (T_1 - T'1)'$$

A esta expresión puede aplicarse la misma simplificación que a la del caso 4.

Obsérvese la coherencia de los algoritmos de los seis casos por medio de las siguientes situaciones particulares, en los límites entre un caso y otro:

- Si  $T_0 = T'1 < T_1$ , es aplicable por igual el caso 1 y el caso 6. Comprobamos que efectivamente las expresiones se vuelven iguales pues  $T_0 = T'1$ .
- Si  $T_0 = T_1 < T'1$ , es aplicable por igual el caso 2 y el 5. Comprobamos que las expresiones se vuelven iguales, pues el paréntesis de la primera se hace nulo.
- Si  $T_1 < T_0 = T'1$ , es aplicable por igual el caso 3 y el 5.
- Si  $T'1 < T_0 = T_1$ , es aplicable por igual el caso 4 y 6.

Puede verificarse, que la discusión de casos anterior quedaría reducida a una expresión única:

$$S = \alpha 1 + (T_1 - \alpha 1)'$$

#### 10.2.4 Aplicación del modelo de transporte sólido al río Guadalhorce

- ❖ División en tramos homogéneos:

Para llevar a cabo el estudio, se realizó una división del río en varios tramos, lo más homogéneamente posible, en cuanto a condiciones hidráulicas y granulométricas se refiere, eligiendo una sección representativa del tramo para la estimación del caudal sólido.

Continuando con el punto anterior, el río Guadalhorce aguas abajo de los embalses (tramo modelizado hidráulicamente) fue dividido en ocho tramos, considerados (a efectos de transporte sólido y de comportamiento sedimentario) como homogéneos, es decir, todo un mismo tramo se comporta de una misma forma ante el flujo de sólidos del río y tiene una misma tendencia sedimentaria (erosión o acreción).

Así pues, los tramos elegidos presentaban variables tanto hidráulicas como sedimentarias parecidas (caudal líquido aproximadamente homogéneo, o sin grandes variaciones; pendiente hidráulica similar; granulometría más o menos uniforme, etc.). Dentro de cada tramo, a su vez, se eligió una sección representativa del mismo, de donde obtener los datos hidráulicos, los cuales formarían parte (junto con los datos granulométricos y morfológicos) de los “inputs” del modelo de transporte sólido.

Cabe comentar que el tramo 0, situado a pie de las presas, funcionaba como alimentador principal del sistema dada la retención de sedimentos que acontece en los embalses, por lo que no se evaluó su tendencia evolutiva morfodinámica.

En la siguiente figura se pueden observar los tramos en los que se dividió el río Guadalhorce para la estimación del transporte sólido:

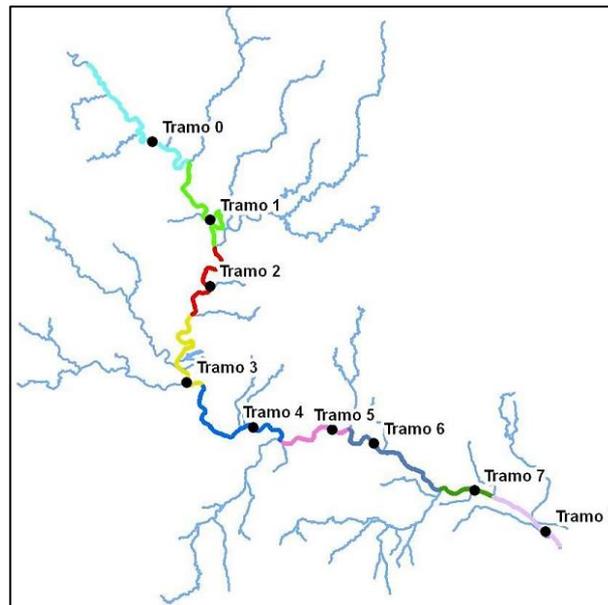


Figura 10-2. División de tramos para el estudio del transporte de sedimentos en el río Guadalhorce.

Es importante remarcar, que el tramo de estudio real correspondiente al presente trabajo, comprendería desde el tramo 4 al tramo 8 del esquema anterior. Se ha decidido dejar el resto de tramos, para acentuar aún más la importancia del transporte de sedimentos en el presente estudio y que es evidente a lo largo de toda la traza del río.

❖ Resultados del transporte sólido:

Con todo ello, los resultados obtenidos para el transporte sólido fueron los siguientes:

➤ Tramo 0 (Sección inicial)

Este tramo aportaba un volumen medio anual de 16.703 Tn, o sea 8.352 m<sup>3</sup> aproximadamente.

➤ Transporte sólido del tramo 1

Aplicando el algoritmo de cálculo, se obtuvieron los siguientes resultados:

- T<sub>0</sub> = 16.703 Tn.
- T<sub>1</sub> = 122.106 Tn
- T'1 = 120.473 Tn

Por tanto, en este tramo, estaríamos en el caso 1, donde  $T_1 > T'1 > T_0$ , por lo que se trata de un tramo en erosión y la salida de sedimentos del mismo es  $S = T_0 + (T_1 - T_0)' = 122.105$  Tn, o sea, 61.053 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 2

Para este tramo se obtuvieron los siguientes resultados:

- T<sub>0</sub> = 122.105 Tn.
- T<sub>1</sub> = 89.619 Tn
- T'1 = 103.986 Tn

En este tramo, estaríamos en el caso 3, donde  $T_0 > T'1 > T_1$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en acreción y la salida de sedimentos del mismo es  $S = T'1 = 103.986$  Tn, o sea, 51.993 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 3

En este tramo los resultados fueron los siguientes:

- $T_0 = 103.986 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 23.711 \text{ Tn}$
- $T'1 = 25.057 \text{ Tn}$

Nuevamente, nos encontraríamos en el caso 3 del algoritmo de cálculo, donde  $T_0 > T'1 > T_1$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en acreción y la salida de sedimentos es  $S = T'1 = 25.057 \text{ Tn}$ , o sea, 12.258 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 4

En este tramo los resultados fueron los siguientes:

- $T_0 = 25.057 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 13.915 \text{ Tn}$
- $T'1 = 12.061 \text{ Tn}$

En este tramo, estaríamos en el caso 4, donde  $T_0 > T_1 > T'1$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en acreción y la salida de sedimentos es  $S = T_1 = 13.915 \text{ Tn}$ , o sea, 6.958 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 5

En este tramo se dieron los siguientes resultados:

- $T_0 = 13.915 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 32.872 \text{ Tn}$
- $T'1 = 36.192 \text{ Tn}$

Para este tramo, estaríamos en el caso 2 del algoritmo de cálculo, donde  $T'1 > T_1 > T_0$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en erosión y la salida de sedimentos es  $S = T_0 + (T'1 - T_0) = 36.192 \text{ Tn}$ , o sea, 18.096 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 6

En este tramo se dieron los siguientes resultados:

- $T_0 = 36.192 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 383.356 \text{ Tn}$
- $T'1 = 322.664 \text{ Tn}$

Encontrándonos en el caso 1 del algoritmo de cálculo, donde  $T_1 > T'1 > T_0$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en erosión y la salida de sedimentos es  $S = T_0 + (T_1 - T_0) = 383.356 \text{ Tn}$ , o sea, 191.678 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 7

En este tramo se dieron los siguientes resultados:

- $T_0 = 383.356 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 94.585 \text{ Tn}$
- $T'1 = 113.117 \text{ Tn}$

En este tramo, estaríamos en el caso 3 del algoritmo de cálculo, donde  $T_0 > T'1 > T_1$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en acreción y la salida de sedimentos del mismo es  $S = T'1 = 113.117 \text{ Tn}$ , o sea, 56.558 m<sup>3</sup>.

➤ Transporte sólido del tramo 8

En este tramo se obtuvieron los siguientes resultados:

- $T_0 = 113.117 \text{ Tn.}$
- $T_1 = 4.140 \text{ Tn}$
- $T'1 = 22.122 \text{ Tn}$

Encontrándonos nuevamente en el caso 3 del algoritmo de cálculo, donde  $T_0 > T'1 > T_1$ . Por tanto, es un tramo que se encuentra en acreción y la salida de sedimentos del mismo es  $S = T'1 = 22.122 \text{ Tn}$ , o sea,  $11.056 \text{ m}^3$ .

❖ **Conclusiones del transporte sólido:**

En general, la tendencia morfodinámica de sedimentación es la dominante en la mayor parte de la longitud estudiada, si bien existe una zona intermedia alrededor de Cártama (tramos 5 y 6), en el que la erosión es significativa como consecuencia de un incremento de la pendiente media y granulometrías más finas.

El río Guadalhorce, desemboca en un delta no demasiado marcado, lo que resulta coherente con la tasa de sedimentación no excesivamente elevada del tramo final. A este efecto, contribuye sin duda la existencia de una importante regulación en cabecera.

Con respecto a los tramos relativos a la zona de estudio, se tiene que:

Tabla 10-2. Resumen del transporte de sedimentos en los tramos de estudio.

<b>Tramo</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Transporte (m3)</b>
4	9,297	6,958
5	5,405	18,096
6	8,541	191,678
7	3,838	56,558
8	5,405	11,056

Como puede apreciarse, el volumen de sedimentos transportando es considerable, sobre todo en los tramos 6 y 7. Estos resultados, ponen claramente de manifiesto, la enorme importancia que el transporte de sedimentos puede tener en el comportamiento hidráulico y morfodinámico de un río. Las consecuencias derivadas de ello, se analizarán en el siguiente punto, donde, como se anunció al comienzo de este trabajo, existe una estrecha relación entre el transporte sólido y el parámetro de rugosidad ( $n$ ) de Manning.

Por último y a modo de resumen, se presentan los siguientes gráficos, donde puede observarse, por un lado, la salida del material (en volumen) y por otro, la tendencia sedimentaria del sistema, en función de cada uno de los tramos.

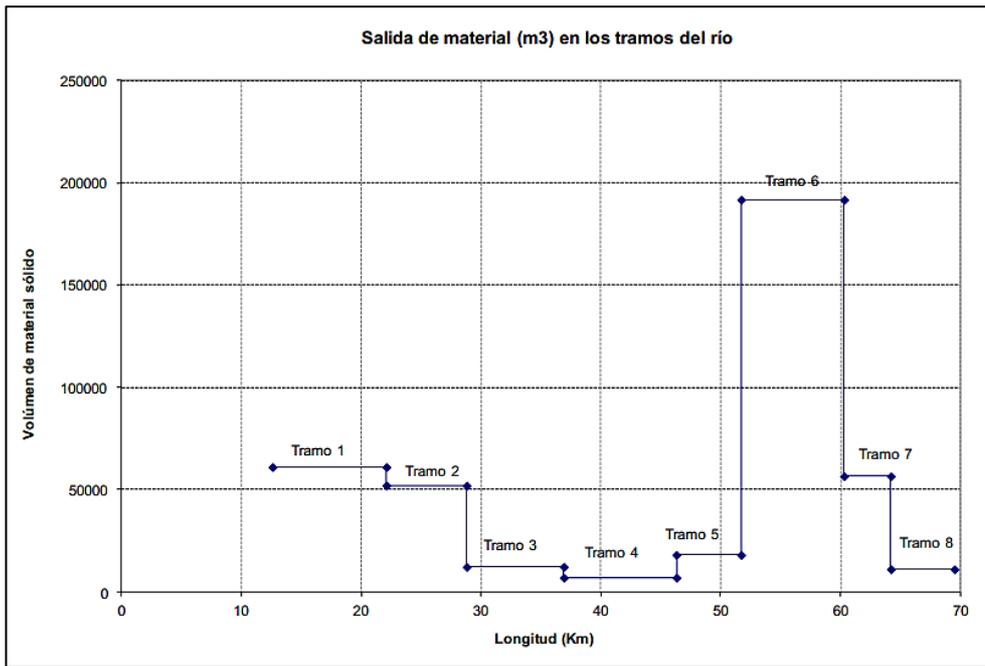


Figura 10-3. Salida del material (m3) en los tramos del río.

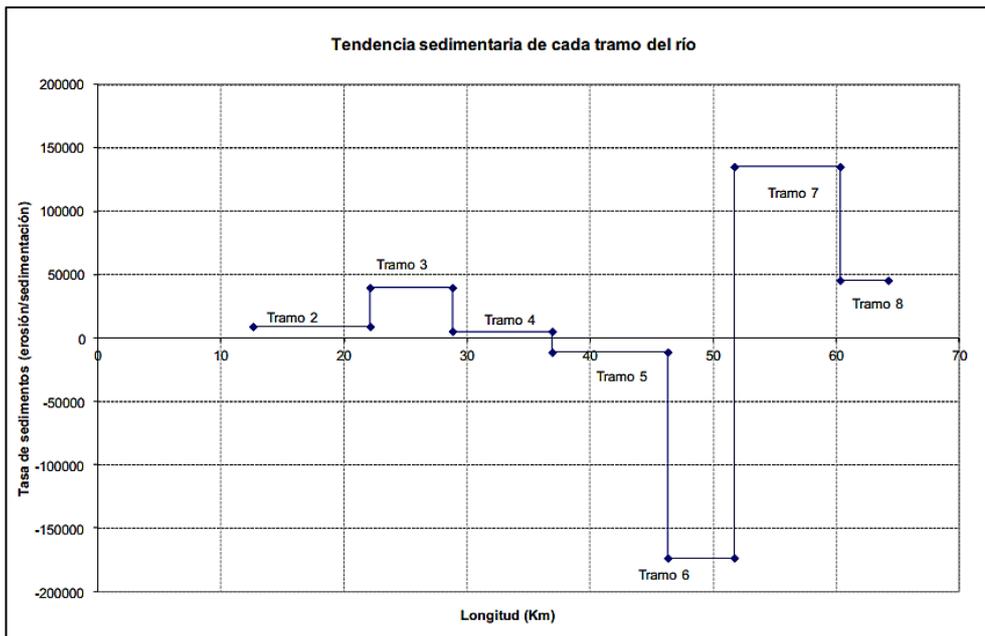


Figura 10-4. Tendencia sedimentaria de cada tramo del río.

### 10.3 Coeficiente de rugosidad (n) de Manning

Como ya se ha comentado en varias ocasiones y se ha explicado en el apartado anterior, para la estimación de los números de Manning del cauce y de las llanuras de inundación, se propone el empleo de la formulación de Cowan (1956), que permite una estimación objetiva del mismo a partir de las variables que lo caracterizan: material, vegetación, obstrucciones, etc. mediante la siguiente expresión:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Sin embargo, en este caso y para tener en cuenta el efecto que un arrastre masivo de sólidos puede tener sobre los niveles de inundación, se plantea efectuar una corrección, únicamente en la zona relativa al cauce, del valor básico ( $n_0$ ) asociado al material del lecho a partir del valor del número de Froude de la siguiente forma:

Tabla 10-3. Corrección del valor  $n_0$ .

Material	$n_0$	Factor corrector
Tierra	0,020	Si $Fr < 1,4 \rightarrow$ Coef = 1
		Si $Fr \geq 1,4 \rightarrow$ Coef = $0,2881*Fr^2 - 0,444*Fr + 1,12$
Grava fina	0,024	Si $Fr < 1,6 \rightarrow$ Coef = 1
		Si $Fr \geq 1,6 \rightarrow$ Coef = $0,2548*Fr^2 - 0,603*Fr + 1,37$
Grava gruesa	0,028	Si $Fr < 1,9 \rightarrow$ Coef = 1
		Si $Fr \geq 1,9 \rightarrow$ Coef = $0,2538*Fr^2 - 0,715*Fr + 1,50$
Roca cortada	0,025	Coef = 1

Para las llanuras de inundación de ambos márgenes, los coeficientes de Manning serían los mismos que para el Estudio Hidráulico 1.

Con todo ello, la metodología propuesta para este estudio sería, por tanto, la siguiente:

- I. Estimar el número de Manning sin tener en cuenta el efecto del transporte sólido a partir de la expresión de Cowan (Estudio Hidráulico 1).
- II. Obtener el número de Froude en agua clara para cada tramo homogéneo del modelo mediante el software HEC-RAS.
- III. Efectuar la corrección del ( $n_0$ ) a partir de los umbrales de ( $Fr$ ) establecidos y según las expresiones matemáticas calculadas para cada tipo de material. Para nuestra zona de estudio, y para la tipología geológica localizada en la traza, se ha adoptado un coeficiente ( $n_0$ ) de 0,024.
- IV. Repetir los cálculos hidráulicos con HEC-RAS con los nuevos coeficientes de rugosidad, que en, este caso, tendrán en cuenta el efecto de mayoración de niveles de inundación que lleva asociado el arrastre por fondo.

Con este procedimiento, se pretende evitar en lo posible la infravaloración de niveles de inundación asociada a los cálculos de “agua clara”, en una zona de estudio que tiene un carácter asociado al transporte sólido, sobre todo en grandes avenidas.

Realizado este análisis, se obtuvieron los nuevos números de Manning para cada tramo fluvial, recogidos también en el “*Anexo A: Coeficientes de Manning*”.

## 10.4 Resultados

### 10.4.1 Variables hidráulicas

En el “*Anexo B: Resultados HEC-RAS*”, se recogen, para cada una de las secciones y periodos de retorno de cálculo, las siguientes variables representativas del régimen hidráulico, obtenidas de la simulación mediante HEC-RAS:

- Caudal.
- Cota de lámina.
- Velocidad del flujo.
- Calado máximo.
- Cota de energía.
- Número de Froude.

### 10.4.2 Delimitación de zonas inundables

En el “*Apartado 11: Estudio comparativo y conclusiones*”, se muestran las manchas de inundación asociadas a las avenidas correspondientes a 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. Además, se incluyen en el mismo, una breve descripción de las afecciones más significantes.

# 11 ESTUDIO COMPARATIVO

*Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo.*

*- Albert Einstein -*

Finalmente, en este apartado, se realizará un estudio comparativo de todo el trabajo, analizando las variables más importantes que caracterizan cada modelo, como el coeficiente de rugosidad ( $n$ ) de Manning y las variaciones de calado y velocidad experimentadas.

Además, se observarán con detalle las manchas de inundación obtenidas para cada estudio, evaluando algunas zonas donde la variación es más apreciable, afectando así a un mayor número de viviendas, zonas de cultivo e incluso áreas industriales.

## 11.1 Variaciones en los coeficientes de Manning

Como ya se ha explicado en los dos puntos anteriores, el método de cálculo para la definición de estos coeficientes ha sido distinto. En el Estudio Hidráulico 1, se ha seguido el método de Cowan para las llanuras de inundación, mientras que, para el cauce, se ha tomado directamente 0,035, valor típico de cauces mediterráneos. Por su parte, en el Estudio Hidráulico 2 y únicamente para el cauce, se ha realizado una rectificación del parámetro ( $n$ ), a través del número de Froude ( $Fr$ ), con el fin de tener en cuenta el efecto del transporte de sedimentos en el modelo.

Como resultado de lo anterior, se ha conseguido una mayoración más o menos homogénea de la rugosidad, pasando de un valor constante de 0,035 en el E.H.1, a un rango de entre [0,035 – 0,056] para el E.H.2, tal y como se puede observar en el siguiente gráfico:

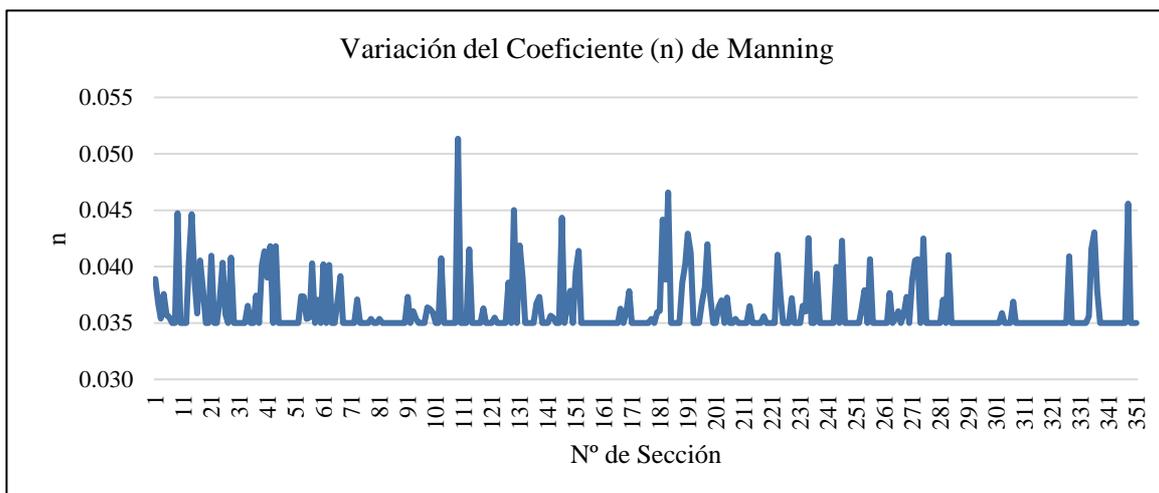


Figura 11-1. Variación del coeficiente ( $n$ ) de Manning a lo largo del tramo.

A modo de ejemplo, se muestra la siguiente tabla donde se aprecian claramente algunas de las secciones más representativas en las que la variabilidad en la rugosidad se hace evidente:

Tabla 11-1. Valores de (n) para diferentes secciones y periodos de retorno.

Nº Sección	nA	nB - T10	nB - T50	nB - T100	nB - T500
9	0.035	0.046	0.046	0.044	0.043
40	0.035	0.042	0.041	0.041	0.041
103	0.035	0.043	0.041	0.040	0.040
109	0.035	0.056	0.053	0.049	0.048
113	0.035	0.043	0.042	0.041	0.040
131	0.035	0.043	0.042	0.041	0.041
192	0.035	0.043	0.041	0.041	0.039
254	0.035	0.040	0.038	0.037	0.037
273	0.035	0.042	0.040	0.040	0.040
275	0.035	0.050	0.045	0.038	0.037
337	0.035	0.039	0.038	0.037	0.037
348	0.035	0.048	0.048	0.044	0.043

Para una visualización más completa, en el “Anexo A: Coeficientes de Manning”, se adjuntan, para cada estudio, todos los valores obtenidos.

## 11.2 Manchas de Inundación para cada periodo (T)

A continuación, se presentan las manchas de inundación obtenidas para ambos estudios. En primer lugar, se realizará una rápida comparación de las zonas inundadas, considerando conjuntamente los cuatro periodos de retorno, en un estudio y otro:

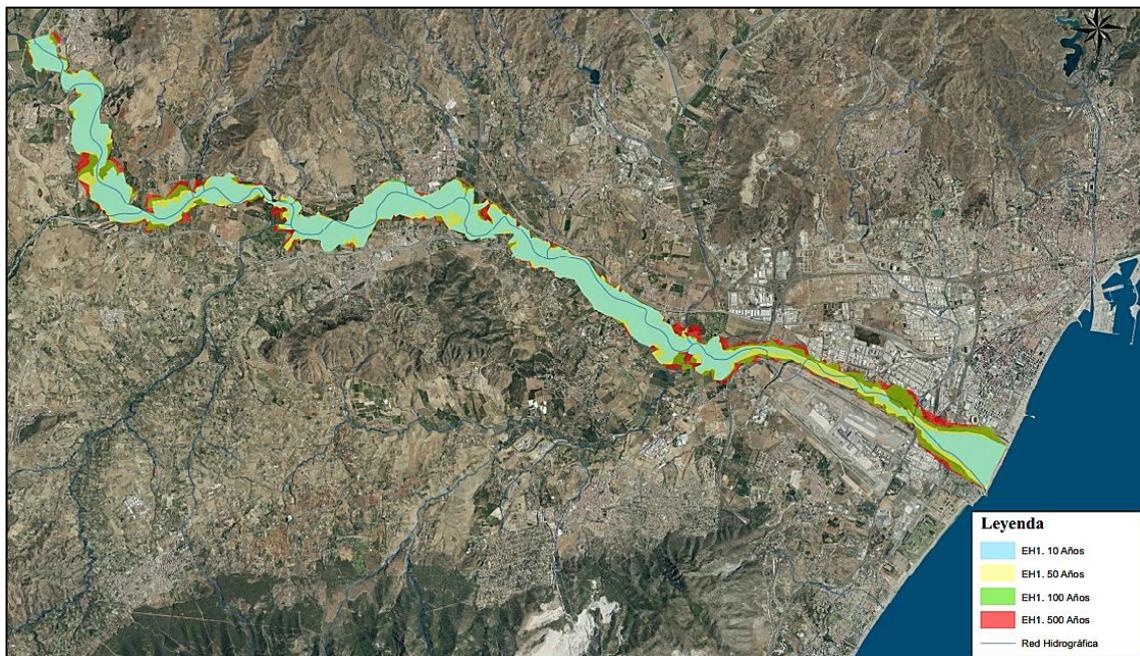


Figura 11-2. Manchas de inundación del E.H.1.



Figura 11-3. Manchas de inundación del E.H.2.

Como puede apreciarse, las diferencias entre un estudio y otro son evidentes. Del mismo modo, dentro de cada uno se observa, como es natural, un aumento en las manchas de inundación a medida que aumentamos el caudal de cálculo, es decir, a medida que aumenta el periodo de retorno.

Seguidamente, y para cada valor de (T), se analizarán las variaciones obtenidas entre un estudio y otro.

### 11.2.1 Periodo de retorno de 10 años.

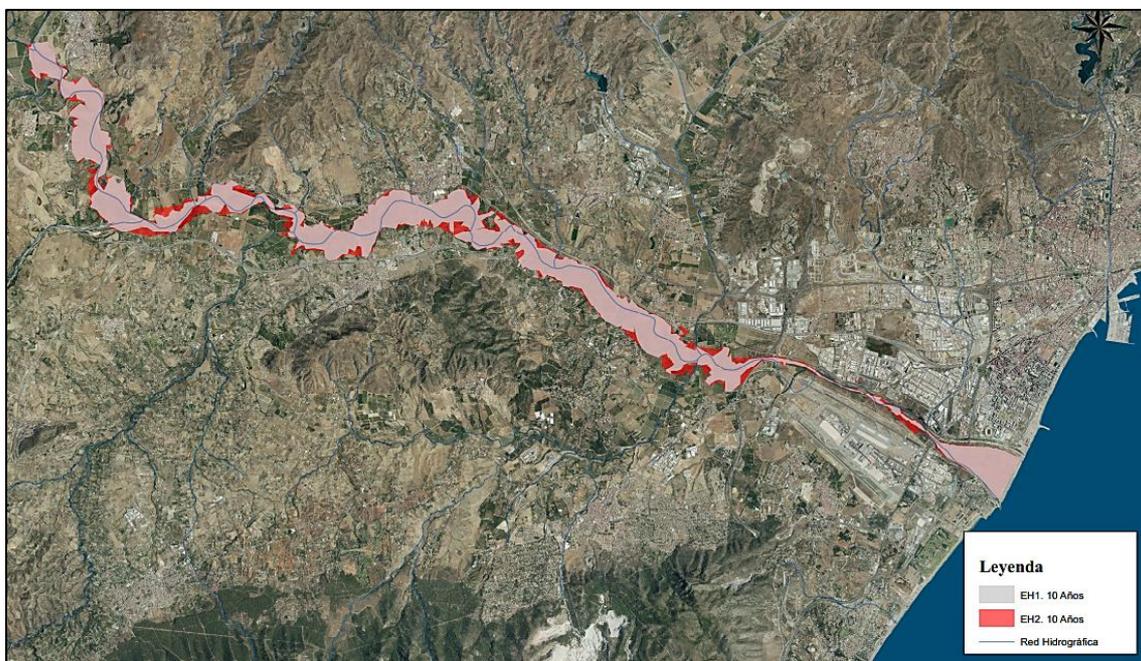


Figura 11-4. Variación de la mancha de inundación para T = 10 años.

Como se puede apreciar en este caso, la diferencia obtenida entre el E.H.1 y el E.H.2 es bastante evidente. Destaca sobre todo el aumento de la mancha producido en la proximidad de la confluencia con el río Grande, en la zona de Cártama - Estación y en la zona entre Santa Águeda y el Peñón, cerca del núcleo de Málaga.

### 11.2.2 Periodo de retorno de 50 años.



Figura 11-5. Variación de la mancha de inundación para  $T = 50$  años.

Para este caso, la variación de las manchas sigue siendo evidente, sobre todo aún en las zonas de confluencia con el río Grande y en la zona entre Santa Águeda y el Peñón. Del mismo modo, comienza a apreciarse un mayor efecto de la inundación sobre el tramo último del río.

### 11.2.3 Periodo de retorno de 100 años.

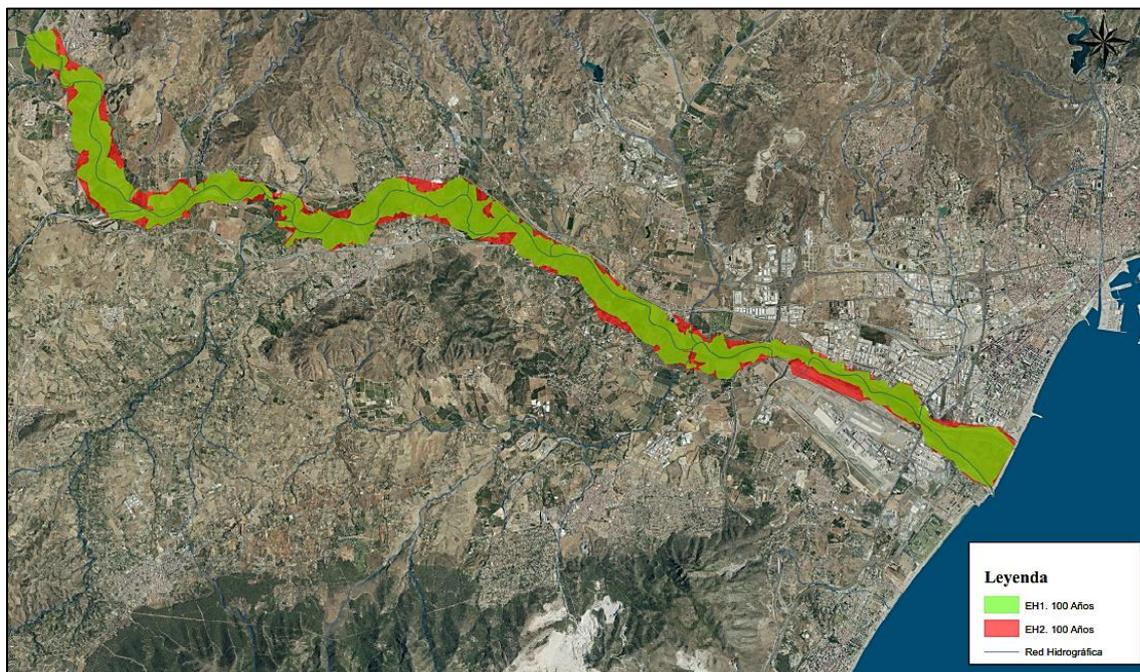


Figura 11-6. Variación de la mancha de inundación para  $T = 100$  años.

Para un periodo de retorno de 100 años, parece que las variaciones que se aprecian son menores, pero simplemente porque el caudal considerado es mucho mayor, lo que también aumenta el efecto de inundación del E.H.1. No obstante, en este caso se hace aún más notorio el impacto provocado sobre la parte sur del río, cerca de la desembocadura.

### 11.2.4 Periodo de retorno de 500 años.

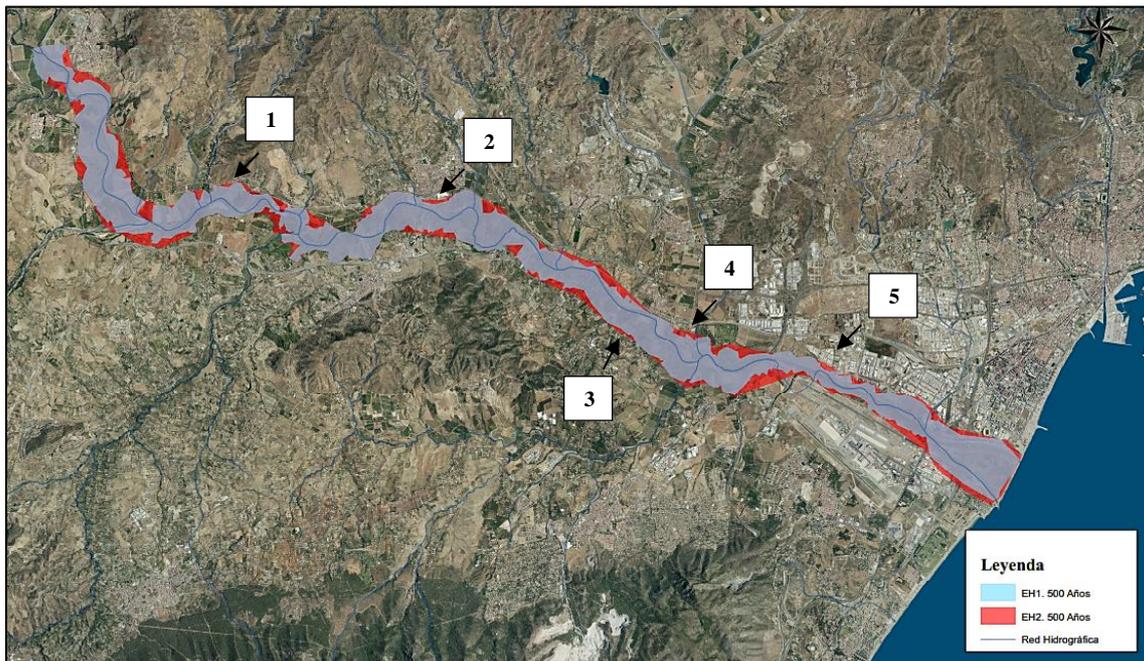


Figura 11-7. Variación de la mancha de inundación para  $T = 500$  años.

Finalmente, para un periodo de retorno de 500 años, las manchas de inundación se vuelven considerables. En este caso y observando de nuevo el tramo próximo a la desembocadura, puede apreciarse como las zonas inundadas afectan directamente al núcleo de Málaga.

### 11.3 Manchas de Inundación para $T = 500$ años

A continuación, se analizarán las zonas afectadas por la mancha de inundación de  $T = 500$  años, siendo esta la situación más desfavorable. Para ello, se ha reducido la escala, con el fin de conseguir un mayor nivel de detalle, y se han seleccionado un total de 5 puntos (indicados en la figura anterior) donde la variación se hace evidente. Además, para cada zona, como se verá más adelante, se adjunta una sección tipo, modelada en HEC-RAS, con la que apreciar las variaciones en los números de Manning, velocidades y calados obtenidas entre ambos estudios.

### 11.3.1 Zona 1: Aljaima

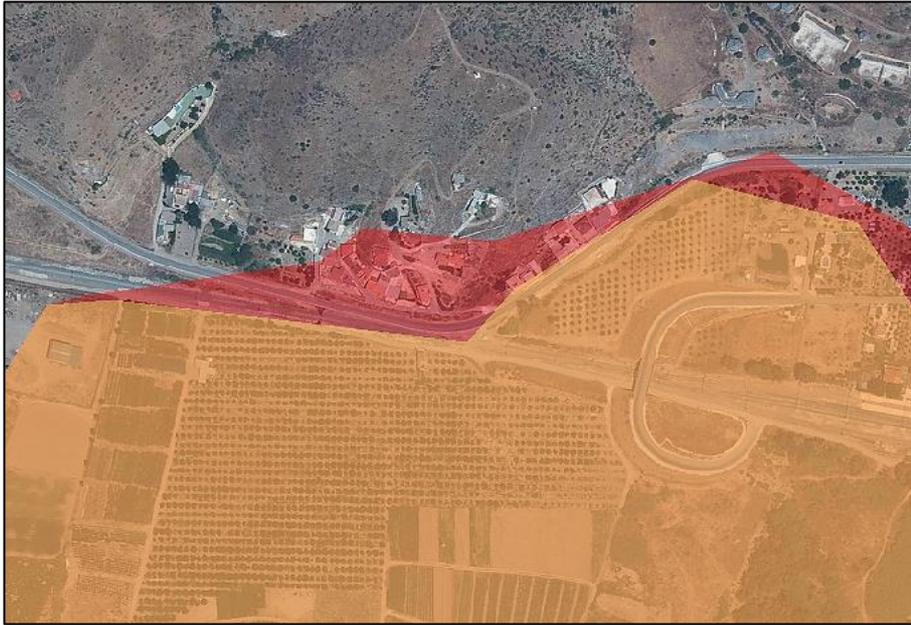


Figura 11-8. Mancha de inundación sobre zona 1.

Como se puede apreciar, la mancha de inundación del Estudio Hidráulico 2 se adentra aún más en la zona, afectando en este caso a un gran número de viviendas que antes no se veían perjudicadas. Además, también repercute de lleno sobre la vía y la estación de tren de Aljaima, situada en la margen derecha.

### 11.3.2 Zona 2: Estación de Cártama



Figura 11-9. Mancha de inundación sobre zona 2.

En este caso, la mancha de inundación perjudica nuevamente a viviendas que antes no se veían afectadas, así como a un cierto número de negocios (restaurantes, talleres, comercios, etc.), además de repercutir en el enlace con el propio núcleo de población a través del puente de la A-7057.

### 11.3.3 Zona 3: Santa Amalia

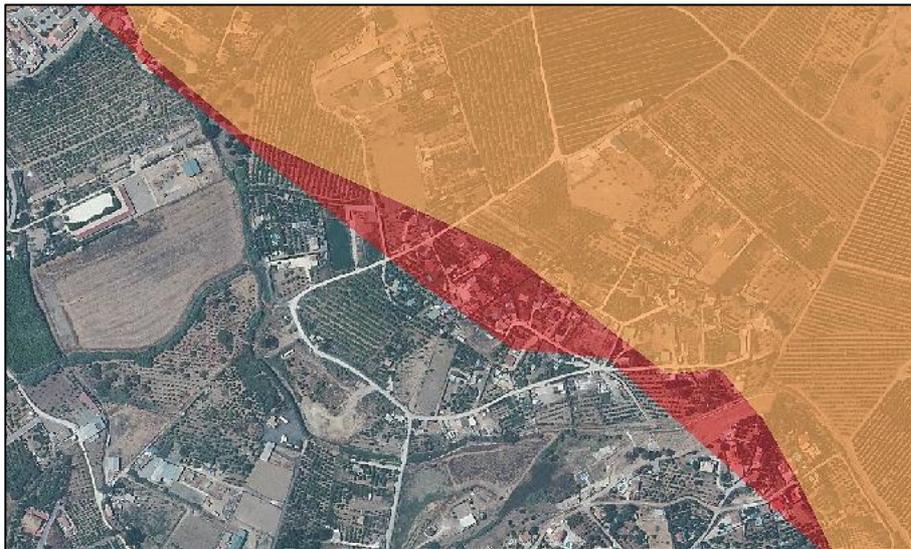


Figura 11-10. Mancha de inundación sobre zona 3.

Como se puede apreciar, la mancha pasa de afectar “solamente” a unas zonas de cultivo, a adentrarse en la localidad de Santa Amalia, repercutiendo en varias casas adosadas y parcelaciones que se verían inundadas y gravemente afectadas.

### 11.3.4 Zona 4: Santa Águeda

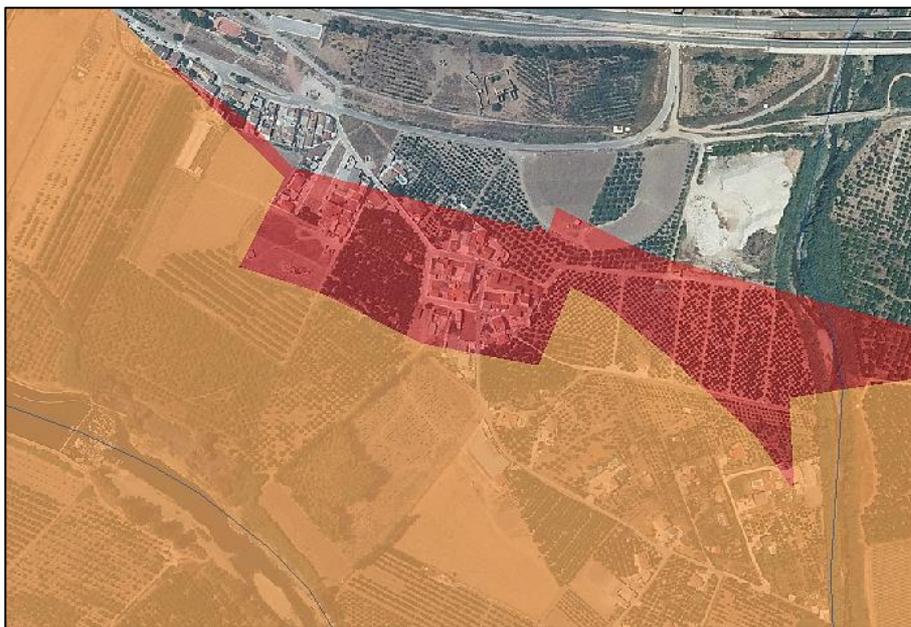


Figura 11-11. Mancha de inundación sobre zona 4.

Para este caso, la zona de inundabilidad referente al E.H.2 se hace más evidente, llegando el agua a varias zonas que antes no alcanzaba. Lo más destacable, es el aumento de la mancha y del riesgo de inundación en el propio centro del barrio de Santa Águeda. Como se puede apreciar, el agua afectaría nuevamente a varias casas y calles, inundando además algunos negocios y establecimientos cercanos.

### 11.3.5 Zona 5: Polígono Santa Teresa



Figura 11-12. Mancha de inundación sobre zona 5.

Esta, es seguramente la zona más importante y conflictiva de todas. Se ha escogido simplemente una pequeña parte, para tener cierta referencia, pero lo cierto es que, como se ha visto en las figuras anteriores, todo el tramo relativo a la desembocadura del río Guadalhorce es prioridad de estudio. No porque afecte a un determinado número de viviendas, sino por el elevado número de instalaciones industriales localizadas en los alrededores. Mas concretamente, se encuentran los polígonos industriales de Santa Teresa, Guadalhorce y la depuradora de Guadalhorce, situada en el extremo sur.

La figura mostrada más arriba, hace referencia a la compañía logística de hidrocarburos CLH, que, como muchas otras, tienen sus negocios en la zona. Una mala acotación de la zona de inundabilidad en este caso, podría no solo causar graves daños materiales por inundación directa, sino afectar en gran medida y de manera catastrófica a las zonas de alrededor, por lo que un mayor control en este tipo de situaciones se hace fundamental.

## 11.4 Variaciones en los calados y velocidades

A continuación, se realizará un estudio comparativo sobre los valores de calados y velocidades obtenidos para cada estudio, y en cada uno de los tramos anteriores.

Con respecto a los calados, se ha medido la variación existente entre la lámina de agua y el margen del cauce, observando cómo se ha ido modificando dicha variación ( $\Delta$ ) para cada uno de los periodos de retorno. Del mismo modo, se han comparado los valores obtenidos de velocidades para cada estudio hidráulico realizado y sobre las 351 secciones definidas, para cada periodo de retorno. Los valores así obtenidos, están reflejados en el “Anexo B: Resultados HEC-RAS”.

Con respecto a las zonas analizadas anteriormente, se tiene que:

### 11.4.1 Zona 1: Aljaima

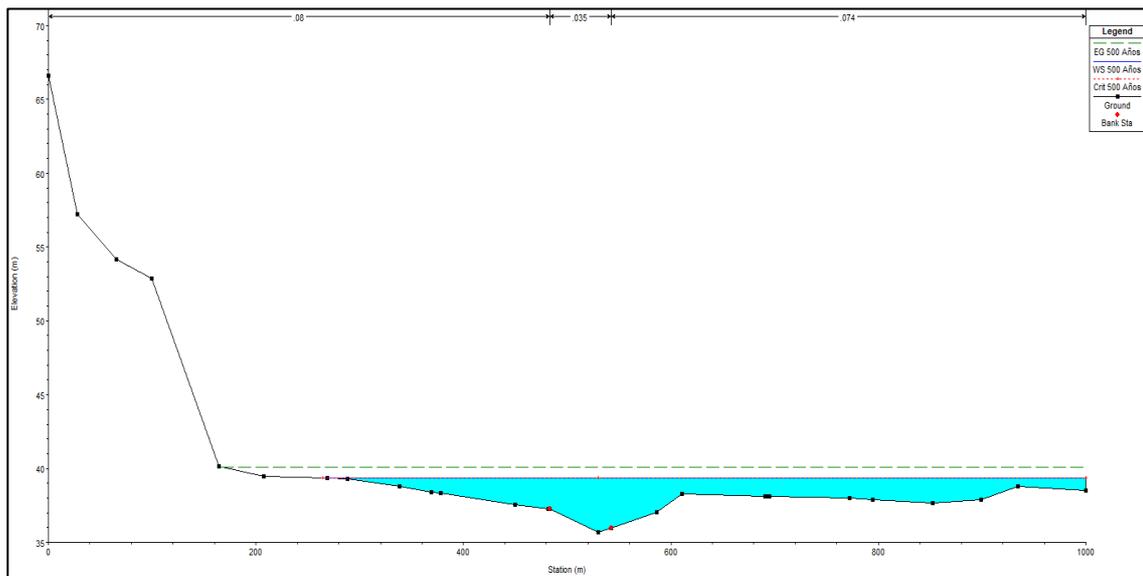


Figura 11-13. Sección de la zona 1 del E.H.1.

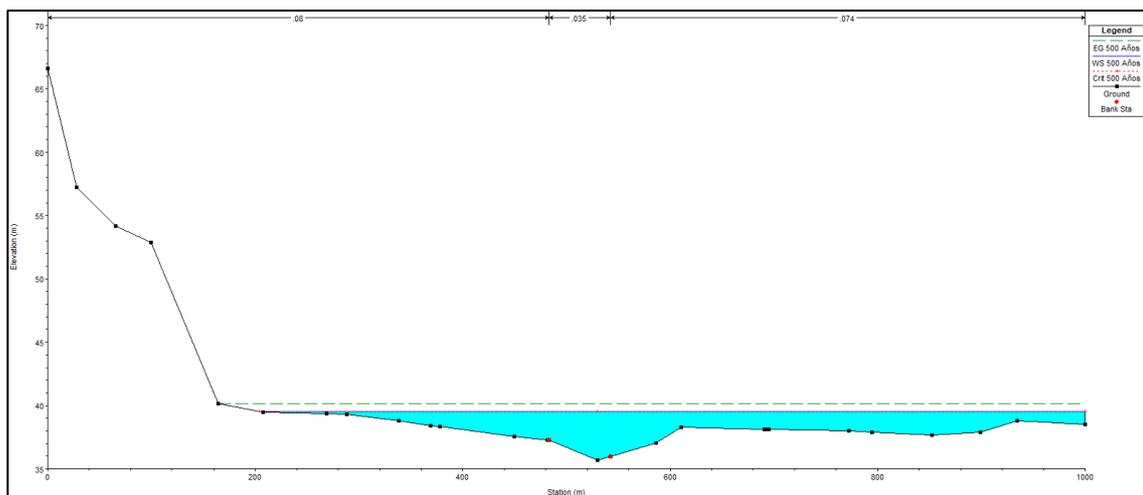


Figura 11-14. Sección de la zona 1 del E.H.2.

En este caso, se produce un aumento de la lámina de agua hacia la izquierda, en consonancia con la mancha de inundación correspondiente a la zona 1. Las variaciones en los números de Manning, calados y velocidades experimentadas, son las siguientes:

Tabla 11-2. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 1.

Sección - 103 (249)	E.H.1	E.H.2
<b>n de Manning</b>	0,035	0,040
<b>Velocidad (m/s)</b>	8,44	8,02
<b>Δ Calado (m)</b>	0,45	

Aunque a simple vista parece que el desnivel no es muy elevado debido a la escala de la sección, lo cierto es que la diferencia de casi medio metro implica un aumento de aproximadamente 70 metros en la mancha de inundación, lo que repercute, como puede apreciarse en la figura correspondiente a un gran número de casas e incluso a la red ferroviaria.

### 11.4.2 Zona 2: Estación de Cártama

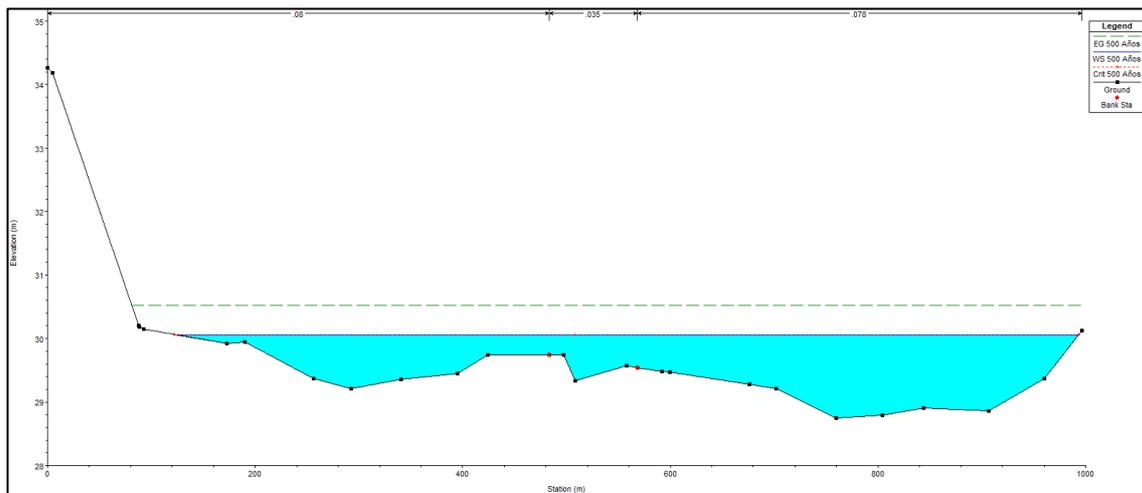


Figura 11-15. Sección de la zona 2 del E.H.1.

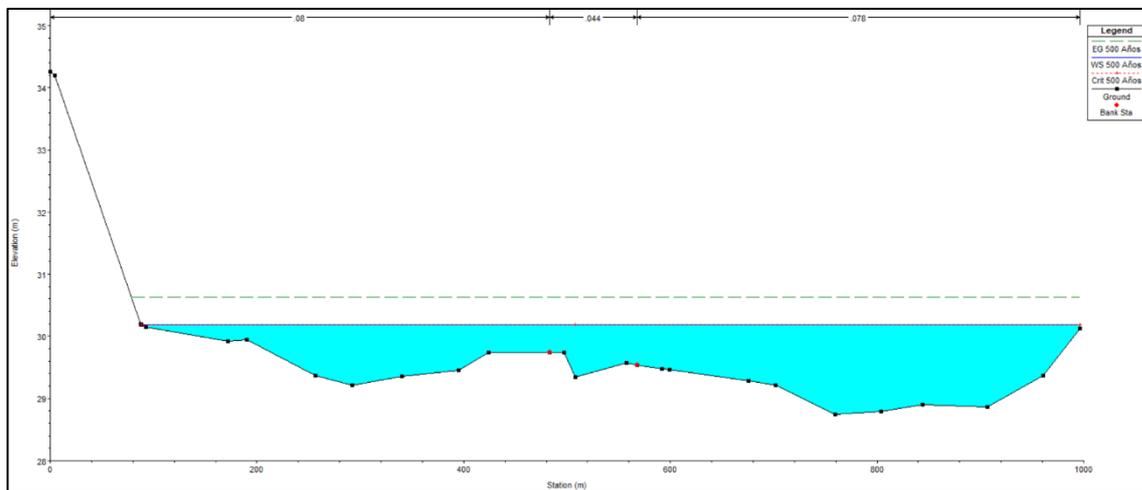


Figura 11-16. Sección de la zona 2 del E.H.2.

En este caso, se produce nuevamente un aumento y desplazamiento de la lámina de agua hacia la izquierda, en consonancia con la mancha de inundación correspondiente a la zona 2. Las variaciones en los números de Manning, calados y velocidades experimentadas, son las siguientes:

Tabla 11-3. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 2.

<b>Sección – 142 (210)</b>	<b>E.H.1</b>	<b>E.H.2</b>
<b>n de Manning</b>	0,035	0,038
<b>Velocidad (m/s)</b>	6,37	6,26
<b>Δ Calado (m)</b>	0,16	

Para este caso, la diferencia en el aumento de la macha es del orden de la mitad que la anterior (40 m aprox.), lo que resulta bastante significativo para los simplemente 0,16 m de desnivel experimentados por la lámina. No obstante, es más que suficiente como para afectar a núcleo de la Estación de Cártama.

### 11.4.3 Zona 3: Santa Amalia

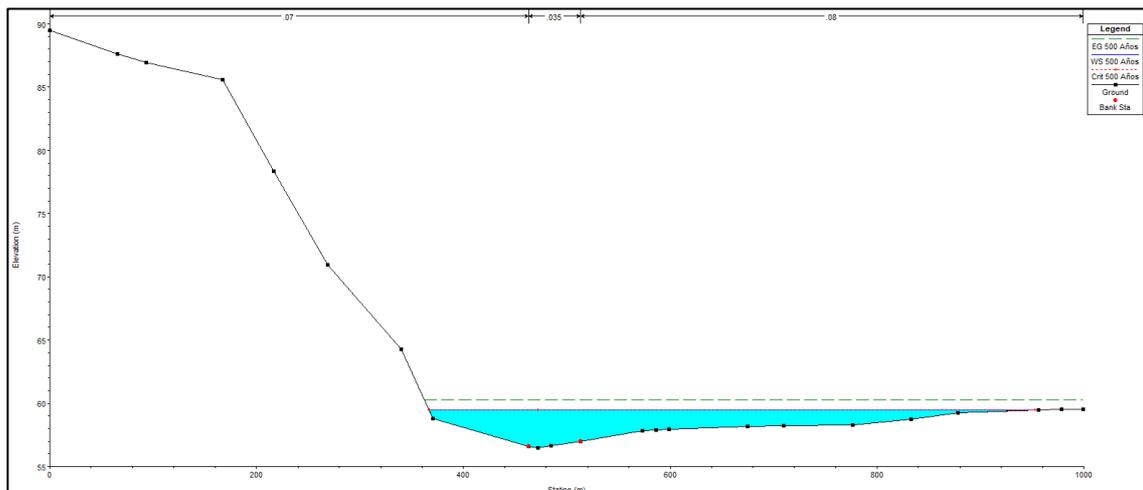


Figura 11-17. Sección de la zona 3 del E.H.1.

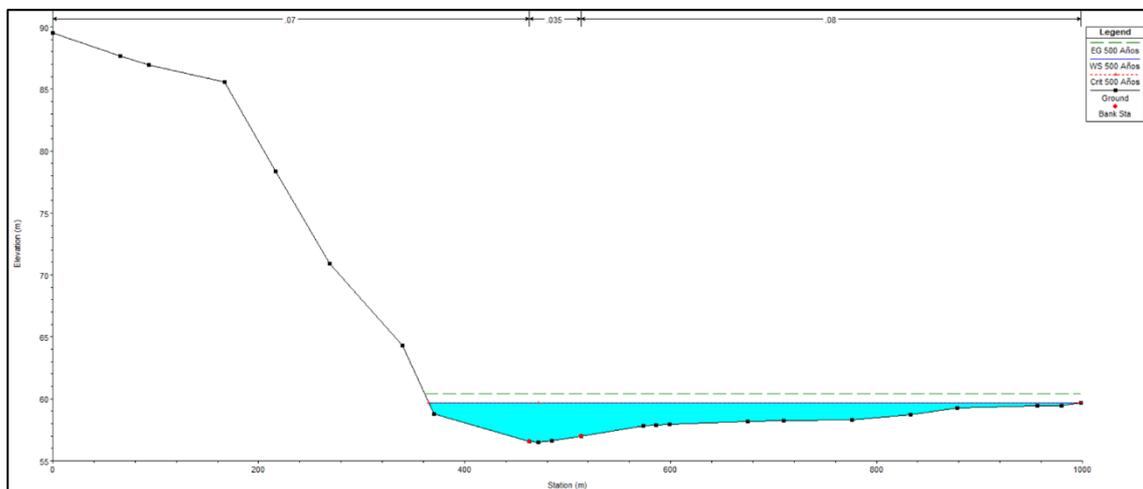


Figura 11-18. Sección de la zona 3 del E.H.2.

A diferencia de en los casos anteriores, se produce en este un aumento hacia la derecha de la lámina de agua, en consonancia con la mancha de inundación correspondiente a la zona 3. Las variaciones en los números de Manning, calados y velocidades experimentadas, son las siguientes:

Tabla 11-4. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 3.

<b>Sección – 234 (118)</b>	<b>E.H.1</b>	<b>E.H.2</b>
<b>n de Manning</b>	0,035	0,047
<b>Velocidad (m/s)</b>	4,62	3,92
<b>Δ Calado (m)</b>	0,50	

En la zona 3, el aumento en el desnivel del calado es de más o menos medio metro, lo que provoca como puede apreciarse un desplazamiento de la mancha de agua hacia la derecha de unos 40 metros y a una velocidad moderada.

### 11.4.4 Zona 4: Santa Águeda

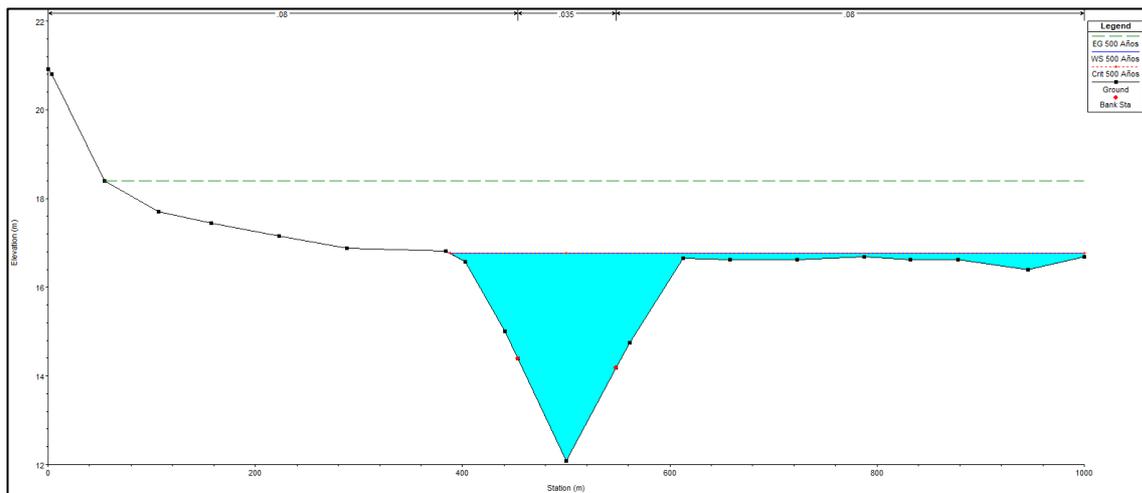


Figura 11-19. Sección de la zona 4 del E.H.1.

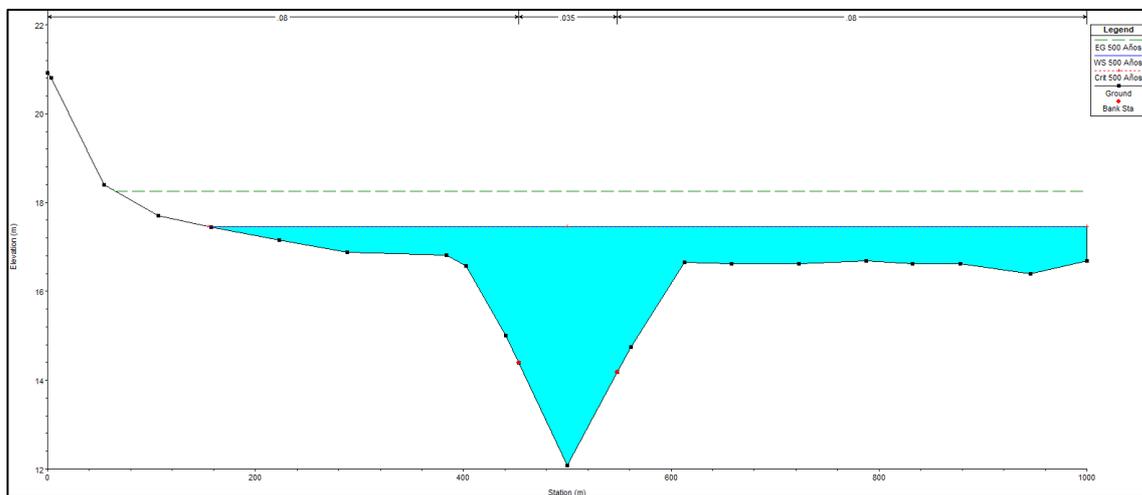


Figura 11-20. Sección de la zona 4 del E.H.2.

Para la zona de Santa Águeda, el aumento en el nivel de la lámina de agua es completo, incrementándose en el margen derecho y llegando a alcanzar incluso el margen izquierdo de manera bastante evidente, tal y como se refleja en la mancha correspondiente. Las variaciones en los números de Manning, calados y velocidades experimentadas en este caso, son las siguientes:

Tabla 11-5. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 4.

Sección – 246 (106)	E.H.1	E.H.2
<b>n de Manning</b>	0,035	0,042
<b>Velocidad (m/s)</b>	3,62	2,80
<b><math>\Delta</math> Calado (m)</b>	0,55	

En este caso, la variación del calado es nuevamente significativa y máxime si se analiza con la propagación de la mancha de inundación. La velocidad es también elevada lo que pone de manifiesto el claro aumento en la margen izquierda y derecha del riesgo de inundación localizado en la zona de Santa Águeda.

### 11.4.5 Zona 5: Polígono Santa Teresa

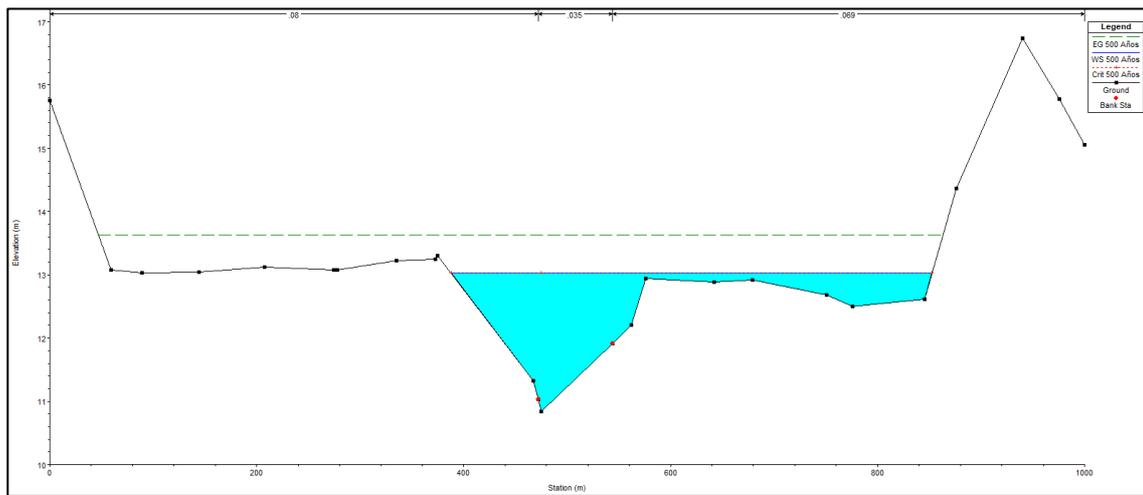


Figura 11-21. Sección de la zona 5 del E.H.1.

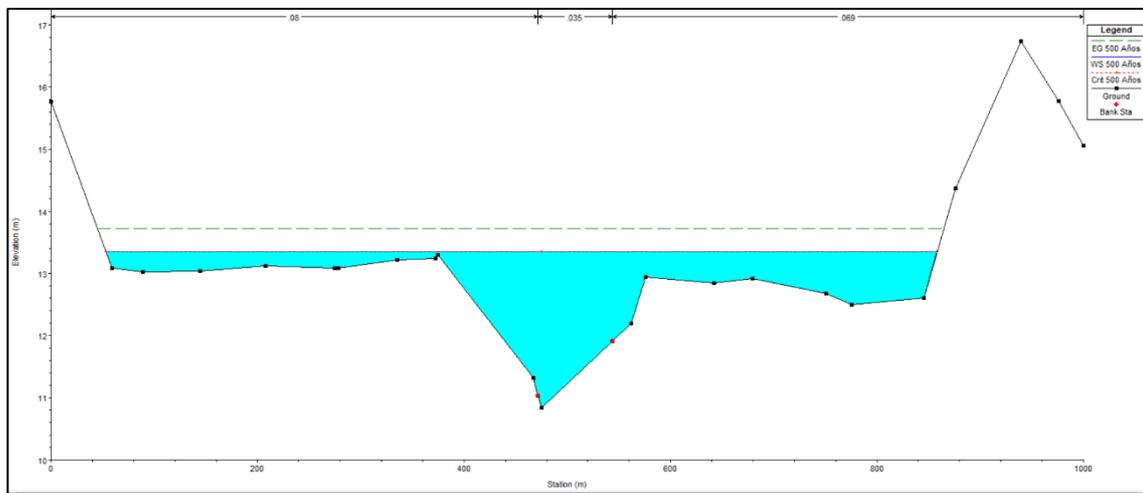


Figura 11-22. Sección de la zona 5 del E.H.2.

Por último, con respecto a la zona relativa al polígono de Santa Teresas, cerca de la desembocadura del río Guadalhorce, puede apreciarse al igual que antes, como la mancha de inundación crece considerablemente, afectando en mayor medida a la margen derecha del cauce y llegando incluso a desbordar y a afectar, a la margen izquierda. Esta es una prueba más del especial cuidado que se debe prestar a esta zona del tramo. Las variaciones en los números de Manning, calados y velocidades experimentadas en este caso, son las siguientes:

Tabla 11-6. Variaciones en las variables hidráulicas de la zona 5.

Sección – 284 (68)	E.H.1	E.H.2
<b>n de Manning</b>	0,035	0,041
<b>Velocidad (m/s)</b>	6,86	6,16
<b>Δ Calado (m)</b>	0,35	

Este es nuevamente uno de los casos más significativos, debido a que un aumento de 0,35 m en el desnivel entre un estudio y otro (menos que en otras zonas), genera un aumento en la mancha de inundación de unos 200 metros aproximadamente. Observando la figura correspondiente, puede apreciarse como dicho incremento es lo que pone en conflicto la zona industrial próxima de los alrededores, por lo que las medidas de actuación en estos casos son de vital importancia.

Estos y todos los demás resultados, se encuentran disponibles en el “Anexo B: Resultados HEC-RAS”.

# 12 CONCLUSIONES

---

*El valor de una idea, radica en el uso de la misma.*

*- Tomas A. Edison -*

**T**ras todo el proceso de cálculo, modelamiento, análisis y comparación de resultados obtenidos durante todo el presente trabajo, queda demostrada, como se pretendía desde el principio del mismo, la importancia de un buen método de cálculo para la determinación de las llanuras de inundación.

A diferencia de lo visto habitualmente, donde se llevaban a cabo estudios hidráulicos de ríos tomando valores habituales y directamente de tablas sin prestar más o menos atención a la raíz de los mismos, en este caso, ha quedado evidenciado que no siempre puede procederse así. En este trabajo, para la determinación de la mancha de inundación y como ya se ha comentado en varias ocasiones, la utilización directa del método de Cowan para la determinación de la rugosidad de un río no es suficiente. Con este estudio puede apreciarse que, en ríos donde la presencia de transporte de sedimentos es importante, como en el caso del Guadalhorce, el efecto que estos causan sobre la rugosidad del cauce, y por ende sobre el estudio hidráulico y la mancha de inundación del mismo es trascendental.

A simple vista, puede parecer que las variaciones entre unas manchas y otras no son del todo apreciables, al menos a una determinada escala, pero como se ha podido comprobar, una pequeña variación en la altura de la lámina de agua puede repercutir enormemente afectando a zonas ya inundadas, aumentando la cota de inundación o incluso llegando a zonas donde antes no se consideraba posible.

Como consecuencia de todo ello, el número de viviendas, locales, cocheras, negocios, zonas verdes, zonas de cultivo, etc. afectadas, se ve incrementado, pudiendo repercutir no solo en un aumento de los daños materiales si no incluso de vidas humanas, por lo que las consideraciones al respecto son primordiales.

Del mismo modo, como en el caso de la Zona 5: Polígono Santa Teresa, pueden verse afectadas zonas con un cierto nivel de industrialización en los que un aumento de las avenidas puede provocar terribles consecuencias, más allá de una inundación directa.

Finalmente, cabe destacar que este tipo de estudios deben tomarse en consideración y a raíz de los posibles daños provocados, para la determinación y definición de las actuaciones correctoras que se consideren oportunas, ya que, para el caso más común de encauzamientos de ríos, los parámetros de cálculo y dimensionamiento, se ven lógicamente afectados en función de la posible mancha de inundación preestablecida, con la correspondiente repercusión económica que supone.

# REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

---

Para la realización del presente trabajo, se han empleado las siguientes fuentes bibliográficas o de referencia, ordenadas según el ámbito correspondiente:

❖ Normativas y Planes:

- Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.
- Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.
- Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces.
- Plan General de Ordenación Urbana de Málaga (PGOUM).
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH).
- Comisión Técnica de Emergencia por Inundaciones (CTEI).
- Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España.

❖ Libros, publicaciones y/o estudios:

- Estudio hidráulico para la prevención de inundaciones y para la ordenación de la cuenca del río Guadalhorce. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Modelación hidrodinámica y Transporte de sedimentos en ríos. Investigación Tutelada (Doctorado). M<sup>a</sup> Carmen Molina. Universidad de Granada.
- Ríos y ramblas mediterráneas. Juan F. Mateu Bellés. Universidad de Valencia.
- Modelación del transporte de sedimentos en ríos. Tatiana Constanza Guarín Corredor. Universidad de Colombia.
- Procesos de transporte de sedimentos. Dra. Joselina Espinoza Ayala. Instituto Mexicano de Tecnología y Agua.
- Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. FAO.
- Estudio de la cuenca del Río Guadalhorce. Montes y caminos. Diputación de Málaga.
- Estudio de inundabilidad del Río Guadalhorce. Fundación CIEDES.

- ❖ Softwares, bases de datos GIS, ortofotos y cartografía:
  - Manual básico de HEC-RAS, HEC-GeoRAS y ArcMap 10.1.
  - Manual de referencia hidráulico de HEC-RAS, HEC-GeoRAS.
  - Curso: Simulación hidráulica aplicada (HEC-RAS).
  - Instituto Geográfico Nacional.
  - Instituto Geológico y Minero de España.
  - Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.
  - Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).
  - Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA).
  - Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. MAPAMA.

