



**ESTUDIO AMBIENTAL ESTRATÉGICO.
PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA DEL PLAN DE
DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR
(ALBACETE)**

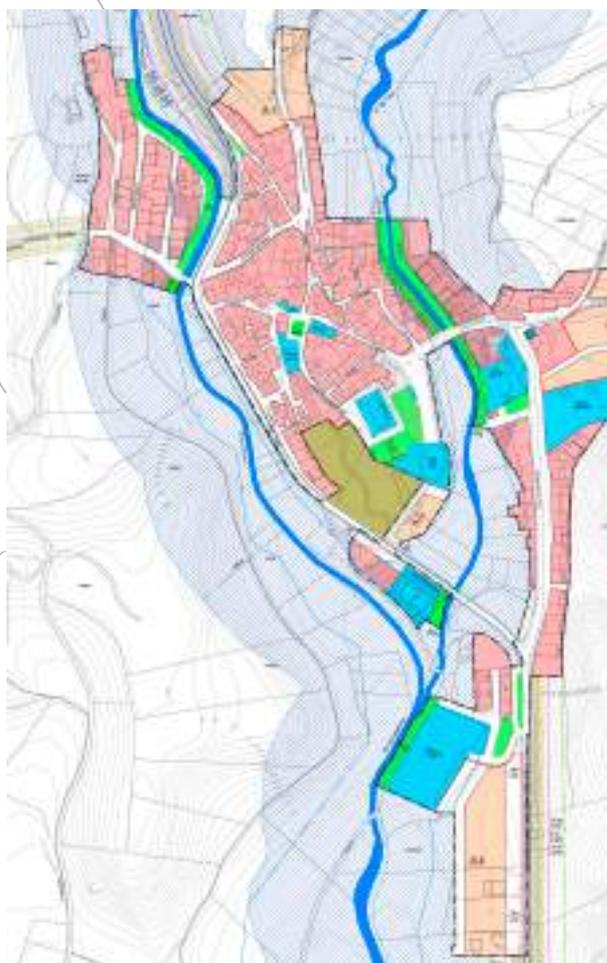
ANEJO CARTOGRAFICO 3. ESTUDIO HIDROLOGICO Y DE RIESGO DE AVENIDAS.

Nota.

El Estudio Hidrológico es un documento redactado en otra fecha por otro equipo técnico, se mantiene la portada de esta documentación para mantener la homogeneidad de la documentación.

ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO

VILLAVERDE DE GUADALIMAR
(ALBACETE)





ÍNDICE

ÍNDICE	- 2 -
1. INTRODUCCIÓN.....	- 3 -
2. OBJETO	- 3 -
2.1. BASE NORMATIVA.....	- 5 -
3. ESTUDIO HIDROLÓGICO	- 6 -
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	- 6 -
3.2. CAUDALES DE AVENIDA	- 6 -
3.3. HIDROGRAMA.....	- 7 -
4. ESTUDIO HIDRÁULICO	- 10 -
4.1. METODOLOGÍA GENERAL DEL ANÁLISIS	- 12 -
4.2. MODELO DIGITAL DEL TERRENO	- 12 -
4.3. CARACTERÍSTICAS DEL CAUCE	- 14 -
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	- 14 -
4.5. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN	- 15 -
4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	- 15 -
4.6. ESCALAS DE TRABAJO	- 21 -
4.7. PROCESO EN IBER	- 22 -
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS.....	- 22 -
5.1. MAPAS DE INUNDABILIDAD. DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES Y DE FLUJO PREFERENTE.....	- 23 -
5.1.1. T100.....	- 23 -
5.1.2. T500 (ZONA INUNDABLE)	- 27 -
6. CONCLUSIONES.....	- 30 -

APÉNDICE I. PLANOS



1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales con mayor repercusión socioeconómica. Por ello, resulta imprescindible la elaboración de un estudio detallado de la inundabilidad a la hora de edificar en las zonas limítrofes con cursos de agua de cierta entidad.

En consecuencia, se precisa la realización de un estudio de inundabilidad durante el procedimiento para la elaboración de Planes de Delimitación de suelo urbano, así como para sus modificaciones puntuales, en caso de que estos se vean afectados por cursos de agua, como es el caso del Plan de Delimitación de Suelo Urbano de Villaverde de Guadalimar.

2. OBJETO

El objeto del presente estudio es la determinación de las condiciones que debe cumplir el *Plan de delimitación de suelo urbano del municipio de Villaverde de Guadalimar (Albacete)* desde el punto de vista hidráulico.

Para ello, se ha realizado un modelo hidráulico de una amplia zona que engloba el área objeto del Plan, a partir del cual se ha determinado la cota de la lámina de agua en los distintos escenarios estudiados.

Asimismo, se han delimitado las zonas inundables correspondientes a las avenidas de periodo de retorno de 100 años ($T=100$) y 500 años ($T=500$) de los arroyos presentes en la zona de estudio: arroyo de los Pajares y arroyo de la Vaqueriza, ambos desembocando en el río Guadalimar.

Conocidos los límites de las zonas inundables es más fácil gestionar la planificación territorial de las parcelas para que no se produzcan afecciones a las mismas.



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

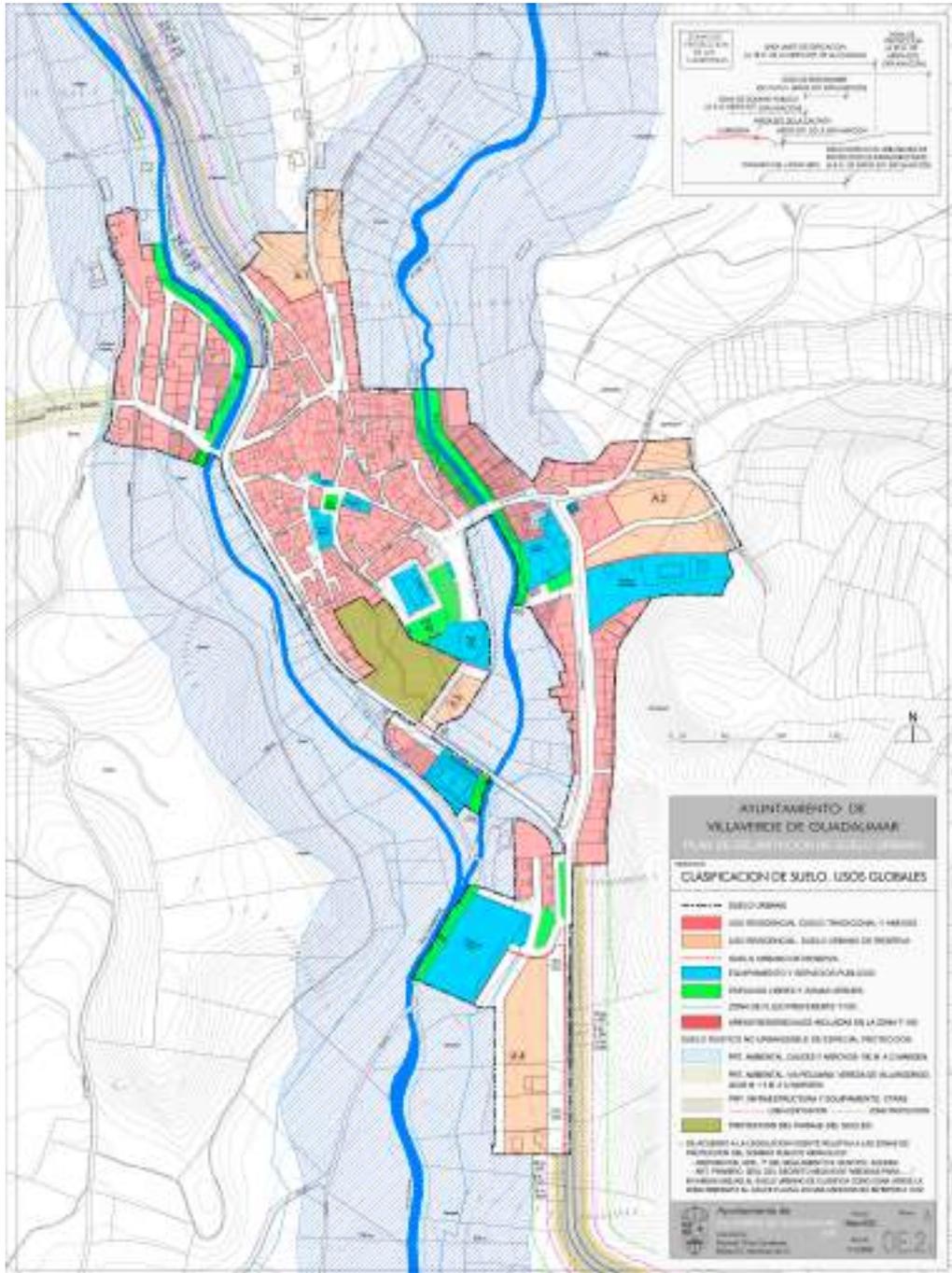


Imagen 1. Plan de delimitación de suelo urbano. Clasificación de suelo. Usos globales.

Tal y como se puede ver en la anterior imagen, son varios los cursos de agua que circundan el municipio de Villaverde de Guadalimar (Albacete). Para el estudio (hidráulico) de inundabilidad de esta memoria, se analizará el comportamiento hidráulico de los arroyos de Pajares y Vaqueriza, ambos desembocando en el río Guadalimar.



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

2.1. BASE NORMATIVA

La normativa que se aplica en este documento es:

- Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el R.D. 849/1986, de 11 de abril y posteriores modificaciones.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas y posteriores modificaciones.
- Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.

Con base en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se consideran zonas inundables:

“Artículo 14.

1. Se consideran zona inundable los terrenos que puedan resultar inundados 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 en los lagos, lagunas embalses, ríos o arroyos...”

Por tanto, la zona inundable queda delimitada por la avenida de 500 años de periodo de retorno. También define el Reglamento de Dominio Público Hidráulico en su artículo 9 la zona de flujo preferente (ZFP) como:

“La zona de flujo preferente es aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas. A los efectos de la aplicación de la definición anterior, se considerará que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- a) Que el calado sea superior a 1 m.*
- b) Que la velocidad sea superior a 1 m/s.*
- c) Que el producto de ambas variables sea superior a 0,5 m²/s*



3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

En este apartado se presentan los resultados del estudio hidrológico que se ha llevado a cabo en la zona. El objeto del estudio es determinar el caudal circulante por el **arroyo de los Pajares y por el arroyo de la Vaqueriza y su desembocadura en el río Guadalimar**, por tratarse de los cursos de agua que están presente en el área de actuación, para las avenidas de 100 y 500 años de periodo de retorno, así como obtener los hidrogramas asociados a dichos caudales para la cuenca de estudio.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

Las características hidrológicas de la cuenca asociada a este arroyo han sido obtenidas mediante la **aplicación Caumax**:

CARACTERÍSTICAS CUENCA		Arroyo de los Pajares	Arroyo de la Vaqueriza
Área	km ²	10,50	18,25
Longitud del cauce principal	km	7,00	7,5
Pendiente del cauce	m/m	0,10	0,08

Tabla 1. Características de la cuenca.

3.2. CAUDALES DE AVENIDA

Para estimar la superficie inundada en régimen natural correspondiente a la avenida de periodo de retorno de 500 años (T=500) y 100 años (T=100), **se han utilizado los caudales punta obtenidos mediante la aplicación Caumax.**

		Arroyo de los Pajares	Arroyo de la Vaqueriza
Caudal T100	(m ³ /s)	35	53
Caudal T500	(m ³ /s)	50	76

Tabla 2. Caudales punta aportados por CAUMAX para los periodos de retorno de 100 (T100) y 500 (T500) años.



3.3. HIDROGRAMA

El hidrograma de la cuenca de estudio se ha obtenido mediante el método desarrollado por Mockus en 1957, denominado Hidrograma Unitario Sintético Triangular (HUST).

Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluyó que el tiempo base (t_b) y el tiempo pico (t_p) se relacionan por la expresión:

$$t_b = 2.67 \cdot t_p$$

A su vez, el tiempo pico (t_p) se expresa como:

$$t_p = \frac{de}{2} + t_r$$

Dónde:

t_b (h): tiempo base.

t_p (h): tiempo pico.

t_r (h): tiempo de retraso.

de (h): duración en exceso.

El tiempo de retraso se estima mediante el tiempo de concentración (t_c) de la forma:

$$t_r = 0.6 \cdot t_c$$

Dónde:

t_c (h): tiempo de concentración calculado como:

$$t_c = 0.3 \cdot \left[\frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0.76}$$

Dónde:

t_c (h): tiempo de concentración.

L (km): longitud del cauce principal.



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN
DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

J (m/m): pendiente media del cauce principal.

Por último, la duración en exceso con la que se tiene mayor caudal pico, a falta de mejores datos se puede calcular aproximadamente como:

$$de = 2 \cdot \sqrt{t_c}$$

Con esto, se obtienen los siguientes parámetros del hidrograma:

PARÁMETROS DEL HIDROGRAMA		Arroyo de los Pajares	Arroyo de la Vaqueriza
Tiempo de concentración	t_c (h)	2,03	2,20
Duración en exceso	d_e (h)	2,85	2,97
Tiempo de retraso	t_r (h)	1,21	1,32
Tiempo pico	t_p (h)	2,64	2,81
Tiempo base	t_b (h)	7,06	7,50

Tabla 3. Parámetros principales del hidrograma

A continuación, se muestran los hidrogramas obtenidos para los distintos periodos de retorno estudiados:

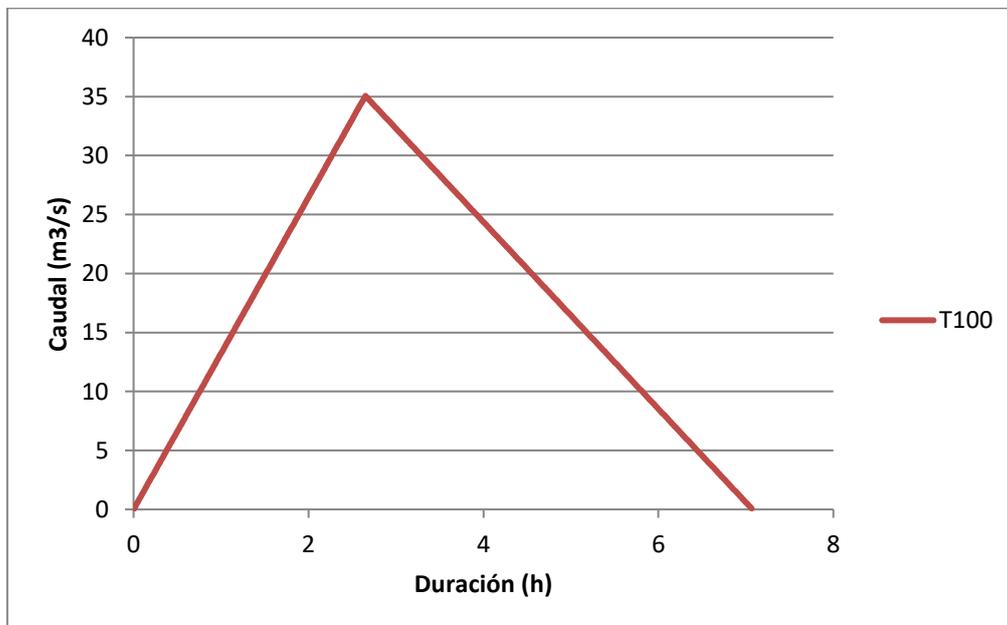




Gráfico 1. Hidrograma de entrada arroyo de los Pajares para caudal de periodo de retorno de 100 años

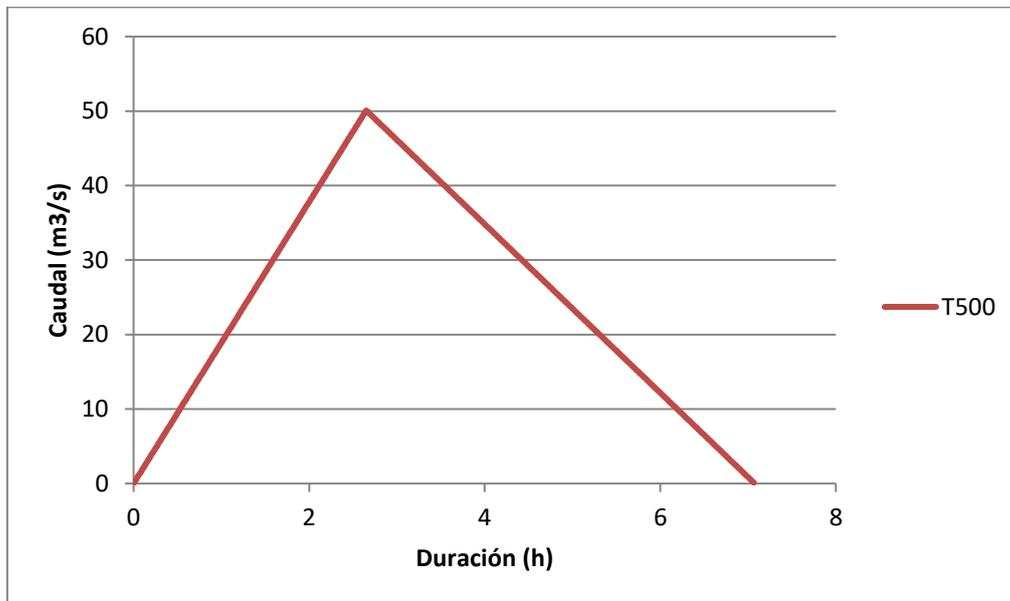


Gráfico 2. Hidrograma de entrada arroyo de los Pajares para caudal de periodo de retorno de 500 años.

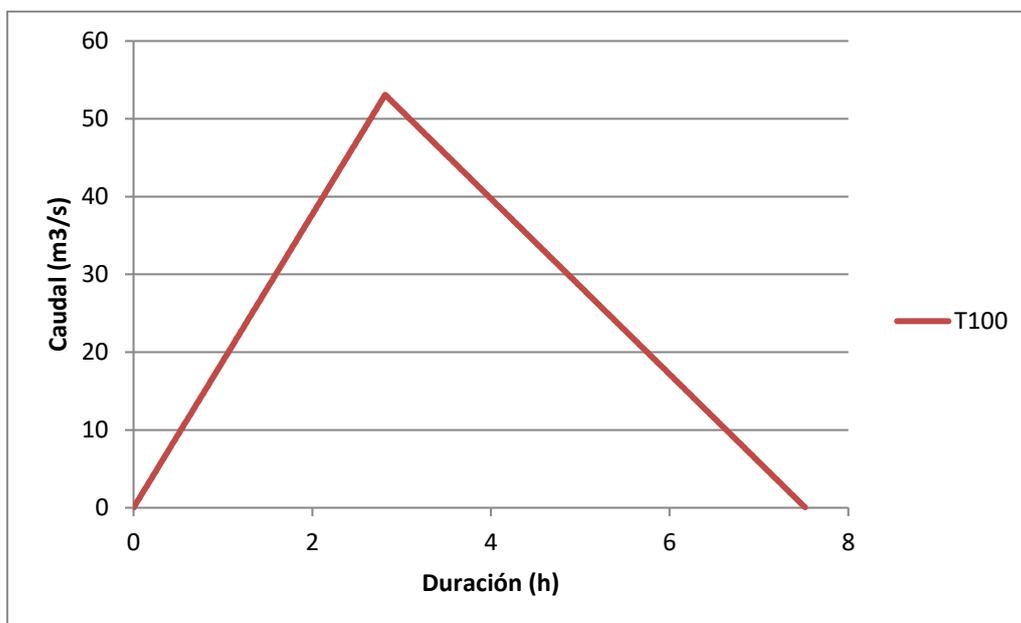




Gráfico 3. Hidrograma de entrada arroyo de las Vaquerizas para caudal de periodo de retorno de 100 años

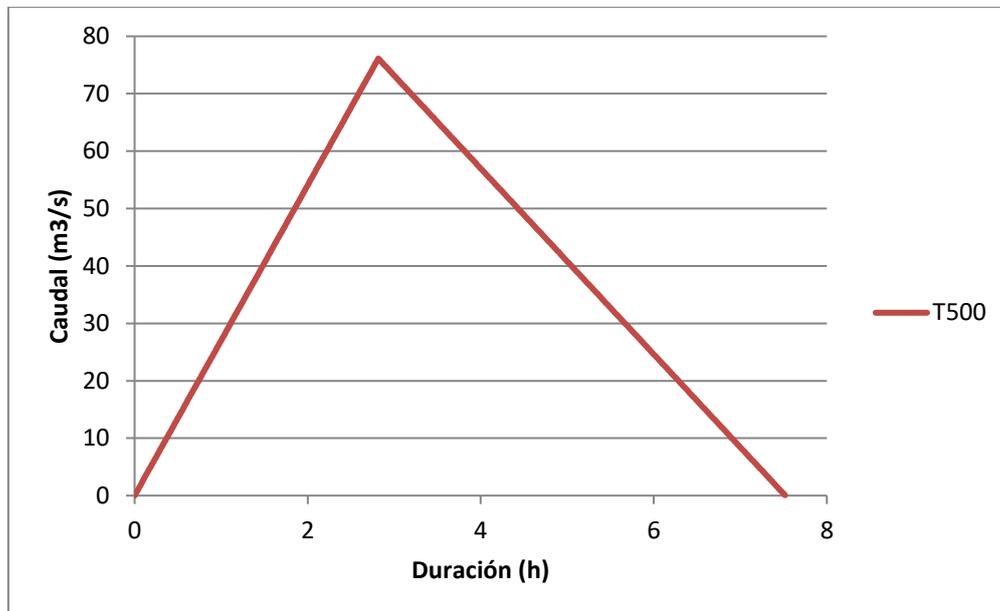


Gráfico 4. Hidrograma de entrada arroyo de las Vaquerizas para caudal de periodo de retorno de 500 años

4. ESTUDIO HIDRÁULICO

Una vez obtenido los hidrogramas para las avenidas de periodo de retorno de 100 y 500 años, se procede a delimitar el área inundada mediante el estudio hidráulico.

Se ha estudiado el comportamiento hidráulico de ambos cursos de agua en régimen natural, en un tramo de aproximadamente 3 km de longitud.

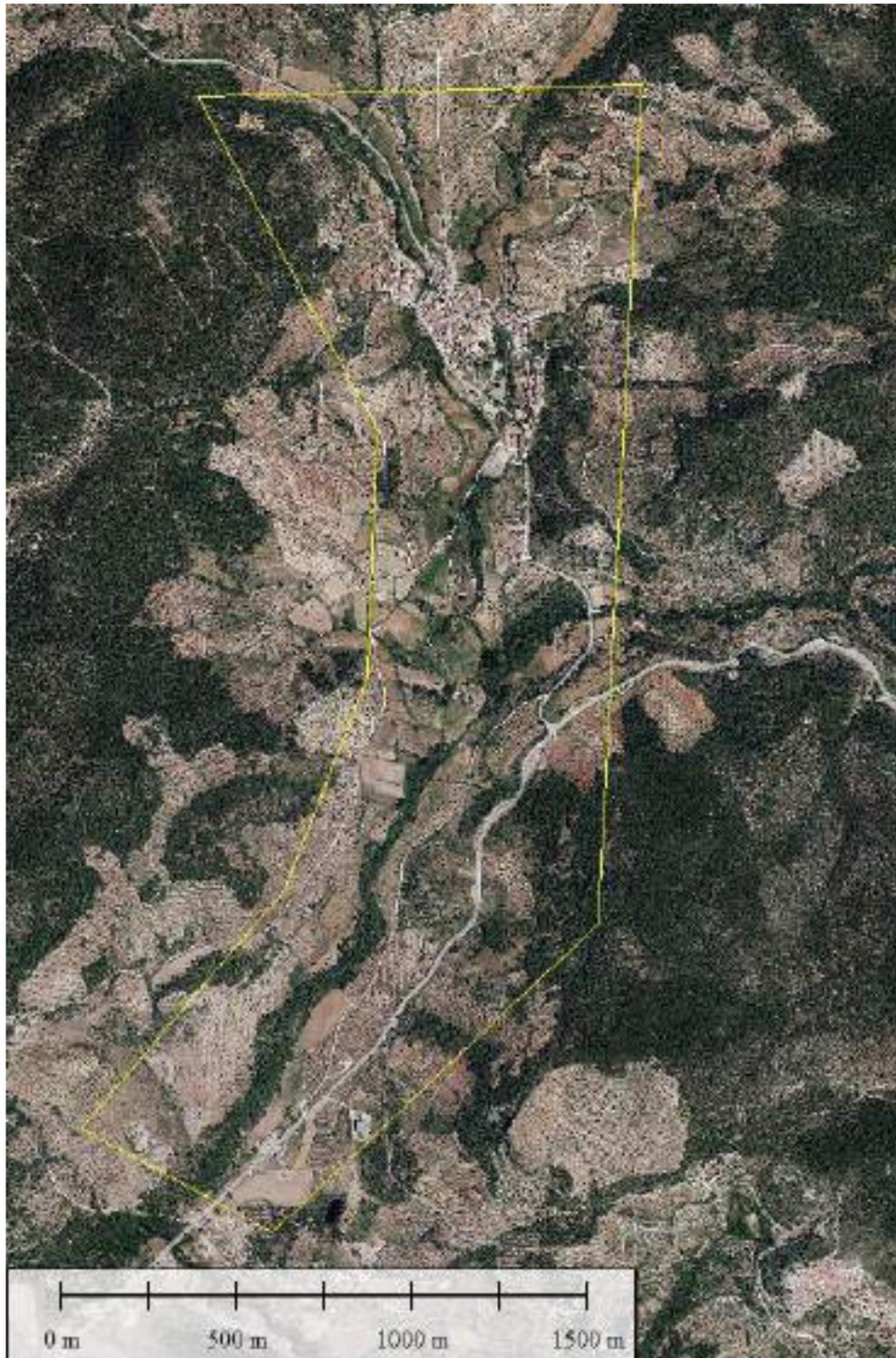


Imagen 2. Delimitación de zona de estudio hidráulico.



4.1. METODOLOGÍA GENERAL DEL ANÁLISIS

Para la realización de la simulación hidráulica del cauce de estudio se han seguido los siguientes pasos:

1. Recopilación de información cartográfica de la zona de estudio, especialmente importante es la obtención del Modelo Digital del Terreno (MDT).
2. Determinación de las características de la zona de estudio, como la rugosidad y los usos del suelo mediante herramientas SIG.
3. Realización del modelo 2D y simulación con el software IBER 2.6 para la obtención de las zonas inundables.
4. Elaboración de planimetría a partir de los resultados obtenidos que delimitan la superficie inundada.

4.2. MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Para la generación del MDT se han empleado los archivos *.LAS de vuelo LIDAR clasificado de 0.5 puntos/m² del 2009, que se encuentran disponibles en el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional de España. Estos archivos contienen toda la información de una nube de puntos tridimensional procedente del sistema LIDAR y conserva la naturaleza de los datos del sistema de captura. Según especificaciones, la precisión en el eje z es de 15 – 20 cm en función de la metodología y complejidad del terreno a la hora de la interpolación. En concreto, el MDT generado se trata de una malla de puntos cada 0,5 m, con la misma precisión en el eje z que el propio archivo *.LAS de la zona de estudio.

Para la generación del MDT se han empleado distintos softwares SIG y se han llevado a cabo los siguientes pasos:

1. Descarga de los archivos *.LAZ del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional de España.
2. Tratamiento y filtrado de puntos *.LAS para reducir el ruido debido a la vegetación y corregir irregularidades del terreno.
3. Creación de MDT tipo ráster a partir de la interpolación de los puntos *.LAS y otros elementos a tener en cuenta en el MDT como ríos, exclusión de vegetación, delimitación de contornos...

Una vez llevado a cabo el proceso se obtiene el MDT de la zona delimitada.

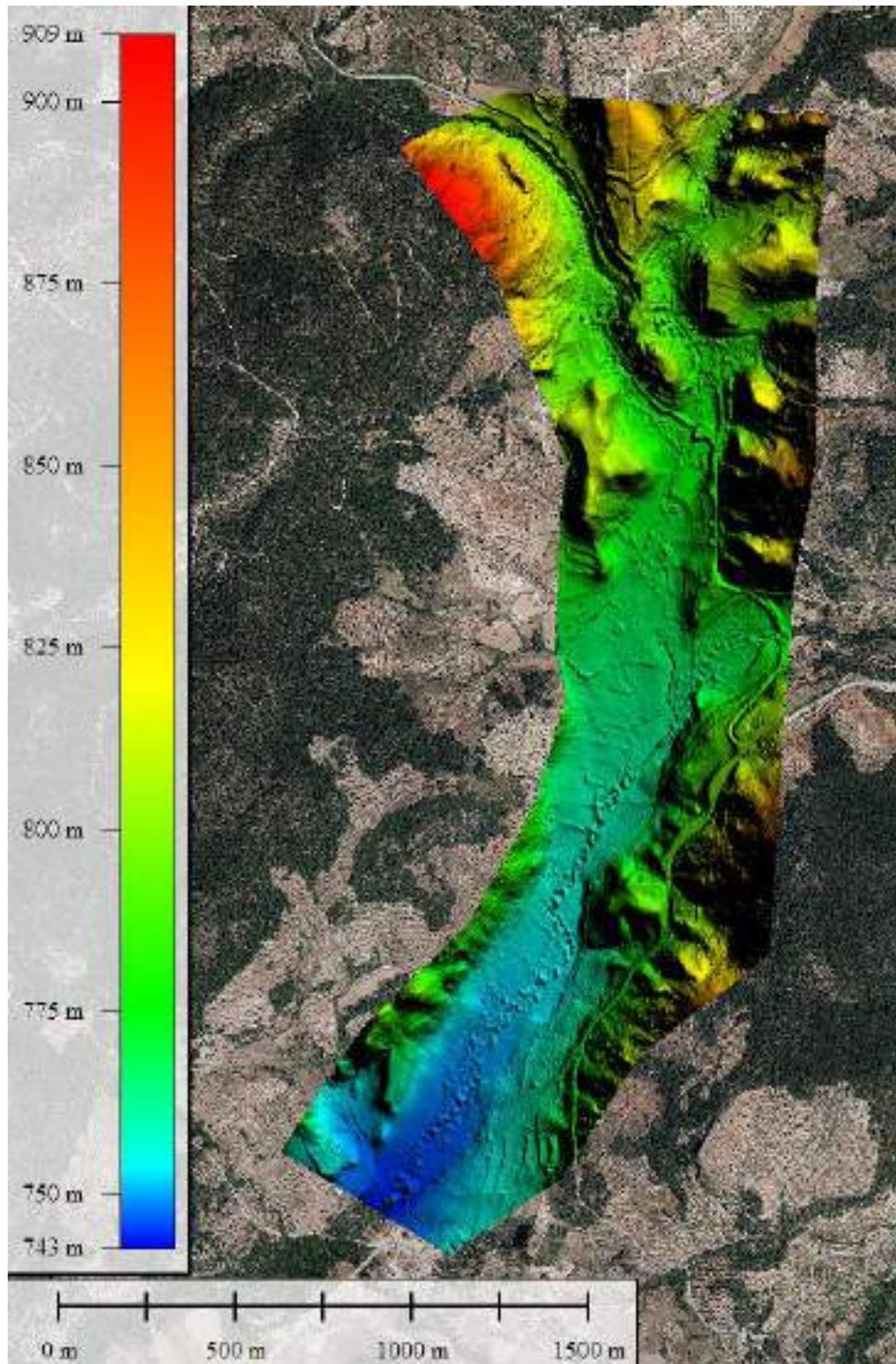


Imagen 3. MDT de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en SIG.



4.3. CARACTERÍSTICAS DEL CAUCE

El cauce del arroyo de las Vaquerizas desde el inicio del modelo hasta el final tiene una pendiente de 0,086 m/m y se caracteriza por tener una sección transversal amplia.

Aguas arriba del núcleo urbano presenta la siguiente sección:

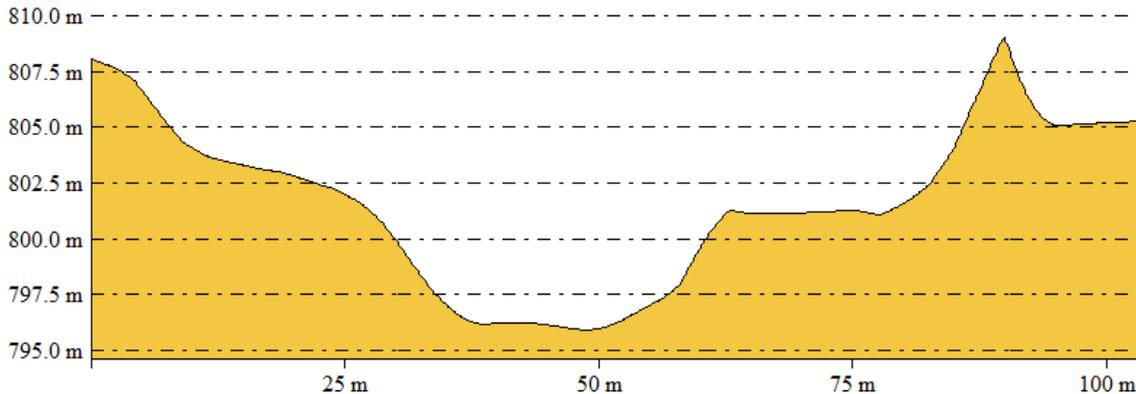


Imagen 4. Sección transversal del Aº de las Vaquerizas.

El cauce del arroyo de los Pajares tiene una pendiente de 0,1 m/m y presenta una sección transversal aguas arriba del núcleo urbano como se muestra a continuación:

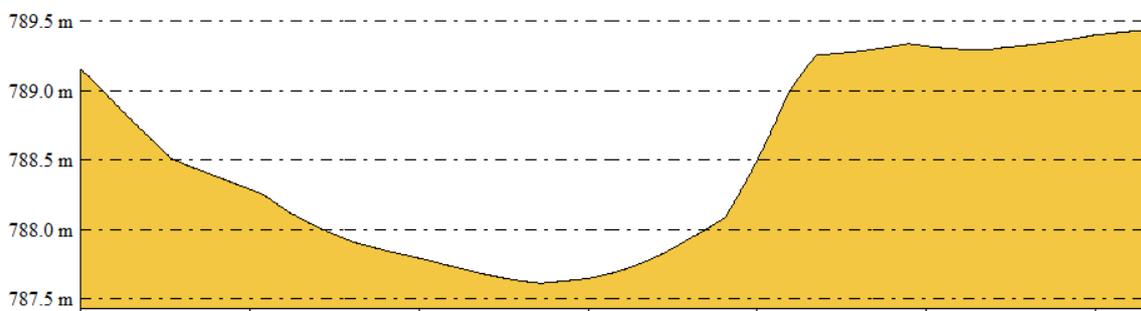


Imagen 5. Sección transversal del Aº de los Pajares.

4.4. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO

La rugosidad y uso del suelo de la zona de estudio tiene especial importancia a la hora de realizar un estudio hidrológico e hidráulico. Los usos del suelo de la zona de estudio se han determinado en base al mapa de ocupación del suelo en España, correspondiente al proyecto europeo Corine Land Cover y a fotografía aérea. Se han obtenido los siguientes usos del suelo con su correspondiente valor de rugosidad (coeficiente de Manning).



	Tipo suelo	Coefficiente de rugosidad de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$)
1	Cauce del río	0,025
2	Mosaico de cultivos	0,18
3	Olivares	0,12
4	Tejido urbano continuo	0,15
5	Terrenos regados permanentemente	0,05
6	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	0,08
7	Bosques de frondosas	0,12
8	Pastizales naturales	0,05

Tabla 4. Usos del suelo de la zona de estudio y rugosidad asignada.

4.5. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN

4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Para el estudio de inundabilidad se ha utilizado un método completo desarrollado por el software IBER 2.6. Se trata de un modelo bidimensional desarrollado por el grupo de investigación FLUMEN de la ETSECCPB de la Universidad Politécnica de Cataluña, que permite la simulación numérica en 2D de la lámina de agua en flujo variable. Este programa permite obtener los niveles de inundación de ríos, tiempo de propagación de la avenida, datos de calados y velocidades que permiten evaluar los riesgos asociados a la inundación.

Es necesario recurrir a un modelo bidimensional porque se trata de un cauce con una pendiente baja y amplias llanuras de inundación, para poder así, estudiar con más precisión la propagación de la avenida, y establecer correctamente los elementos afectados por la avenida del periodo de retorno considerado.

El modelo Iber consta de varios módulos de cálculo, entre ellos: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de IBER, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN
DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.

➤ **MÓDULO HIDRODINÁMICO.**

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. Dichas hipótesis se cumplen razonablemente para la evaluación de zonas inundables.

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h r_{sx}^*}{\partial x} + \frac{\partial h r_{xy}^*}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h r_{xy}^*}{\partial x} + \frac{\partial h r_{yy}^*}{\partial y} + M_y$$

Dónde h es el calado, U_x, U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, T_{exx}, T_{exy}, T_{eyy} son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s, M_x, M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Fricción de fondo

En las ecuaciones hidrodinámicas, se incluye como término fuente la fricción de fondo del siguiente modo:

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared, con la particularidad de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

fondo es elevada. La fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción u_f , que no es más que una forma de expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad:

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

Dónde:

τ_b es el módulo de la fuerza de fricción de fondo, y ρ es la densidad del agua.

En los modelos promediados en profundidad no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, tal y como se hace en los contornos tipo pared, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical. Por lo tanto, es necesario relacionar la velocidad de fricción u_f con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción. La tensión de fondo se puede expresar como:

$$\tau_b = \rho u_f^2 = \rho C_f |U|^2$$

Dónde:

C_f es el coeficiente de fricción de fondo. Existen diferentes expresiones que permiten aproximar el coeficiente de fricción C_f . La mayor parte de ellas asumen flujo uniforme en canal con un perfil logarítmico de velocidad en profundidad.

A diferencia de los modelos 1D, en los modelos 2D el radio hidráulico deja de definirse como área de la sección mojada entre perímetro mojado, ya que en 2D no tiene sentido el definir una sección transversal. Tomando una columna de fluido de anchura Δx y calado h , el radio hidráulico se calcularía como:

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h \Delta x}{\Delta x} = h$$

Por lo tanto, en los modelos 2D es lo mismo hablar de radio hidráulico y de calado.

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad:



$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

Rozamiento superficial por viento

El software permite tener en cuenta el rozamiento superficial por viento en las ecuaciones hidrodinámicas, sin embargo, debido a las características de la zona no es necesario tenerlo en cuenta.

Tensiones efectivas

Las tensiones efectivas horizontales que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas incluyen los efectos de las tensiones viscosas, de las tensiones turbulentas y los términos de dispersión debido a la no homogeneidad en profundidad del perfil de velocidad.

$$\tau_{ij}^e = \tau_{ij}^v - \overline{u_i' u_j'} + D_{ij}$$

en donde τ_{ij}^v son las tensiones viscosas, $\overline{u_i' u_j'}$ son las tensiones turbulentas (también llamadas tensiones de Reynolds), y D_{ij} son los términos de dispersión lateral: $v_{ij} \tau_{ji} u_i' u_j'$

$$D_{ij} = \frac{1}{h} \int_{z_0}^z (U_i - \bar{u}_i)(U_j - \bar{u}_j) dz$$

Las tensiones viscosas se calculan a partir de la viscosidad cinemática del fluido (ν) como:

$$\tau_{ij}^v = \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

En general, excepto cerca de las paredes, y excepto en flujo laminar, el orden de magnitud de las tensiones viscosas es mucho menor que el del resto de los términos que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas, razón por la cual no se han tenido en cuenta.

Las tensiones turbulentas son adquieren importancia especialmente en zonas de recirculación. En el caso de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales las tensiones turbulentas constituyen 3 nuevas incógnitas a calcular, que sumadas al calado y a las velocidades U_x , U_y producen un total de 6 incógnitas. Esto es lo que se conoce como problema de cierre de la



turbulencia, porque es necesario resolver un conjunto de 3 ecuaciones con 6 incógnitas. Debido a ello, es necesario utilizar un modelo de turbulencia que permita calcular dichas tensiones turbulentas. La mayoría de los modelos de turbulencia calculan los términos de difusión turbulenta a partir de la siguiente expresión:

$$-\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

Donde ν_t es la viscosidad turbulenta, que se calcula mediante el modelo de turbulencia. El problema radica en que no existe un modelo de turbulencia *universal*, que permita calcular de forma precisa las tensiones turbulentas, por lo que a lo largo del tiempo se han ido desarrollando diferentes modelos de mayor o menor complejidad. La formulación de Boussinesq es utilizada por todos los modelos de turbulencia incluidos en Iber. Sin embargo dato que no se producen importantes recirculaciones en la zona de estudio, no es necesario tener en cuenta en el modelo.

Condiciones de contorno hidrodinámicas

No se han incluido condiciones de contorno cerradas ya que no existe un contorno tipo pared, tampoco las condiciones de contorno internas ya que no existen estructuras hidráulicas tipo compuertas o vertederos. Por otro lado, las condiciones de salida han sido introducidas como flujo supercrítico y las condiciones de contorno de entrada se han introducido como el hidrograma de caudales que se muestran en los gráficos 1,2,3 y 4 en los elementos en los que se produce la entrada de caudal. La condición inicial es la de que el calado es 0 en toda la zona de estudio.

Infiltración

El software permite tener en cuenta la infiltración, sin embargo, se ha considerado el peor de los casos posibles en el que el terreno se encuentra totalmente saturado y no se producen pérdidas por infiltración.

➤ MÓDULO DE TURBULENCIA

A pesar de que prácticamente todos los flujos en ingeniería hidráulica son turbulentos, en determinados casos la turbulencia no es lo suficientemente alta como para tener una influencia notoria en el campo de velocidad media. Se incluyen los siguientes modelos de turbulencia para aguas someras, por orden creciente de complejidad:

- Viscosidad turbulenta constante
- Modelo parabólico



- Modelo de longitud de mezcla
- Modelo k-ε de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978)

El objetivo de los modelos de turbulencia es calcular las tensiones de Reynolds. En los modelos basados en la hipótesis de Boussinesq (todos los utilizados en Iber), las tensiones de Reynolds se evalúan a partir de la expresión:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

El modelo de turbulencia proporciona la viscosidad turbulenta para utilizarla en la expresión anterior.

En el caso que ocupa, no se ha tenido en cuenta la turbulencia.

➤ **MODELO DE TRANSPORTE SÓLIDO.**

El módulo de transporte sólido resuelve las ecuaciones de transporte de sedimentos no-cohesivos en régimen no estacionario. Se resuelven tanto las ecuaciones de transporte de fondo como las ecuaciones de transporte en suspensión, modelándose el acoplamiento entre la carga de fondo y la carga en suspensión mediante un término de sedimentación/resuspensión. El módulo de transporte de sedimentos utiliza el campo de velocidades, calados y de turbulencia proporcionado por los módulos hidrodinámicos y de turbulencia. El caudal sólido de fondo se calcula mediante una formulación empírica, pudiéndose elegir entre la formulación de Meyer-Peter Muller y la de Van Rijn. El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación de transporte turbulento promediada en profundidad.

No se ha empleado el modelo de transporte sólido ya que en el tramo de estudio las pendientes son muy bajas, y las velocidades en el exterior del propio cauce no son elevadas, por tanto, los daños que se pueden ocasionar son producidos por el elevado calado, no por el transporte de sedimentos, ni por la elevada velocidad.

➤ **ESQUEMAS NUMÉRICOS.**

Tanto las ecuaciones hidrodinámicas (ecuaciones de aguas someras bidimensionales), como las correspondientes a los modelos de turbulencia y de transporte de sedimentos, se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos.



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL PLAN DE DELIMITACIÓN DE SUELO URBANO DE VILLAVERDE DE GUADALIMAR



EXPEDIENTE: PJ2112-0176

Las características de los esquemas numéricos utilizados en todos los módulos de Iber son las siguientes:

- Esquemas en volúmenes finitos, planteados en forma integral y conservativa.
- Mallado no-estructurado. Mallas formadas por elementos de 3 y 4 lados
- Capacidad de resolver flujo rápidamente variado (régimen subcrítico, supercrítico, cambios de régimen, etc.).
- Capacidad de resolver flujo rápidamente variable (resaltos móviles, ondas de choque no estacionarias, etc.)
- Resolución de las ecuaciones hidrodinámicas mediante esquemas descentrados tipo Roe de alta resolución (orden superior a 1 y no oscilatorios).
- Tratamiento descentrado del término fuente pendiente del fondo.
- Tratamiento centrado del resto de términos fuente.
- Esquemas de orden 1 y orden 2 por líneas de precisión en espacio.
- Esquemas explícitos en tiempo.
- Tratamiento de frentes seco-mojado no estacionarios mediante esquemas estables y conservativos (sin pérdida de masa).

4.6. ESCALAS DE TRABAJO

El software IBER 2.6, permite la creación de un MDT (Modelo Digital del Terreno) a partir de una malla formada por redes irregulares de triángulos conocidos como TIN (Triangular Irregular Network).

Este MDT ha sido obtenido a partir de datos LIDAR, como ha sido explicado con anterioridad. Para generar la malla en Iber a partir de un MDT es necesario que este modelo sea un archivo de texto *.txt o *.asc.

La malla es uno de los elementos más importantes para el análisis puesto que dependiendo del tamaño y del número de elementos, este cálculo será más o menos preciso, así como, requerirá más o menos tiempo para su cálculo. Por lo que hay que buscar el equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo para obtener una malla con un tamaño de elementos adecuado.



En este caso se ha optado por generar una malla con un tamaño de elemento de lado máximo 10 metros y lado mínimo 1 metro, con una tolerancia de 0.2 metros. Esto quiere decir que cuando exista una variación de cota de 0.2 metros o superior entre puntos, se tomarán elementos con 1 metro de lado. En cuanto al resto de elementos, su tamaño varía de forma proporcional a la variación de cota entre 1 y 10 metros.

4.7. PROCESO EN IBER

Para llevar a cabo la simulación en IBER se han seguido los siguientes pasos (poner imagen):

1. Creación de la geometría RTIN a partir de archivo MDT en formato *.txt.
2. Colapsar geometría.
3. Determinación de las condiciones de contorno.
 - a. De entrada: hidrograma.
 - b. De salida: Flujo supercrítico.
4. Determinación de las condiciones iniciales: cota calado 0.00 m.
5. Generación de malla.
6. Asignación de rugosidad (coeficiente de Manning)
7. Calcular.
8. Post-proceso: visualizar resultados.

5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Este estudio se ha realizado para las avenidas de 100 y 500 años de periodo de retorno.

Para la presentación de resultados, se han elaborado mapas de calado máximo, velocidad máxima y peligrosidad con los resultados del software IBER 2.6 para las avenidas de periodo de retorno consideradsa. Estos resultados se muestran en el conjunto de planos del **APÉNDICE 1. PLANOS ESTUDIO DE INUNDABILIDAD.**

Añadir que, el mapa de peligrosidad representa el producto de calado por velocidad en cada punto.

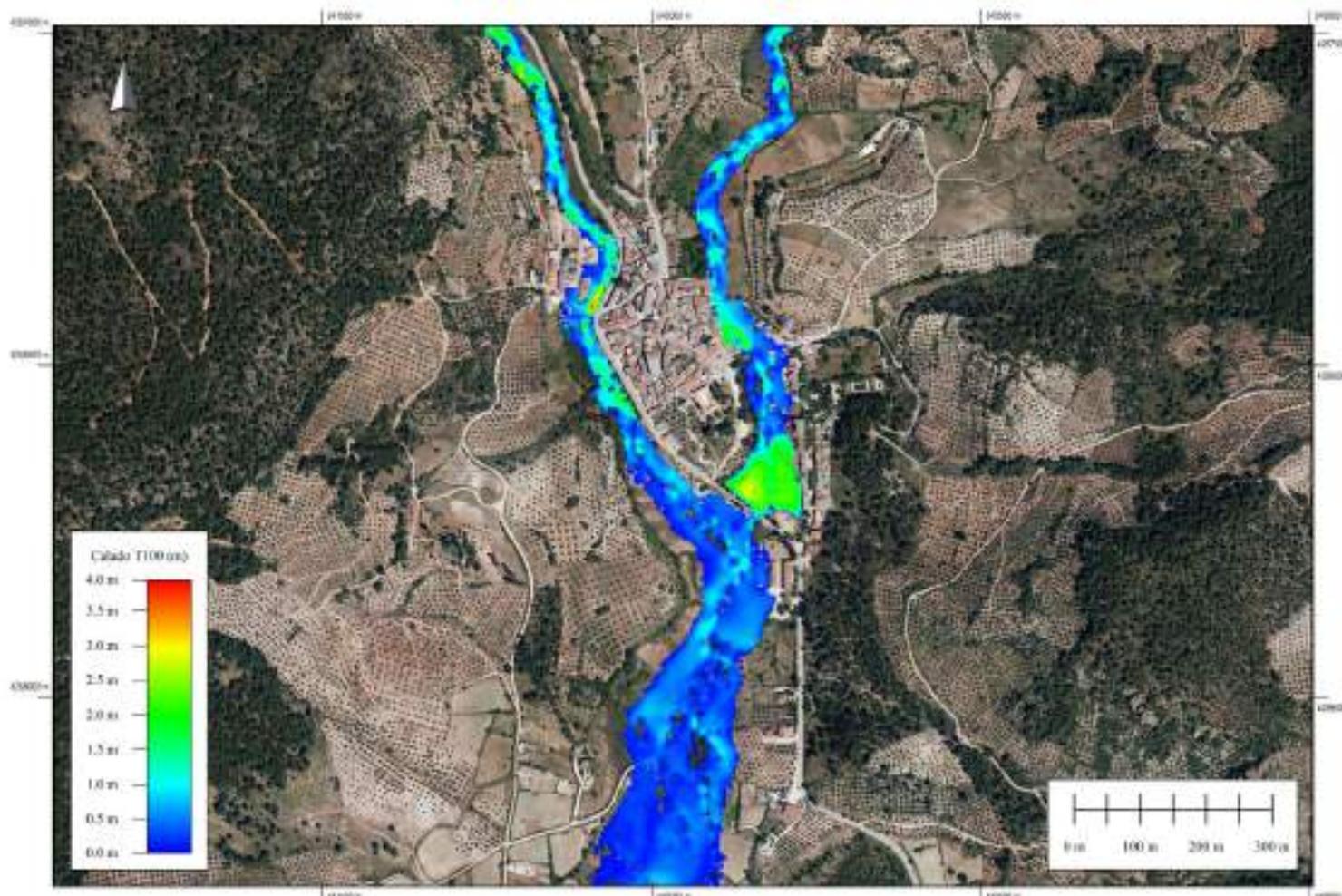
A continuación, se muestra un resumen con los principales resultados obtenidos del programa IBER.



5.1. MAPAS DE INUNDABILIDAD. DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES Y DE FLUJO PREFERENTE

5.1.1. T100

A. MÁXIMO CALADO



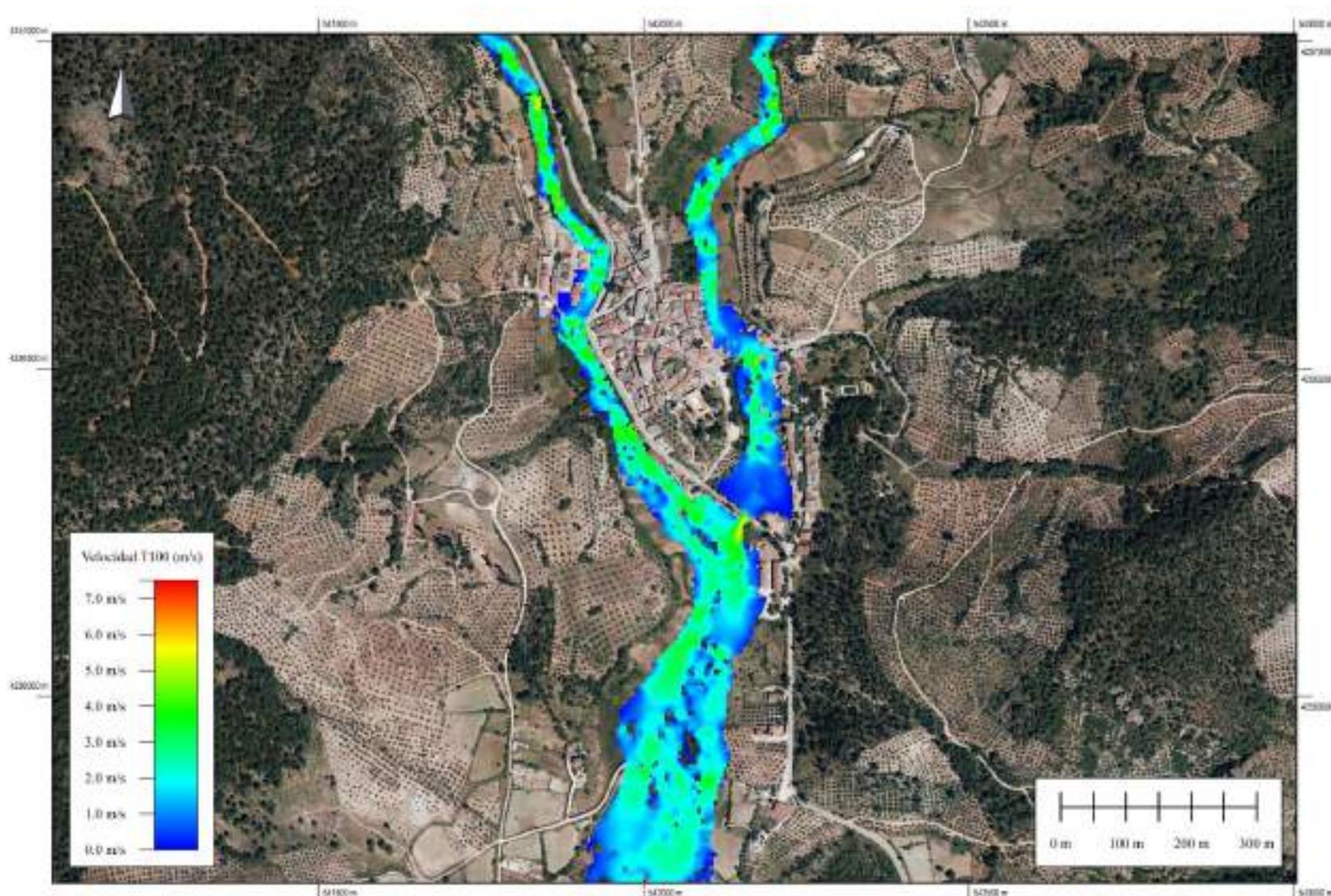
VILLAVERDE DE GUADALIMAR (ALBACETE)

MAYO - 2022

Página - 23 - de - 31 -



B. MÁXIMA VELOCIDAD



VILLAVERDE DE GUADALIMAR (ALBACETE)

MAYO - 2022

Página - 24 - de - 31 -