

PROYECTO

ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA

CUENCA DEL TOLLO

Trabajo Final de Grado

Ciencias Ambientales

Autor: Tomás Gómez Cerdán

Tutores: Ignacio Gómez Lucas

Ignacio Meléndez Pastor

Facultad de Ciencias Experimentales

CÓDIGO COIR: TFG.GCA.IGL.TGC.230216

17/02/2023



Título: Estudio de inundabilidad de la cuenca del Tollo.

Resumen: Los eventos de inundación y las precipitaciones extremas son riesgos climáticos que se extienden a lo largo de todo el planeta y que pueden llegar a causar daños de importancia a las personas y las infraestructuras. Estos fenómenos se han visto acrecentados por cambio climático y, aunque existe incertidumbre al respecto, son muchos los estudios que apuntan la relación entre este fenómeno y el aumento en la ocurrencia de las inundaciones. Esto plantea un escenario de actuación inmediata y se plantean medidas y herramientas para reducir y cuantificar la vulnerabilidad y el riesgo de las poblaciones con el fin de hacer frente a fenómenos de esta naturaleza.

Una de las herramientas clave para el desarrollo de zonas vulnerables a inundaciones son los Sistemas de Información Geográfica. Con ellos se pueden desarrollar cartografía de las zonas de peligro a partir de características topográficas, geomorfológicas, hidrológica y climáticas y definir Mapas de Peligro de Inundaciones.

Palabras clave: riesgo de inundación, cartografía, modelización de cuencas, SIG.

Title: Flooding study of the Tollo basin.

Abstract: Flood events and heavy precipitation are climatic risks that are widespread throughout the planet and can cause significant damage to people and infrastructure. These phenomena have been exacerbated by climate change and, although there is uncertainty in this regard, many studies point to the relationship between this phenomenon and the increase in flooding. This presents a scenario for immediate action where measures and tools are proposed to reduce and quantify the vulnerability and risk of communities in order to cope with phenomena of this nature.

One of the key tools for the development of areas that are vulnerable to flooding are Geographic Information Systems. With them, it is possible to develop cartography of hazard zones based on topographic, geomorphological, hydrological and climatic characteristics and to define Flood Hazard Maps.

Keywords: flood risk, cartography, basin modeling, GIS.



Agradecimientos

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de estos años de estudio en la Universidad.

Me gustaría agradecer en primer lugar a mis padres, gracias a ellos estoy aquí ahora, y la ayuda sin la cual no hubiera sido posible todo esto. Agradecerles, no sólo el apoyo en este periodo de mi vida, si no todo el apoyo brindado a lo largo de los años, en los buenos, y en los malos momentos.

Agradecer especialmente a mi hermana María, que siempre me ha animado a continuar y uno de los pilares fundamentales de mi vida.

Agradecer también, a los tutores Ignacio Meléndez e Ignacio Gómez por su atención y por brindarme la posibilidad de realizar el proyecto con margen de elaboración, a pesar del trabajo extra que para ellos supone.

Por todo, daros las gracias.





Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MARCO LEGAL	2
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS	5
3.1. MARCO GEOGRÁFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.	5
3.1.1. <i>Climatología</i>	5
3.1.2. <i>Hidrología</i>	7
3.1.3. <i>Geología</i>	8
3.1.4. <i>Vegetación y usos del suelo</i>	11
3.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO Y DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
3.2.1. <i>Procedimiento de estudio</i>	11
3.2.2. <i>Datos de partida</i>	12
3.2.3. <i>Procesamiento de datos</i>	15
3.2.4. <i>Cálculo de caudales con el Método Racional</i>	16
3.3. ESTUDIO HIDRÁULICO	17
3.3.1. <i>Creación del modelo</i>	19
3.3.2. <i>Geometría del modelo</i>	19
3.3.3. <i>IBER</i>	21
4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO	22
4.1. PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS	22
4.2. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS	24
4.3. PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS	26
4.4. COMPARATIVA DE CALADOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.	27
4.5. DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES.....	28
4.6. CÁLCULO DE LA ZONA DE FLUJO PREFERENTE (ZFP).....	29
4.6.1. <i>Cálculo de la Zona de Inundación Peligrosa (ZIP)</i>	30
4.6.2. <i>Vía de Intenso Desagüe (VID)</i>	30
4.6.3. <i>Zona de Flujo Preferente (ZFP)</i>	31
4.7. RIESGOS	32
5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA	33



6. BIBLIOGRAFÍA	34
7. ANEXO I. RESULTADOS CARTOGRÁFICOS Y REPOSITORIO DE IMÁGENES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	36





1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales son procesos naturales desarrollados periódicamente, y que contribuyen notablemente al modelado de valles, vegas y riberas por parte de los ríos y barrancos que drenan las cuencas fluviales asociadas.

Desde que se produjo el proceso de sedentarización de las poblaciones humanas y el desarrollo de la agricultura, el control de las inundaciones supuso uno de los grandes problemas a afrontar, pues suponían una grave amenaza para el desarrollo de las comunidades y el desarrollo agrícola.

Es conocido que los egipcios y la antigua Mesopotamia construyeron diferentes defensas contra las inundaciones fluviales como diques y canales para desviar el agua, no sólo como protección, sino también como forma de acumularla y hacerla más accesible para su uso. En Grecia, Roma y China también se desarrollaron este tipo de estructuras, con considerables avances. En la actualidad el desarrollo de tecnologías y el amplio conocimiento de este fenómeno ha permitido una mejor gestión de los riesgos asociados a las inundaciones, sobre todo en países desarrollados. Estas tecnologías se basan en diques, embalses y presas, puentes, barreras metálicas y la mejora de las capacidades de desagüe de los cauces fluviales, entre otros (Gascón, 2005).

Otras formas de defensa son los sistemas de predicción meteorológica, que actúan como sistemas de alerta frente a situaciones de peligro y permiten una actuación anticipada ante cualquier fenómeno de inundación.

En España, las inundaciones son la catástrofe natural que mayores daños generan, tanto materiales como en pérdida de vidas humanas, conservándose gran número de referencias históricas. Los daños por inundación se extienden prácticamente por todo el territorio nacional, con mayor o menor frecuencia e intensidad según las zonas.

Cada año se producen en España una media de diez episodios graves de inundación. Según el Consorcio de Compensación de Seguros y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias, en España las inundaciones han causado la muerte de 312 personas en los últimos 20 años, y daños materiales por valor de 800 millones de euros al año (MITECO, 2019).

Las indemnizaciones por daños materiales causados por las inundaciones, sin incluir explotaciones agrarias, ascendieron a 5.564 millones de euros entre 1971 y 2015 (4.564 millones de euros entre 1987 y 2015). En contraste con estas cifras, sólo entre los años 1.990 y 2.000, los daños causados por los eventos meteorológicos (pedrisco, heladas, vendavales, sequías, inundaciones, etc.) sobre la agricultura ascendieron a la cifra de 6.195 millones de euros, pudiendo atribuirse a las inundaciones, de acuerdo con las conclusiones de la Conferencia de las Naciones Unidas para la Reducción de los



Riesgos de Desastres (Sendai, marzo de 2015), del orden del 60% (3.692 millones de euros) de esa cifra (WDRR, 2015).

De acuerdo con el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) desarrollado para dar cumplimiento a la Directiva de Inundaciones, se estima que alrededor de un 60% de la superficie de las zonas inundables (631.184 ha) en las denominadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) se corresponden con terrenos agrícolas, bien de regadío o de secano (MITECO, 2023).

Uno de los objetivos básicos en la gestión integral del riesgo de inundación es la mitigación del mismo mediante la aplicación de un conjunto de medidas planificadas coordinadamente con las que se consiga reducir los daños causados por las inundaciones y acelerar los tiempos de recuperación y vuelta a la normalidad, evitando producir daños a terceros y generar nuevos riesgos, así como exponerse a ellos. En definitiva, construir una sociedad más resiliente, capaz de soportar y recuperarse de estos desastres. La siguiente frase resume el tipo de acciones que se deben emprender, cada uno desde el ejercicio de su responsabilidad: “Adaptación al riesgo de inundación: Prevención, protección, preparación y recuperación” (MITECO, 2019).

Mención especial tiene el desarrollo de la legislación en cuanto a la ordenación del territorio y los procesos de inundaciones y el desarrollo de la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ofrecen una herramienta para el análisis y la gestión de los riesgos de inundaciones fluviales. Entre otros, permite el estudio de la peligrosidad, obtención de redes de drenaje, regionalización de las precipitaciones, delimitación de área de inundación y la creación de cartografía de riesgos. Como ejemplo, buena parte de este estudio se ha desarrollado mediante sistemas de información geográfica.

Los fenómenos relacionados con las inundaciones son cada vez más frecuentes y se dan en todas las partes del planeta.

1.1. Marco legal

A continuación, se presentan algunos de los aspectos legales más relevantes de las zonas inundables, según se establecen el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico (MITECO, 2023).

Marco Legal de las Zonas Inundables, de acuerdo con el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Las zonas inundables se definen en la legislación de aguas, suelo y ordenación territorial y protección civil, siendo todas ellas coordinadas mediante el Real Decreto 903/2010 de evaluación y



gestión de riesgos de inundación que transpone la Directiva 2007/60, sobre la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

El Texto Refundido de la Ley de Aguas introduce el concepto de “zona inundable” en el artículo 11 como los terrenos que pueden resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos, los cuales conservarán la calificación jurídica y la titularidad dominical que tuvieren.

Esta definición es precisada por el Reglamento del DPH, que define la “zona inundable” en su artículo 14, considerando zonas inundables las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo periodo estadístico de retorno sea de quinientos años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas.

El Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Suelo, establece en su artículo 12 que se encontrarán en suelo rural, entre otros, los suelos con riesgos naturales incluidos los de inundación o de otros accidentes graves, y cuantos otros prevean la legislación de ordenación territorial o urbanística. Esto ha llevado a que las Comunidades Autónomas, en base a estas necesidades hayan elaborado cartografía de zonas inundables para cumplir estos requisitos.

En materia de Protección Civil, las inundaciones se regulan mediante la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, siendo las Comunidades Autónomas las que la desarrollan a través de Planes Territoriales de Inundaciones, que son homologados por la Comisión Nacional de Protección Civil identificando y clasificando las áreas inundables del territorio con arreglo a los criterios siguientes:

- Zona de inundación frecuente: zonas inundables para avenidas de periodo de retorno de cincuenta años.
- Zonas de inundación ocasional: zonas inundables para avenidas de periodo de retorno entre cincuenta y cien años.
- Zonas de inundación excepcional: zonas inundables para avenidas de periodo de retorno entre cien y quinientos años.

Por último, la Comisión Europea aprobó en noviembre de 2007 la Directiva 2007/60, sobre la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, lo que supone un modelo para gestionar este tipo de riesgos, y que ha sido transpuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación. En este Real Decreto se define en artículo 3, como zona inundable a los terrenos que puedan resultar inundados por los niveles teóricos que alcanzarían las



aguas en las avenidas cuyo periodo estadístico de retorno sea de 500 años y establece la necesidad de identificar las zonas con mayor riesgo de inundación, denominadas como áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSIS) y de realizar en ellas mapas de peligrosidad y riesgo de inundación de los siguientes escenarios:

- Alta probabilidad de inundación, cuando proceda.
- Probabilidad media de inundación (periodo de retorno mayor o igual a 100 años).
- Baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos (periodo de retorno igual a 500 años).

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

En el presente estudio nos centraremos en el municipio de Fuente-Álamo, en la provincia de Albacete, debido a las inundaciones acontecidas en las últimas décadas y pretende dar vista a los problemas de inundaciones y escorrentía de la zona.

El último fenómeno de precipitaciones que causaron inundaciones en el municipio se remonta al año 2021, en el que se produjeron graves inundaciones y daños en los cultivos, fuente principal de la economía de la zona.

Muchos medios de la región dieron eco de la noticia, como Castilla La-Mancha televisión.

El presidente de la Diputación de Albacete y el delegado provincial de Agricultura en Albacete visitaron la zona para ver de primera los efectos de la tormenta. Otros medios, a través de internet también comentaron lo acontecido y lo publicaron en sus páginas. Aquí algunas de las publicaciones:

- <https://www.cmmedia.es/noticias/castilla-la-mancha/lluvias-torrencales-fuente-alamo-albacete-han-afectado-mas-60-millones-kilos-uva.html>
- <https://albacetecapital.com/videos-inundaciones-y-danos-en-cultivos-en-fuente-alamo-y-viveros-por-la-fuerte-tormenta/>
- <https://www.dclm.es/noticias/121758/cabanero-comprueba-los-danos-causados-por-el-granizo-en-fuente-alamo>
- <https://www.albaceteabierto.es/noticia/50459/provincia/recuento-de-los-importantes-danos-sufridos-en-viveros-y-fuente-alamo-debido-a-las-ultimas-tormentas.html>

Si nos remontamos dos años antes, al 2019, otro episodio de inundaciones se produjo en la zona, debido a la gota fría. En este caso los daños y pérdidas también fueron numerosos y las pérdidas considerables.



- <https://www.latribunadealbacete.es/Noticia/zb6c10506-c563-3915-76ce6753c25df0d0/201909/La-DANA-tambien-golpeo-a-las-industrias-de-Albacete>

Antecedentes como estos ponen de relevancia el necesario estudio de la zona con el fin de establecer las zonas de peligro y evitar daños humanos, materiales y medioambientales.

Es necesario, si se pretende realizar un estudio de estas características, conocer ciertas particularidades de la zona como la climatología, hidrología, geología, edafología, vegetación y geomorfología.

A continuación, se procederá a analizar cada uno de los puntos en la metodología para la elaboración de cartografía de zonas inundables.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se procederá a realizar una descripción del marco geográfico del área de estudio, presentado las características más destacadas del medio físico y cubiertas/ usos del suelo. Seguidamente se presenta el estudio hidrológico realizado como base para la delimitación de la zona de estudio. Finaliza esta sección con el estudio hidráulico necesario para proceder a la modelización de la inundabilidad en la zona de estudio.

3.1. Marco geográfico del área de estudio.

3.1.1. Climatología

El clima de la zona se clasifica como continental moderado, con inviernos no muy fríos y con veranos secos y calurosos. Las lluvias son generalmente de carácter torrencial, factor importante en cuanto a la pérdida de suelo, acompañado en algunos casos de granizadas. Las nevadas ocurren sobre todo en las zonas más altas de la región. El viento generalmente de poniente y seco (caluroso en verano y frío en invierno). El viento de levante, menos regular, resulta más húmedo y fresco.

Análisis Pluviométrico y termométrico:

De acuerdo con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2023) la pluviometría en la zona (Tabla 1) no es muy abundante, con una precipitación media de 341 mm anuales y número de días con precipitación significativa ligeramente inferior a 50 días.

**Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo**

Tabla 1. Características pluviométricas del área de estudio. Fuente: AEMET, 2010.

Variables pluviométricas	Media	Desviación
Número medio de días con precipitación superior a 30 mm anual	1,4	0,1
Número medio de días con precipitación superior a 10 mm anual	10,7	0,6
Número medio de días con precipitación superior a 0,1 mm anual	48,4	1,5
Precipitación media anual (mm)	341	8

En el siguiente mapa (Figura 1) se puede apreciar el acusado carácter de bajas precipitaciones del sureste peninsular, donde se encuentra ubicada la zona de estudio.

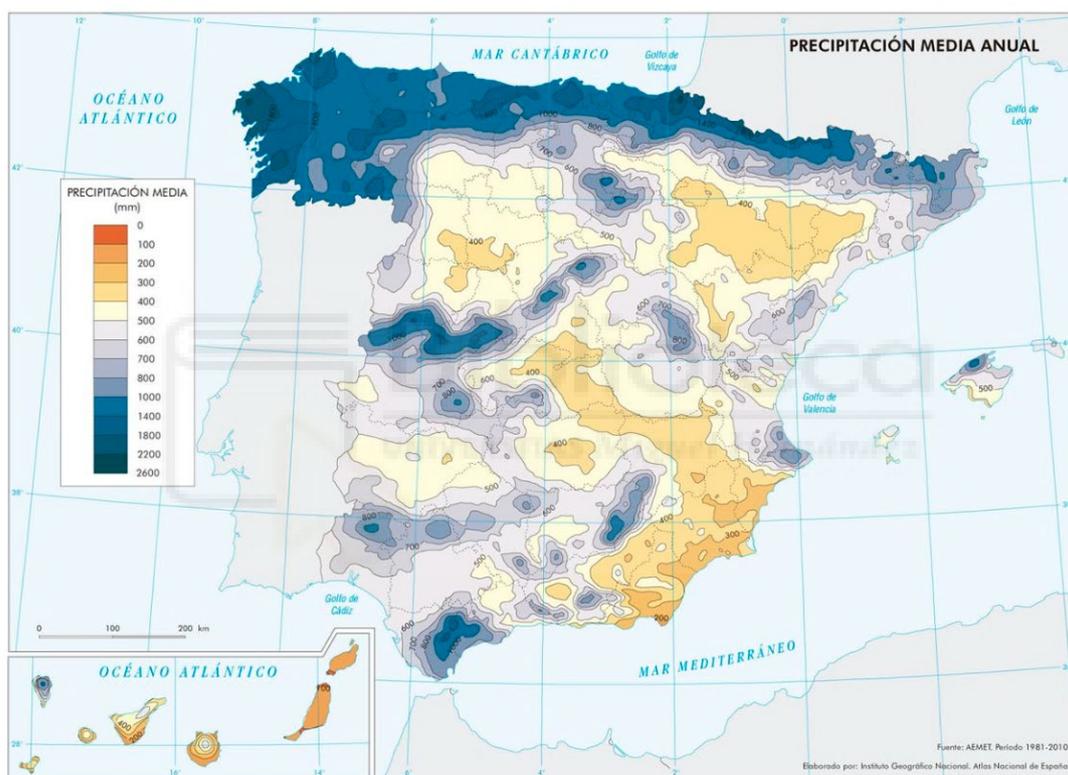


Figura 1. Precipitación media anual España (1981-2010). Fuente: AEMET, 2010

En relación con la termometría, la AEMET obtiene los siguientes registros (Tabla 1):

Tabla 2. Características termométricas del área de estudio. Fuente: AEMET, 2010.

Nombre del mapa	Media	Desviación
Número medio de días con temperatura mínima $\leq 0^{\circ}$ C anual	49,0	5,0
Número medio de días con temperatura máxima $\geq 25^{\circ}$ C anual	130,4	1,4
Temperatura media de las mínimas anual ($^{\circ}$ C)	7,4	0,4
Temperatura media de las máximas anual ($^{\circ}$ C)	20,4	0,3
Temperatura media anual ($^{\circ}$ C)	13,9	0,3



En la siguiente imagen (Figura 2) se puede apreciar la notable diferencia térmica del sur y sureste peninsular en comparación con la zona septentrional de la península ibérica.

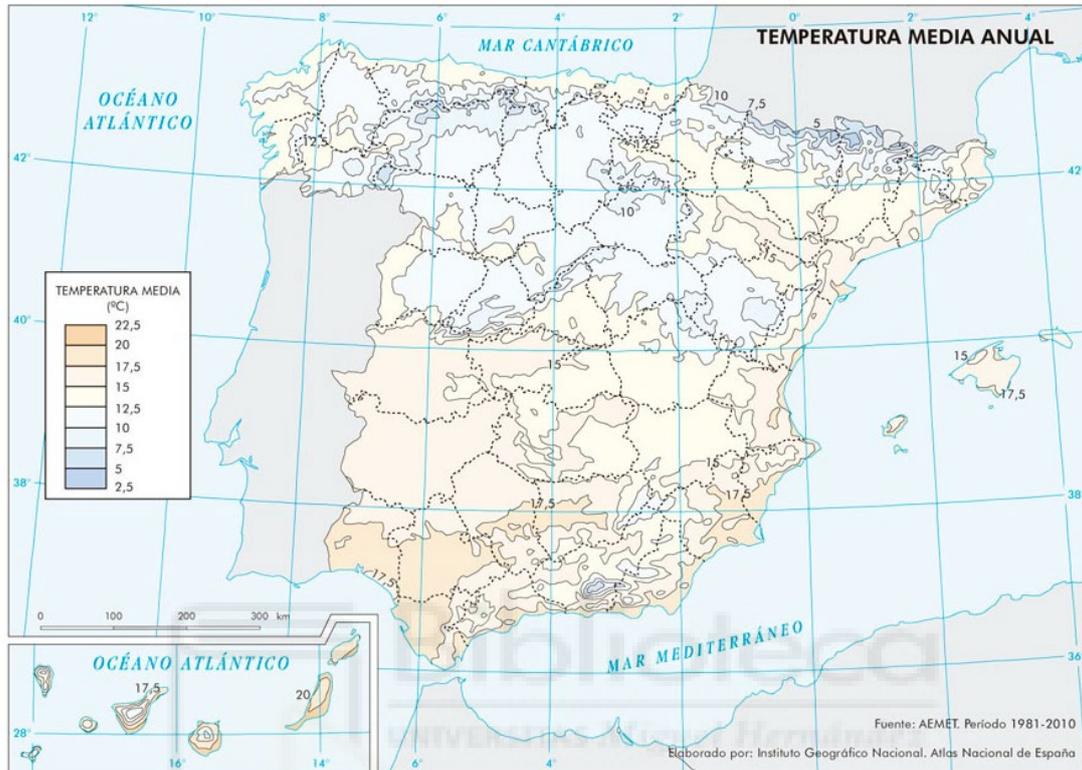


Figura 2. Temperatura media anual España (1981-2010). Fuente: AEMET, 2010

3.1.2. Hidrología

Cabe diferenciar entre hidrología superficial e hidrología subterránea. Respecto a la primera, aparecen cursos de pequeña importancia y caudal irregular, limitándose a ramblas secas durante la mayor parte del año, con avenidas casuales en eventos torrenciales. Las escasas pendientes hacen que las corrientes que se puedan generar en estas avenidas se estanquen en las depresiones de los campos, permitiendo que parte del agua se filtre o se evaporen sin llegar a generar un cauce continuo en el tiempo. No en nuestro caso donde, aunque no existe una pendiente muy pronunciada, la cuenca vertiente es lo suficientemente amplia como para recoger la cantidad necesaria de agua para causar inundaciones. Respecto a la hidrografía subterránea, el área de estudio se asienta sobre dos acuíferos subterráneos: el primero, que representa la mitad norte, se denomina ‘Sinclinal de la Higuera’. El segundo se denomina ‘Ontur’, representa la mitad sur, ambos en mal estado cuantitativo.



3.1.3. Geología

Nuestra área de trabajo incluye varios términos municipales; se asienta en su gran mayoría sobre Fuente-álamo, pero también recaen pequeñas zonas en Pétrola, Corral Rubio y Montealegre.

El término de Fuente-álamo, está situado en el límite norte de la provincia de Murcia, constituyendo un escalón de acceso a la Meseta Central. La zona que nos ocupa, está caracterizada por una gran cubeta sinclinal con depósitos de arenas y arcillas del Eocretáceo Albense y calizas neríticas con margas calcáreas fosilíferas del Aptense superior arcillas y arenas en facies wealdense del Aptense inferior, tierras arcillo-sabulosas del Cuaternario y margas y calizas margosas del Barremiense (García, 1999).

Los cauces estudiados discurren en su mayoría por zonas con conglomerados, areniscas y arcillas con ocasionales niveles de calizas y brechas.

En suelos donde ha predominado el arrastre de sedimentos (como es nuestro caso), el cultivo dominante es el viñedo. En Fuente-álamo el cultivo de la vid supone el 40% de la tierra de cultivo.

De acuerdo al mapa geológico del IGME (IGME, 2023), la geología de la zona se representa (Figura 3):

62: calizas, margocalizas y margas.

68: calizas oolíticas, pisolíticas y oncolíticas y calizas parcialmente dolomitizadas.

69: calizas con gasterópodos.

73: areniscas, calizas arenosas, calcarenitas oolíticas y arcillas.

98: areniscas y arcillas con ocasionales niveles de conglomerados.

114: calizas con toucasias.

126: arenas, arcillas y conglomerados.

153: dolomías y calizas amarillentas con grandes orbitolinas.

277: conglomerados, areniscas y arcillas ocasionales pasadas de calizas.

310: calcarenitas, biocalcarenitas y calizas con ocasionales niveles de margas arenosas y conglomerados basales.

313: margas blancas, areniscas y conglomerados.

358: conglomerados, areniscas y arcillas con ocasionales niveles de calizas y brechas.

362: costras calcáreas.

366: eluvial, coluvial.

397: depósitos aluviales, fondo de valle.



Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo

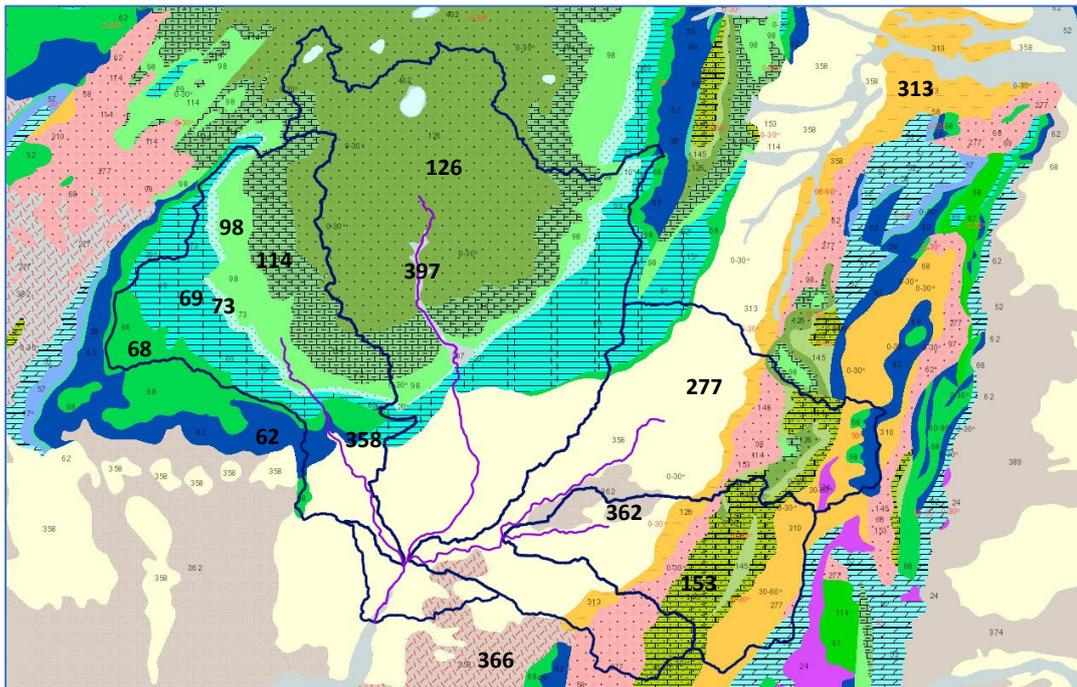
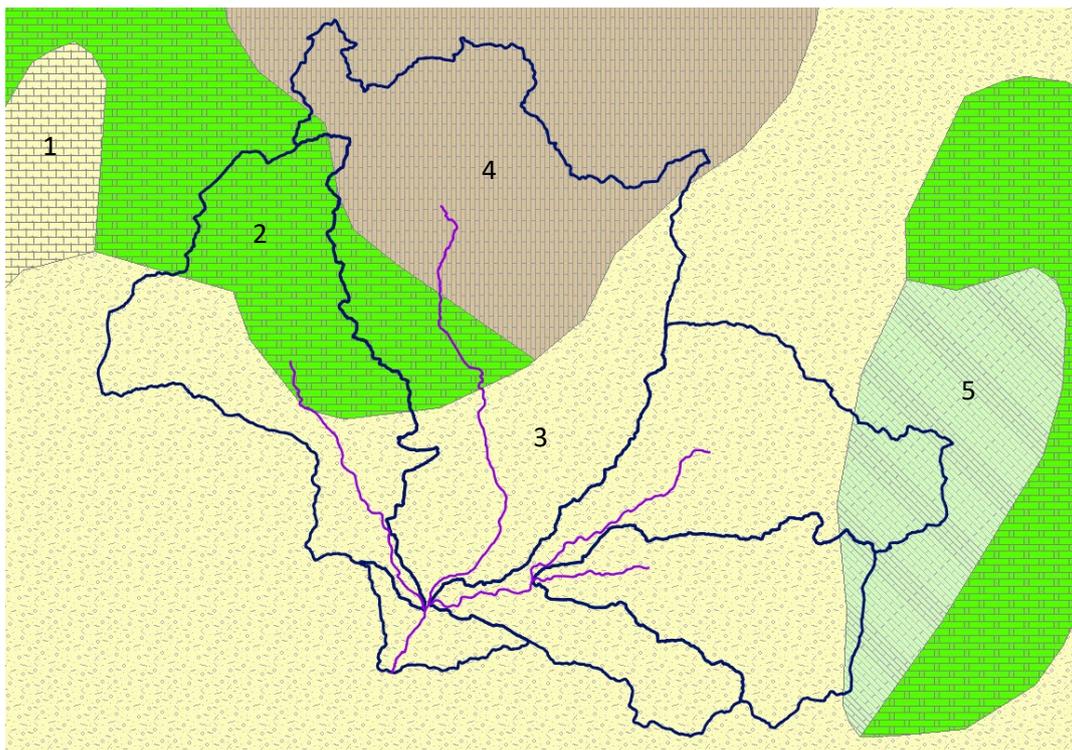


Figura 3. Geología del área de estudio. Fuente: IGME. Hoja MAGNA 818.

En cuanto a la hidrogeología del área de estudio (Figura 4), nos encontramos con que los cauces discurren principalmente por gravas, arenas, limos y arcillas. Corresponden con formaciones generalmente extensas, en general de baja permeabilidad y que pueden albergar acuíferos en profundidad de mayor permeabilidad y productividad, incluso de interés regional.





- 1 "Sinclinal de la Higuera": calizas, margocalizas, margas, conglomerados
- 2 "Sinclinal de la Higuera": calizas y dolomías
- 3 "Sinclinal de la Higuera": gravas, arenas, limos y arcillas
- 4 "Sinclinal de la Higuera": margocalizas, calizas, margas, arcillas y arenas
- 5 "Ontur": calizas, margocalizas con intercalaciones detríticas

Figura 4. Mapa hidrogeológico del área de estudio. Fuente: IGME. Hoja 63 Mapa de Unidades cronolitoestratigráficas.

Respecto a la erosión de los cauces (Figura 5), el MAPAMA hace una clasificación en la que clasifica la erosión de la zona como media.

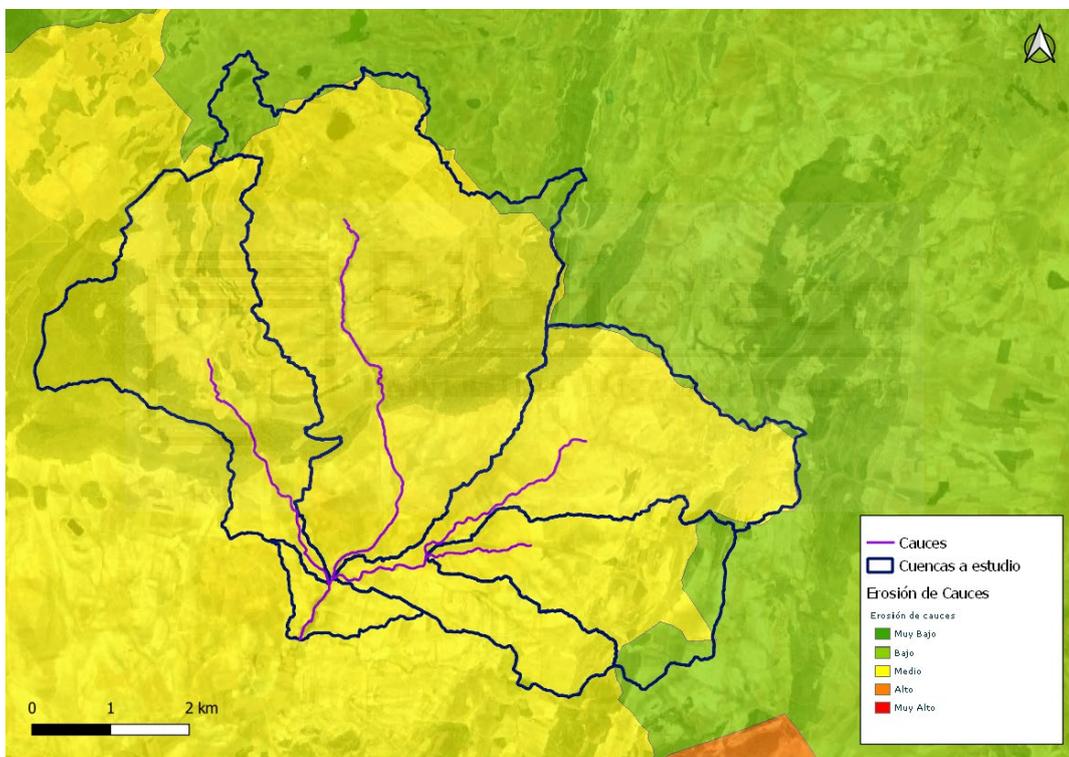


Figura 5. Mapa de niveles de erosión de cauces. Fuente: MAPAMA (2023).

Una vez en campo, se ha podido apreciar que la erosión debida a los cauces podría ser mayor, pues se pueden apreciar grandes arrastres de sedimentos y cárcavas considerables (ANEXO I. Resultados cartográficos y repositorio de imágenes del área de estudio).



3.1.4. Vegetación y usos del suelo

La vegetación natural de la zona está compuesta por especies xerófilas y esclerófilas, representada sobre en especies arbustivas como la coscoja, el lentisco, el tomillo y el romero. También el esparto ocupa una gran extensión en el municipio por su importancia económica y sobre la que se realizaron varias repoblaciones, pero la zona que nos ocupa está asentada en su mayoría por cultivos de secano, en especial, de vid. También aparecen formaciones arbóreas por *Quercus ilex* o encinas y pino carrasco (*Pinus halepensis*) que ha sufrido una intensa deforestación resultado de un aprovechamiento máximo del suelo para la agricultura. (García, 1999).

La vegetación potencial a esperar son coscojares (*Quercus coccifera*) y esparragueras, con mezcla de enebro, lentisco y pino carrasco. Por la degradación se instalan espartales (*Stipa tenacissima*) y tomillares (*Tymus sp.*) (Rivas-Martínez, 1987)

Como dato: el estado actual de la vegetación de la zona es dado por la selección de la *Stipa tenacissima* con fines económicos hace años, orientándose la producción al esparto con la consiguiente degradación de los montes. Una vez que dejó de tener valor, se pasó al uso abusivo de estas zonas como pastos, que produjeron la práctica desaparición de las leguminosas. Una consecuencia directa de la desaparición de estas especies supone la pérdida de suelo fértil por erosión hídrica y arrastre de sedimentos, uno de los factores más importantes en la degradación del suelo.

3.2. Estudio hidrológico y delimitación de la zona de estudio

El estudio hidrológico tiene como objetivo identificar, delimitar y caracterizar las cuencas que verterán en el ámbito de estudio las precipitaciones que se recogen durante los episodios de tormentas, para obtener los datos de precipitación a partir de los cuales se definirán los datos hidráulicos del modelo hidráulico.

3.2.1. Procedimiento de estudio

Con el objetivo de obtener los valores de caudales de inundación, es necesario establecer el procedimiento y metodología a seguir.

Según la Norma 5.2-IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras aprobada por la Orden FOM/298/2015 del 15 de febrero de 2016, en su capítulo 2 correspondiente a Cálculo de caudales, se indica que en cuencas de área inferior a 50 km²:

- Utilización de datos de caudales máximos proporcionados por la Administración Hidráulica.

**Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo**

- Si la Administración Hidráulica no dispone de datos sobre caudales máximos se debe aplicar el método racional, con las particularidades del apartado 2.3 cuando las obras se ubiquen en el Levante y Sureste peninsular.

En nuestro caso, como se verá posteriormente, la cuenca vertiente tiene un área de 40,03 km². De igual forma, al tratarse de arroyos de corta longitud y que no poseen estaciones de aforo, se opta por la aplicación del método racional.

No obstante, se han obtenido datos de series de precipitaciones de diferentes fuentes:

- Estación pluviométrica de Bodegas San Dionisio (a 2km al sur de la zona de estudio).
- Datos de las estaciones de Ontur (10km aprox.) y Hellín (25km aprox.) mediante los datos abiertos de AEMET.
- Datos abiertos del Sistema de Información Agroclimática para el regadío (SIAR, 2003) de las estaciones de Ontur y Hellín.
- Datos extraídos de la aplicación CAUMAX desarrollada por el CEDEX (Centro de estudios hidrográficos).

Tras el análisis de los datos obtenidos, se ha decidido utilizar como precipitación media **43 mm/día** (Tabla 3), resultado del método racional y coincidente con los datos obtenidos de la estación de Bodegas San Dionisio (43,54 mm/día), con unos registros que van de 1994 a 2021.

Tabla 3. Precipitación máxima diaria estimada para el estudio.

Precipitación máxima diaria (mm/día)	cv	Y _t	T (años)	X _t =Y _t * P _{max} (mm/día)
43	0,5	1,297	5	55,77
		2,785	100	119,75
		3,738	500	160,73

3.2.2. Datos de partida

Para la elaboración del estudio hidrológico partiremos de:

- Datos de topografía y cartografía del territorio
- Caracterización de la pluviometría del territorio
- Caracterización hidrológica de las cuencas

Con respecto a la topografía, la información consiste en los modelos digitales de elevaciones MDT05, con paso de malla de 5 metros, y que están disponibles en el centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2023). Concretamente se ha usado la hoja 0818. También



se ha usado complementariamente como fondo para identificar elementos peculiares la ortofoto de máxima actualidad del PNOA (CNIG, 2023).

Para la caracterización del terreno y con el fin de obtener los usos de suelo, se ha accedido a la información del SIOSE (MITMA, 2019) del año 2019 (Figura 6). La hidrogeología se ha obtenido a partir del Mapa Geológico de Albacete y también se ha obtenido el Mapa de Permeabilidades de España.

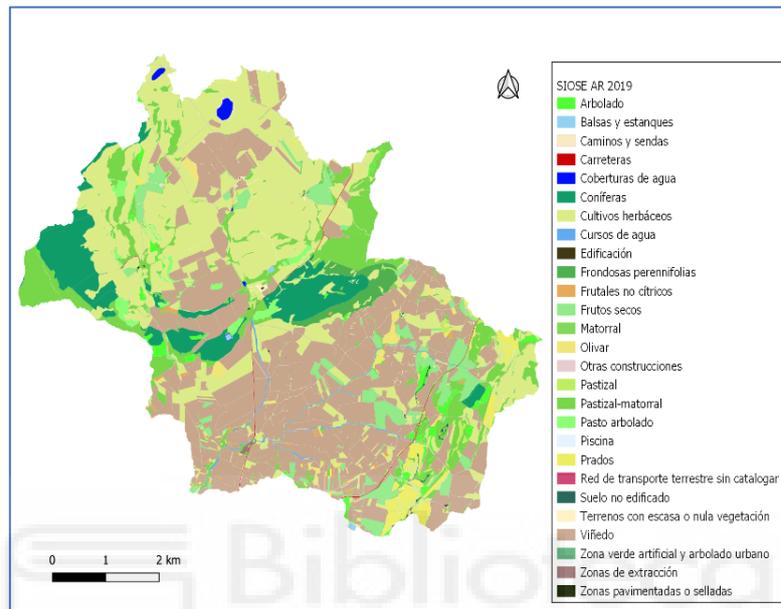


Figura 6. Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España. Fuente: SIOSE, 2019

Para la caracterización de la pluviometría se ha empleado el manual 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular' (MF, 1999) mediante el uso de mapas de representación del coeficiente de variación (cv) y del valor medio de precipitación de la máxima precipitación diaria anual (Figura 7).



Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo

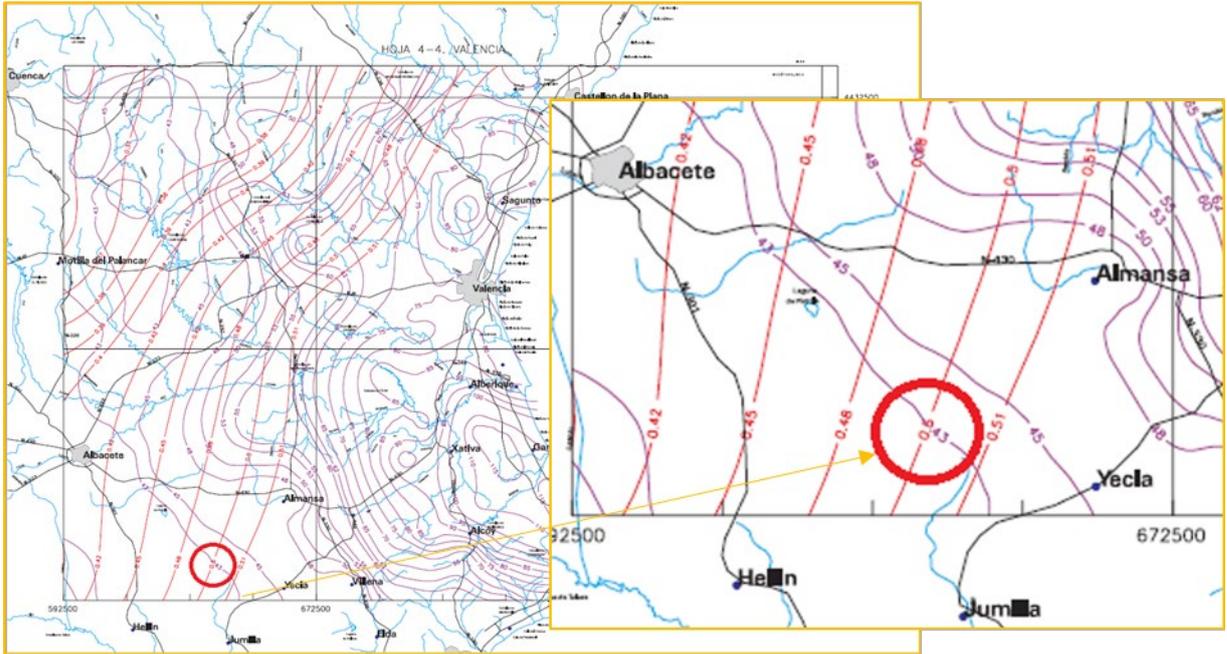


Figura 7. Coeficiente de Variación (cv) y precipitación máxima diaria.

Los resultados para el cuantil regional respecto a los diferentes periodos de retorno se resumen en el siguiente cuadro (Figura 8):

C _v	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Figura 8. Cuantiles Y_t , de la Ley SQRT-ET max, también denominados Factores de Amplificación K_t en el "Mapa para el Cálculo de Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular (1997)"



Por último, también se ha accedido a la información de la red de drenaje de ríos y ramblas de la Cuenca Hidrográfica del Segura (CH Segura, 2023), con el fin de tener un marco de referencia fiable y hacer una comparativa con la red de drenaje obtenida.

3.2.3. Procesamiento de datos

Las fases del procesamiento de datos fueron:

- Obtención de la red de drenaje
- Obtención de las cuencas hidrológicas
- Cálculo de caudales con el Método Racional

3.2.3.1. *Obtención de la red de drenaje y Obtención de las cuencas hidrológicas*

Considerando los datos de elevación de cada celda, QGIS determina la dirección del agua en cada píxel e identifica aquellos con mayor probabilidad de acumulación de escorrentía, que corresponderán con las líneas de la red de drenaje. El programa también determina, usando las superficies de aportación, las cuencas y subcuencas estableciendo una serie de polígonos. Estos polígonos son dependientes de un factor denominado 'tamaño mínimo para cada cuenca o número de celdas' y es el determinante a la hora de establecer la división entre cuencas y subcuencas.

En nuestro caso, dado que se ha utilizado un tamaño de 5x5 metros, los resultados con 100.000 píxeles han sido satisfactorios. Como comparación, la red de cauces que extraen los organismos de cuenca, suele utilizar un tamaño de 25.000, si bien es cierto que en muchos casos usan un tamaño de píxel menor, a lo que hay que sumar que la capacidad de computación de los ordenadores es muy superior.

Las cuencas resultantes a considerar en el estudio son (Figura 9):

- Cuenca de la Torca
- Cuenca del Gallo
- Cuenca de la Besana Larga
- Cuenca del Escaramujo
- Cuenca de los Capitanes

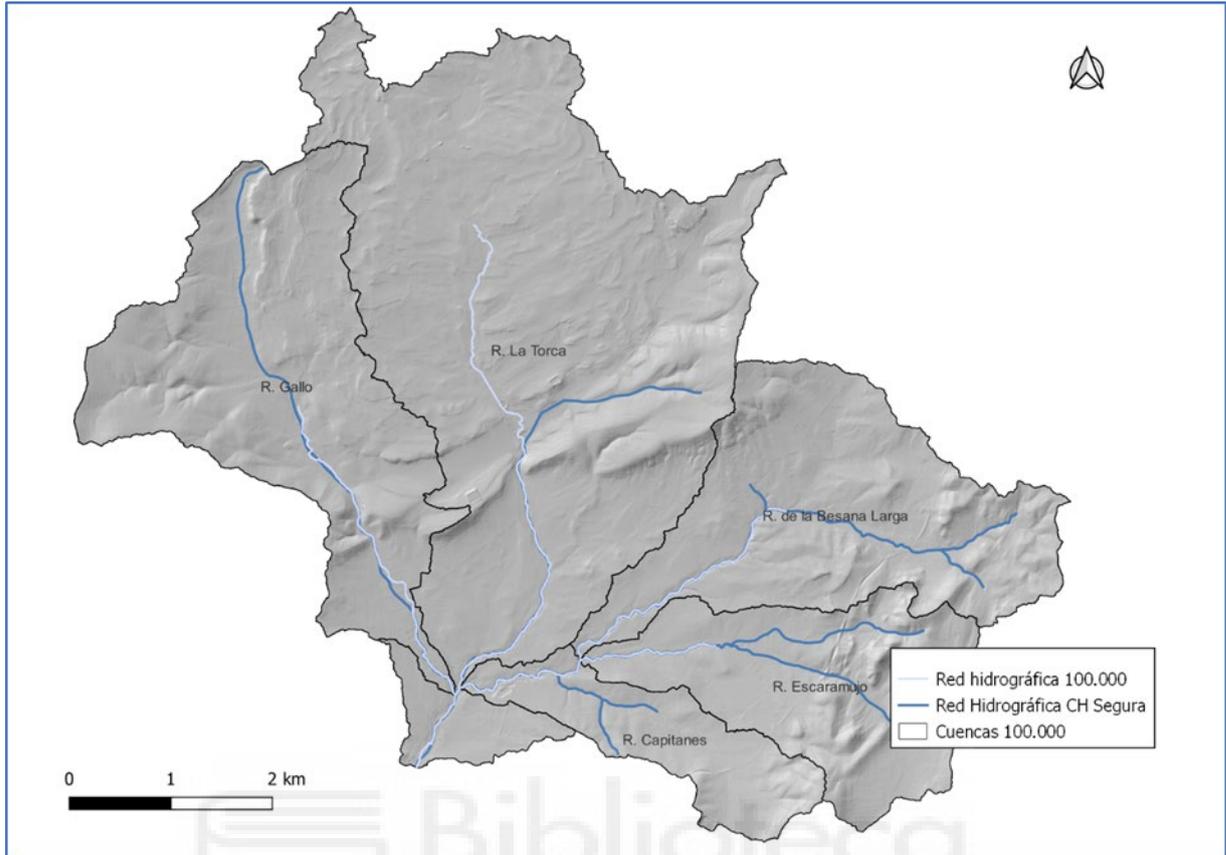


Figura 9. Comparativa extracción de la hidrografía y la Red Hidrográfica de la Confederación del Segura

3.2.4. Cálculo de caudales con el Método Racional

Para el cálculo de caudales mediante el método racional se ha realizado una hoja de Excel (Tabla 4) en la que se han incluido todas las ecuaciones referentes a este método y que recoge todos los datos necesarios. Como se ha indicado anteriormente, se ha utilizado para los cálculos 43 mm/día como precipitación máxima diaria. A modo de ejemplo, para la cuenca de La Torca:

Tabla 4. Tabla Excel para el cálculo de caudales con el Método Racional

	VALOR
AREA CUENCA VERTIENTE (A)	8,75

	Dato requerido
	Dato calculado
	Dato autocompletado

TIEMPO DE CONCENTRACION (Tc)	
	VALOR
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL	3876,28
COTA MAXIMA CAUCE PRINCIPAL	843
COTA MINIMA CAUCE PRINCIPAL	787
PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE	0,01
TIEMPO DE CONCENTRACION	1,88



INTENSIDAD MEDIA (I)		VALOR			UNIDADES
		T5	P100	P500	
MAXIMA PRECIPITACION DIARIA (1)		55,77	119,75	160,73	mm/día
FACTOR REDUCTOR DE LLUVIA DIARIA	0,94				adimensional
MAXIMA PRECIPITACION DIARIA CORREGIDA		52,27	112,23	150,64	mm/día
INTENSIDAD MEDIA DIARIA		2,18	4,68	6,28	mm/h
RELACION INTENSIDAD HORARIA / DIARIA (2)	11				adimensional
INTENSIDAD MEDIA		16,14	34,66	46,52	mm

UMBRAL DE ESCORRENTIA (P0)		VALOR			UNIDADES
		T5	T100	T500	
REGIÓN	71				adimensional
MEDIA	1,20				adimensional
COEFICIENTE CORRECTOR β (3)		0,94	1,00	1,00	adimensional
COEFICIENTE CORRECTOR β		1,128	1,2	1,2	
UMBRAL DE ESCORRENTIA MEDIO (4)	27,21				mm
UMBRAL DE ESCORRENTIA (T500)	0	30,69288	32,652	32,652	mm

COEFICIENTE DE ESCORRENTIA (C)		VALOR			UNIDADES
		T5	T100	T500	
COEFICIENTE DE ESCORRENTIA		0,11	0,31	0,41	adimensional

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (K)	VALOR
	1,14

CAUDALES MAXIMOS (Q)		VALOR			UNIDADES
		Q5	Q100	Q500	
		4,80	29,58	52,56	m ³ /s

3.3. Estudio hidráulico

El objetivo del estudio hidráulico es la obtención de las superficies de inundación para los periodos de retorno de 5, 100 y 500 años. Se ha optado por estos periodos de retorno atendiendo a los siguientes criterios:

- Periodo de retorno de 5 años: se ha decidido por este periodo por la recurrencia de los últimos episodios de inundación, que comprenden un abanico de 3 años (en 2019 y 2021).



Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo

- Periodo de retorno de 100 años: De acuerdo con el artículo 9.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) 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.

Se entiende por vía de intenso desagüe la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 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 0,1 m cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos. En la delimitación de la zona de flujo preferente se empleará toda la información de índole histórica y geomorfológica existente, a fin de garantizar la adecuada coherencia de los resultados con las evidencias físicas disponibles sobre el comportamiento hidráulico del río.

- Periodo de retorno de 500 años: de acuerdo con el art. 14.1 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se consideran zonas inundables “las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de *quinientos 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”.

El estudio hidrológico se ha realizado mediante la utilización del software libre IBER, en su versión 2.5, que permite la creación de modelos de simulación hidráulica de avenidas en 2 dimensiones.



La principal aplicación de los modelos de simulación hidráulica consiste en conocer los valores de las variables hidráulicas (calado, velocidad, caudal específico, número de Froude, etc), a partir de la geometría de los cauces y de las avenidas provocadas por los episodios de lluvia, mediante la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas a partir de una serie de hipótesis.

3.3.1. Creación del modelo

La creación del modelo incluye la definición del área de estudio a nivel de las características geométricas y de orografía, condicionantes hidráulicos y las peculiaridades del terreno.

Para el presente estudio, por la disposición de la red de drenaje confluyente y las direcciones de flujo, se ha realizado un buffer de 300 metros a ambos lados de los cauces a estudio, que se corresponde con el dominio del modelo.

3.3.2. Geometría del modelo

Como se ha comentado anteriormente, el modelo hidráulico abarca la superficie obtenida tras realizar los 300 metros a cada lado a los cauces principales. Esta superficie resulta en 833,72 ha. Este polígono adoptará las elevaciones del modelo digital de elevaciones para establecer la morfología del terreno por donde circula el flujo.

El programa Iber trabaja sobre mallas de cálculo, y para poder definir la malla, es necesario la definición de la geometría. La representación de la geometría se establece mediante puntos, líneas y superficies. Estos elementos que componen la geometría son regulares y el tamaño depende de la configuración topográfica y morfológica de la zona, y se configura a partir de los datos del terreno procesados anteriormente, esto quiere decir que Iber configura la geometría directamente a partir del MDT.

Los datos entrantes para la definición de la geometría en Iber son: MDT, tolerancia y lado máximo y mínimo* de los triángulos que se van a crear (más grandes en las zonas llanas y reducidos en las zonas con elevación).

*No se podrá crear un lado mínimo de triángulos menos que la resolución del MDT de partida, por lo que el lado mínimo del modelo serán 5 metros.

3.3.2.1. Condiciones hidrodinámicas

Una vez creada la geometría, establecemos las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y las fuentes de nuestro modelo.

Condiciones de contorno:



- Condiciones de entrada: esta condición define el caudal de entrada al modelo y el primer paso para definirla, es identificar la zona donde se produce la entrada de agua. Como el modelo posee varias condiciones de entrada de caudal (4 cauces), se ha decidido por establecer una condición principal correspondiente con el cauce de mayor caudal, el cauce asociado a la rambla de la Torca. Condición de contorno de salida: esta opción señala el sitio por el que debe salir el agua. Cuando el agua llega a un límite del modelo, se encontrará con una barrera insuperable y que no se puede atravesar a menos que tenga una condición de contorno de salida asociada. Tras realizar varias pruebas se llegó a que los 300 metros a cada lado de los cauces era necesario como para que el agua no alcanzara los límites del dominio y el agua se comportara de forma natural por el terreno. Dado que el agua no alcanza los límites laterales del modelo, la condición de contorno se ha establecido al final del modelo, aguas abajo, en toda su franja.
- Condiciones iniciales: definen el estado inicial del modelo al comienzo de la simulación y se debe definir en toda extensión. En nuestro caso, se ha asumido una condición inicial de calado cero, que considera el terreno seco al inicio de la simulación. También asumimos valor cero para la velocidad en el instante inicial por carecer de registros.

Fuentes: una vez definida la condición de entrada inicial para el cauce principal, es necesario definir los caudales de entrada correspondientes a las demás entradas del modelo. Para ello, se ha optado por asignar el caudal de entrada a diferentes puntos en el inicio de los cauces, aguas arriba. Para ello, se han colocado 'fuentes' en los cauces de la Rambla del Gallo, de la Besana Larga y del Escaramujo*.

*El caudal en esta fuente se corresponde con la suma del caudal obtenido de la cuenca del Escaramujo y la de Capitanes.

3.3.2.2. Coeficiente de Manning

En hidráulica uno de los métodos más utilizados para determinar el volumen que circula por un cauce por unidad de tiempo o caudal es la ecuación de Manning, que depende de parámetros como: área, perímetro mojado, radio hidráulico o la pendiente que son de fácil determinación, no así el coeficiente que refleja la cantidad de resistencia dinámica al flujo, la llamada universalmente n de Manning (Osío Yépez et al., 2011).

La modelación hidráulica como una herramienta que permite representar de una manera simplificada el complejo funcionamiento de la naturaleza, aplica los conceptos de la mecánica de fluidos para elaborar el modelo y verificar si los resultados se ajustan a la realidad antes de construir cualquier estructura hidráulica. La n de Manning es uno de los parámetros más importantes y necesarios en cualquier modelo hidráulico, por lo tanto, este valor debe ser determinado



adecuadamente para obtener resultados satisfactorios. Un error del 10% en la n implica un error similar en la velocidad o gasto (León y Martínez, 2013).

En nuestro caso, vamos a definir la n de Manning mediante los valores que la Guía metodológica para el desarrollo del SNCZI (MARM, 2011) pone a disposición pública (Tabla 5). Así n , toma los siguientes valores dependiendo del uso de suelo establecido mediante el SIOSE:

Tabla 5. Número de Manning (n) para las diferentes coberturas del suelo. Fuente: MARM, 2011.

Cobertura Suelo	Manning (n)
Arbolado	0,07
Red de transporte terrestre sin catalogar	0,1
Edificación	0,1
Camino y sendas	0,04
Balsas y estanques	0,025
Terrenos con escasa o nula vegetación	0,025
Frutos secos	0,06
Pasto arbolado	0,06
Olivar	0,06
Zonas pavimentadas o selladas	0,1
Frutales no cítricos	0,06
Minería	0,25
Coberturas de agua	0,04
Piscina	0,04
Prados	0,035
Coníferas	0,07
Viñedo	0,05
Pastizal-matorral	0,04
Cursos de agua	0,04
Pastizal	0,035
Zona verde artificial y arbolado urbano	0,09
Carreteras	0,1
Cultivos herbáceos	0,04

3.3.3. IBER

Tras establecer las condiciones iniciales, de contorno, fuentes y de asignación de la variable de Manning, se procede a generar la malla de cálculo.

En este punto, es necesario configurar una serie de parámetros y módulos que posteriormente se ejecutarán en el software IBER (Bladé et al., 2014). Entre estos parámetros, destacan:

- Instante inicial: corresponde con el instante de tiempo de inicio del cálculo, que lo situaremos en cero.



- b) Tiempo máximo de simulación: valor del instante del tiempo de tiempo final del cálculo. Tras realizar una serie de pruebas, se ha establecido un tiempo máximo de 5.000 segundos, suficiente para la entrada y salida del caudal del modelo.
- c) Intervalo de resultado: representa el incremento de tiempo entre instantes en la escritura de los resultados. En nuestro caso, 1.000 segundos.
- d) Número de procesadores: que participarán en la resolución del cálculo. Se ha decidido colocar el mayor máximo número de procesadores de la computadora, en mi caso 12 procesadores.

Una vez definidos estos parámetros, procederemos a la simulación y a la visualización de los resultados.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO

Computadas las simulaciones de las avenidas para los periodos de retorno de 5, 100 y 500 años, procedemos a analizar los resultados obtenidos. El programa aporta gran cantidad de información en formato ráster: calados, número de Froude, caudal específico, velocidad, cota del agua, mapas de peligrosidad, zona de inundación peligrosa o la vía de intenso desagüe, entre otros. El análisis de resultados, en este caso, se centrará en el calado y la velocidad.

***Para una mejor visualización de los resultados, nos centraremos en las zonas de mayor interés (cambios de direcciones, aumentos sustanciales de las variables, etc). En los anexos cartográficos se podrán visualizar los resultados en toda su extensión.

4.1. Periodo de Retorno de 5 años

Calado: para el periodo de retorno de 5 años (Figura 10), el calado sigue la topografía del terreno y no se producen salidas fuera de lo esperado. El calado es inferior a los 30 centímetros en casi toda la extensión a excepción del eje central de los cauces, donde se acumula el flujo. El calado máximo es de 1,89 metros y se corresponde, como veremos en todos los resultados, con el cruce de la carretera CV-B-10.



Figura 10. Calado para T=5 años.

Velocidad: en cuanto a la velocidad (Figura 11), los valores oscilan considerablemente. La mayor parte del flujo se encuentra entre 0,5-1,14 m/s, pero como se puede apreciar en la siguiente imagen, se alcanzan valores de hasta 4,17 m/s en algunas zonas. La media de la velocidad es de 0,74 m/s.

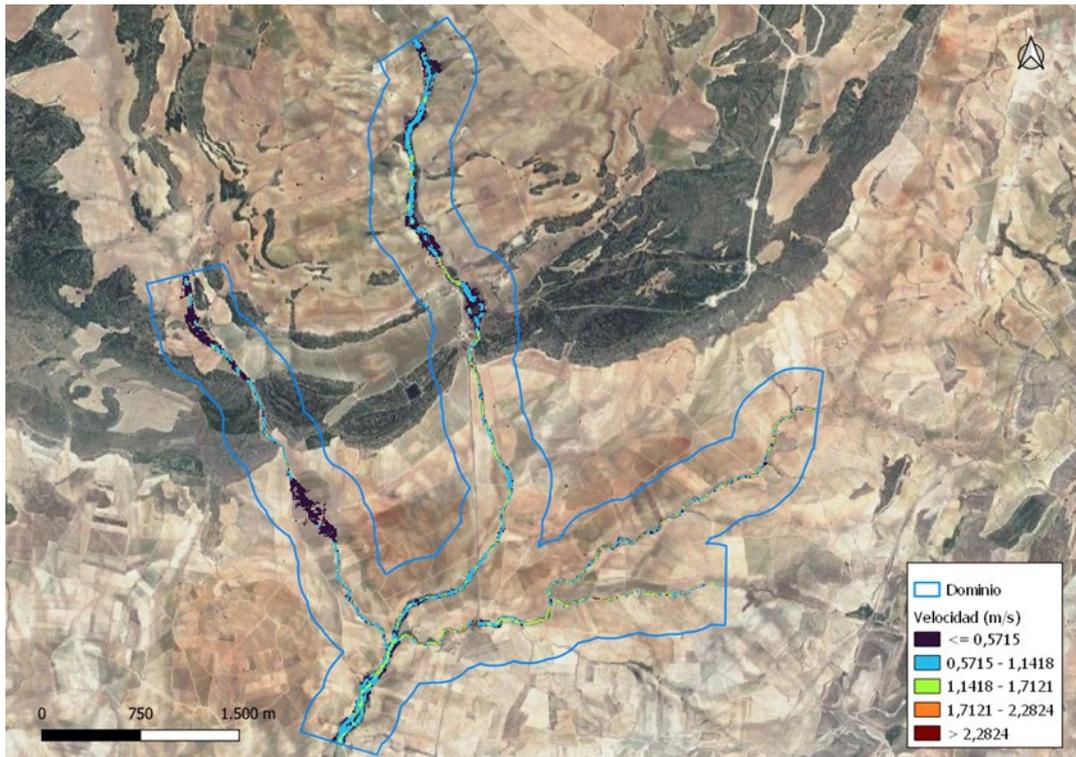


Figura 11. Velocidad para T=5 años.

4.2. Periodo de Retorno de 100 años

Calado: para el periodo de retorno de 100 años (Figura 12) se pueden apreciar algunas diferencias respecto del anterior periodo. Aunque la mayoría de los flujos discurren por los cauces naturales de las ramblas, se produce una pequeña bifurcación en el cauce de la Rambla del Gallo. En la imagen satelital se puede apreciar como en esta bifurcación, la zona se encuentra con tonos más oscuros, debido al paso del agua durante episodios pasados. Los valores mínimos se encuentran entre 0,1 y 0,6. El máximo calado es de 3,5 metros (correspondiente con el cruce de la anteriormente comentada carretera CV-B-10) y la media de 0,53 metros.



Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo



Figura 12. Calado para T=100 años.

Velocidad: supone un incremento en los valores mínimos respecto al anterior periodo (Figura 13). La máxima no se ve muy modificada, siendo esta de 5,27 m/s. La media es de 1,29 m/s.

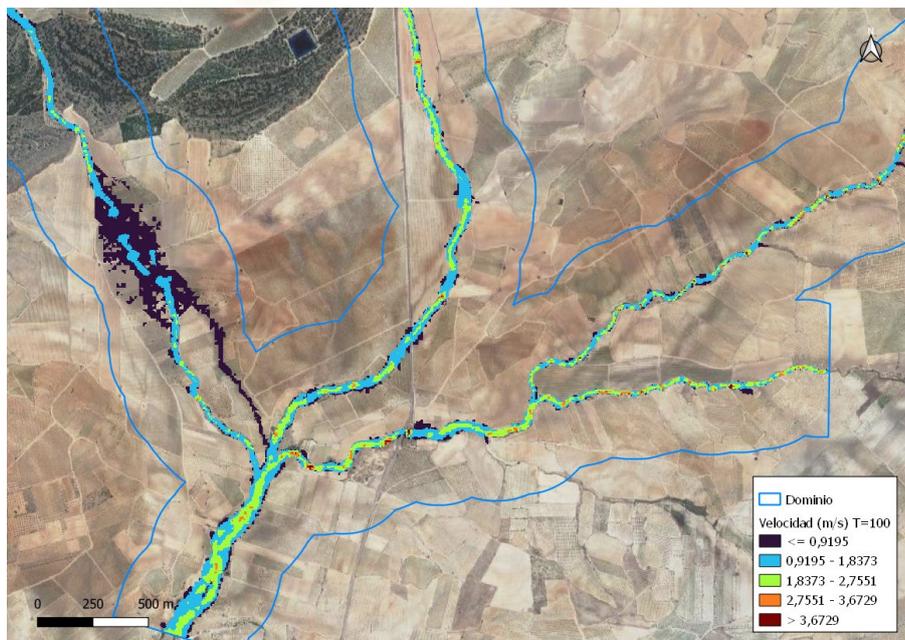


Figura 13. Velocidad para T=100 años



4.3. Periodo de retorno de 500 años

Calado: el cambio más sustancial respecto a los periodos de retorno anteriores se corresponde con la ampliación de la zona que se encuentra comprendida por el rango de valores de entre 1 y 2 metros (Figura 14) en la que esta zona se amplía considerablemente (Figura 16). Se aprecia también un pequeño aumento de los calados más bajos, sin gran repercusión sobre los resultados finales. El valor máximo es de 3,94 metros y la media 0,64 metros.

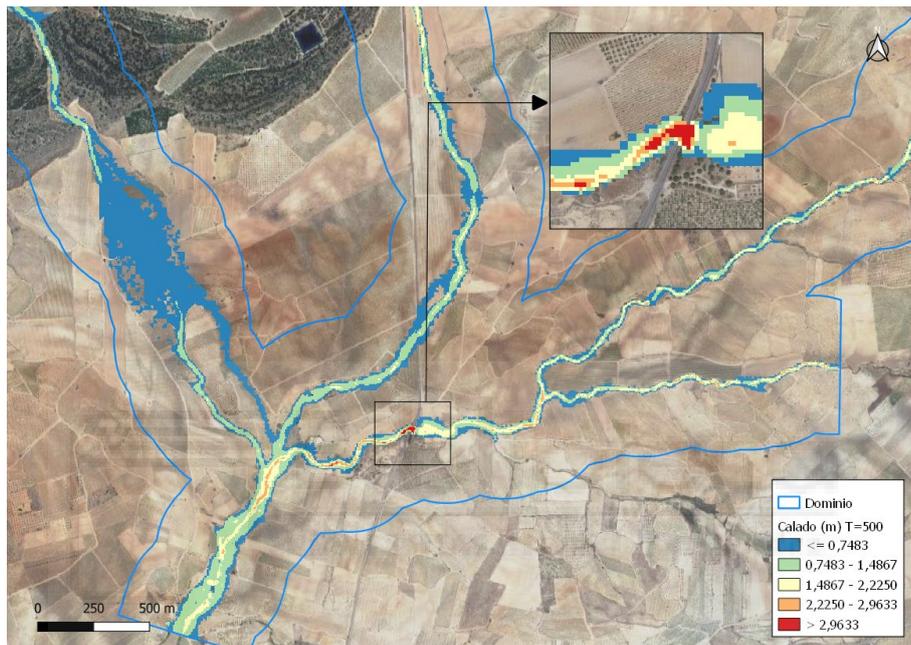


Figura 14. Calado para T=500.

Velocidad: en este caso (Figura 15), el único cambio apreciable respecto del periodo de retorno de 100 años es la aparición de esta magnitud en las zonas donde, tras el aumento de caudal, el calado se ha extendido, no suponiendo una variación importante. La máxima es de 6,07 m/s y la media 1,49 m/s.

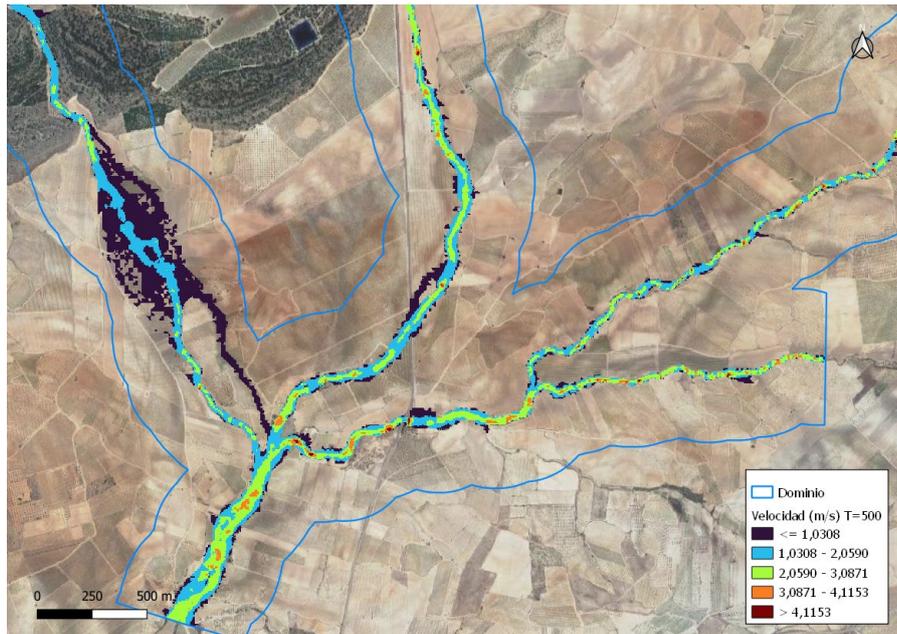


Figura 15. Velocidad para T=500.

4.4. Comparativa de calados para los diferentes periodos de retorno.

Como breve resumen de los resultados de calado, se procede a hacer un pequeño análisis (Figura 16). En general, las zonas inundables coinciden, para todos los periodos de retorno, con las zonas inundadas en los episodios de lluvia intensa. Esto se puede apreciar en los daños ocasionados, en el análisis de las fotos históricas y en las ortofotos de satélite.

El salto más cualitativo respecto al calado máximo se puede apreciar para el paso del periodo de retorno de 5 a 100 años, que pasa a ser de 1,8 a 3,5 metros, una diferencia de 1,7 metros. De 100 a 500 años, el calado máximo tiene una diferencia de 0,44 metros.

Uno de los rangos que más se ven acrecentados en los tres periodos de retorno se corresponde entre 12 metros de calado, en el que la zona de inundación en este rango se amplía considerablemente. Uno de los puntos donde más se puede notar esta diferencia es en el tramo final del dominio de la simulación.

Para finalizar, mencionar el tramo de la rambla del Gallo donde el calado, por pequeño que sea, alcanza una anchura importante. Para el periodo de retorno de 500 años, esta zona se amplía en 320 metros.

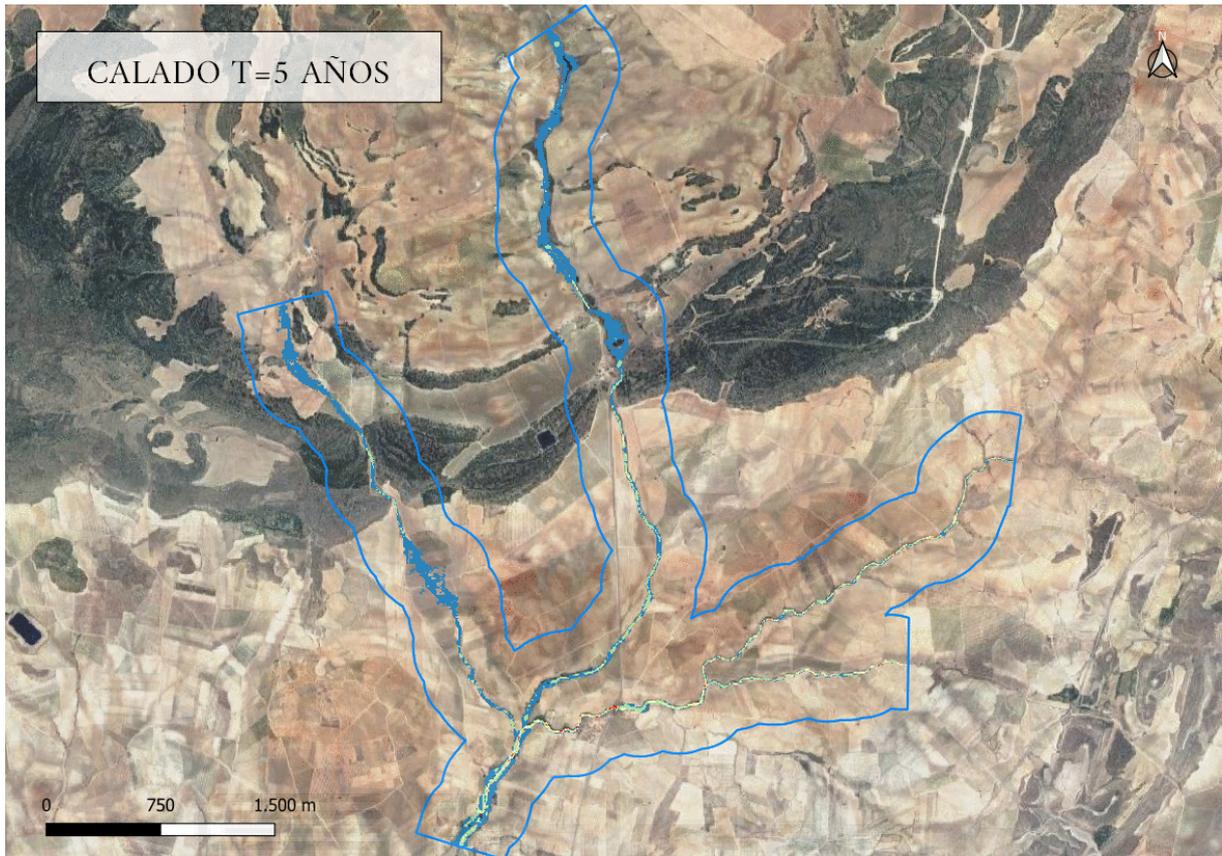


Figura 16. Comparativa resultados de calado

4.5. Delimitación de zonas inundables

Para la delimitación de las zonas inundables se tomará como premisa la modificación seis, del art. 14 del RD 9/2008 que modifica el RDPH aprobado por el RD 849/1986, la cual expone: 'Se consideran zonas inundables las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de quinientos 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' (BOE Real Decreto 9/2008, del RDPH).

De este modo, en el siguiente mapa (Figura 17) se muestra la estimación de las zonas inundables en el área de estudio conforme a las indicaciones técnicas del RD 9/2008, pudiendo observarse una amplia zona inundable en el cauce más occidental (Cuenca del Gallo).

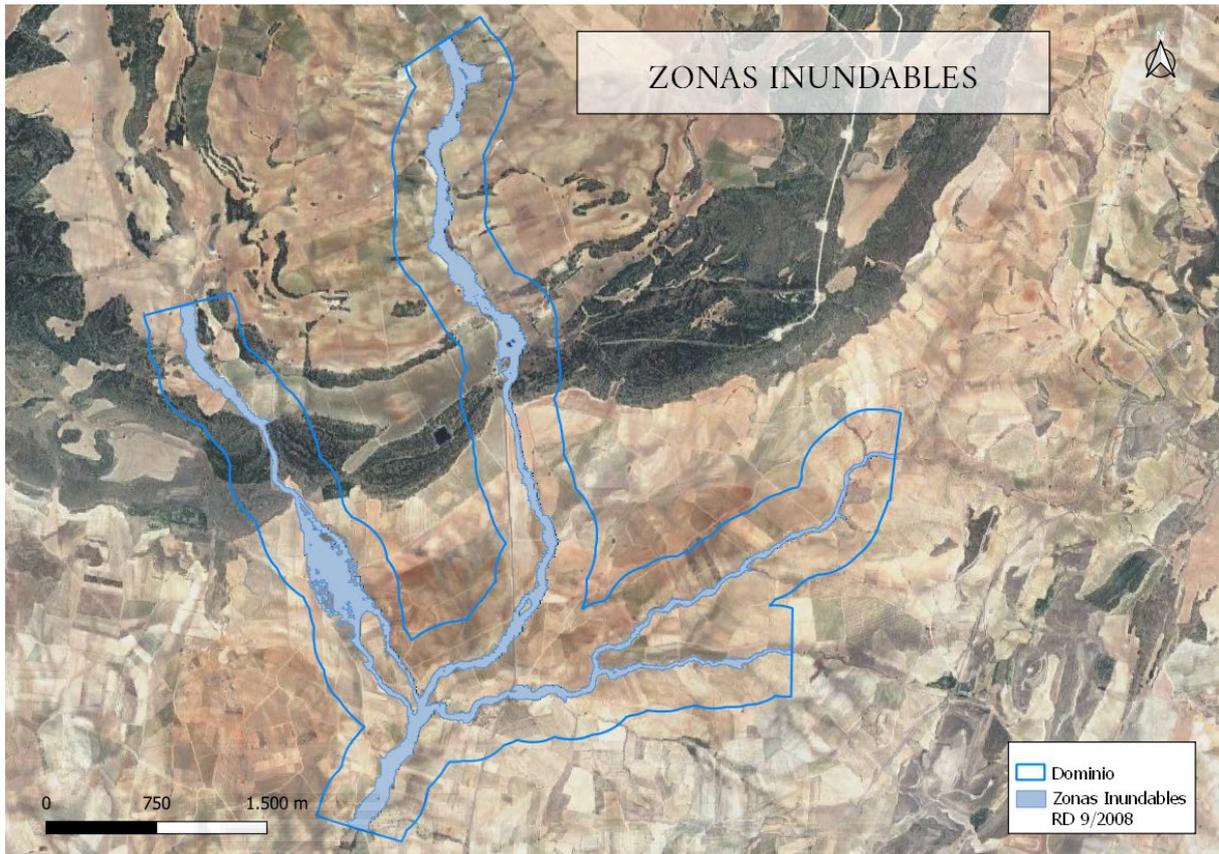


Figura 17. Zonas Inundables

4.6. Cálculo de la Zona de Flujo Preferente (ZFP)

Para la delimitación de la Zona de Flujo Preferente (ZFP) se tomará como premisa la modificación cinco del art. 9, en el apartado 2, del RD 9/2008 que modifica el RDPH aprobado por el RD 849/1986, la cual expone: '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.



Se entiende por vía de intenso desagüe la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 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 0,1 m cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos.'

4.6.1. Cálculo de la Zona de Inundación Peligrosa (ZIP)

Atendiendo a los criterios anteriormente mencionados, el programa Iber calcula la ZIP de manera automática. Posteriormente, es necesario hacer una depuración de datos en QGIS. El resultado final es mostrado en el siguiente mapa (Figura 18), en el que se aprecia una ligeramente más amplia extensión transversal en la rambla septentrional (Rambla La Torca), justo antes de un relieve perpendicular seccionada por la misma.

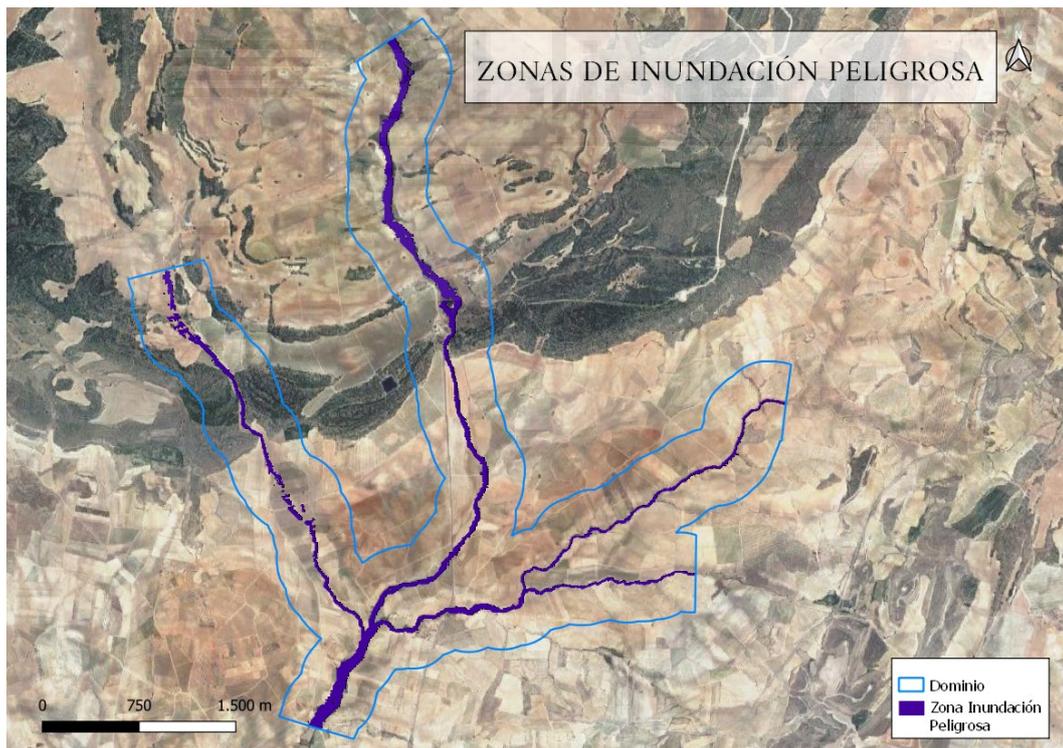


Figura 18. Zona de Inundación Peligrosa (ZIP).

4.6.2. Vía de Intenso Desagüe (VID)

El cálculo de la Vía de Intenso Desagüe (VID) también se ha realizado mediante el programa Iber, en concreto mediante el método del polígono. Para ello se han realizado una serie de pruebas con el



fin de adecuar los resultados al criterio de 0,3 metros del RDPH, obteniéndose finalmente el correspondiente resultado cartográfico (Figura 19).

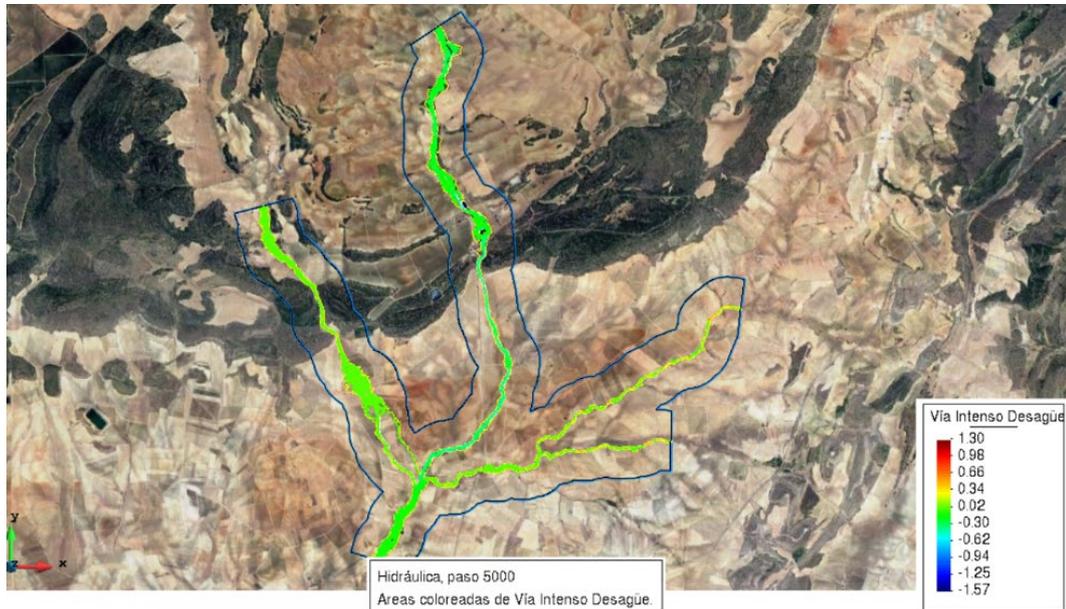


Figura 19. Vía de Intenso Desagüe (VID).

4.6.3. Zona de Flujo Preferente (ZFP)

Aunando los resultados cartográficos de las Zonas de Inundación Peligrosa (ZIP) y de las Vías de intenso Desagüe (VID), se procedió a la determinación una tercera variable, que es la Zona de Flujo Preferente (ZFP). El mapa resultante de la ZFP (Figura 20) muestra aquellas áreas en las que 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.



Figura 20. Zona de Flujo Preferente (ZFP).

4.7. Riesgos

El riesgo natural es la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita puedan verse afectados por un fenómeno natural extraordinario.

Para que haya riesgo, tiene que haber personas y actividad humana y, para poder evaluarlo, hay que contar con los tres factores del riesgo:

- a) Peligrosidad natural (P): presencia de fenómenos o procesos naturales susceptibles de causar daños personales y económicos. Cada peligro se mide como probabilidad de ocurrencia.
- b) Exposición territorial (E): disposición sobre el territorio de un conjunto de bienes (exposición económica) y personas (exposición social) que pueden ser dañados por un peligro natural. Se mide cuantificando el número de personas y bienes expuestos al riesgo.
- c) Vulnerabilidad social (V): es la pérdida esperable en función de la fragilidad o del grado de preparación de la sociedad frente al riesgo. Se mide como tanto por uno de daños esperados.
- d) Otro cuarto factor, sería el tiempo a lo largo del cual pueden variar los factores y, por tanto, el riesgo.



Del producto de los tres factores resulta el nivel o grado de riesgo, que puede ser cuantificado (midiendo lo señalado en cada factor), comparado y cartografiado. (Ollero Ojeda, 2014).

$$R = P \times E \times V$$

En este trabajo, dado que el estudio cuantitativo del riesgo supone un análisis mucho más detallado poblacional, económico, etc, se procede a hacer un análisis cualitativo.

Así, la peligrosidad la consideramos elevada por el grado de probabilidad de ocurrencia, repetidas en los últimos años.

En cuanto a la exposición territorial a la inundación del área de estudio se podría considerar elevada respecto a los daños económicos, puesto que un evento de estas características causa notables daños en los cultivos. No así los daños personales, pues la zona se encuentra alejada de núcleos poblacionales.

La vulnerabilidad para este tipo de sucesos en la zona es media-alta. La fragilidad del entorno es considerable y los medios para hacer frente a avenidas en la zona es prácticamente nula.

5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

Tras el análisis realizado de los resultados, y a falta de datos de estudio de la Confederación hidrográfica en el área de estudiada, los resultados obtenidos se podrían considerar aceptables pues las variables hidrodinámicas como calado, velocidad o el caudal específico se ajustan a lo que se puede apreciar en terreno tal y como se ha podido comprobar con las imágenes de las avenidas pasadas y con las imágenes de satélite.

La problemática de las avenidas en la zona se da principalmente por la descarga rápida de una precipitación importante, común del clima mediterráneo. De igual forma, la topografía del terreno, la falta de vegetación en las ramblas y el mal cuidado de estas, supone un arrastre de sedimentos y materia que, aguas abajo, conlleva el destrozo de los cultivos. Estos destrozos acarrearán una pérdida económica importante, en una zona en que la agricultura es el principal medio de vida de la población del municipio.

Para hacer frente a esta situación, se deben proponer estudios como el actual, que puedan reflejar este tipo de fenómenos con el fin de aportar las soluciones oportunas y dar eco a las diferentes organizaciones y entidades.



Estas organizaciones y entidades deben de establecer los métodos estructurales y actividades de gestión correspondientes. Medidas como la protección, regulación y corrección de los cauces, conservación de suelos y obras de drenaje son básicas para minimizar el efecto de las avenidas. Otro tipo de medidas como la instalación de sistemas de alarma o implantación de seguros podrían suponer otra forma de paliar el daño.

Para finalizar, mención especial al papel de los Planes de Gestión de Riesgos de Inundación (MITECO, 2023), que suponen una guía básica para las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias de las inundaciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología (2023) Datos abiertos. Página Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). URL: <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/productosAEMET?>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. (2014) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 30(1): 1-10.
- CNIG (2023) Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional. Página web Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (CNIG). URL: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>
- Confederación hidrográfica del Segura. Página web de la Confederación Hidrográfica del Segura. URL: <https://www.chsegura.es/es/>
- García, M. (1999) La continuidad de Fuente-Álamo, un municipio límite en la provincia de Albacete, como consecuencia del desarrollo de las comunicaciones.
- Gascón, M. (2005) Historia y desastre natural. La ciudad latinoamericana y las inundaciones. Revista de historia actual, 3 (3): 115-125.
- IGME (2023) Instituto Geológico y minero de España. URL: <https://www.igme.es/>
- León A. y Martínez Y. (2013) Hidráulica de las conducciones libres. Editorial Poligráfica Félix Varela: La Habana, Cuba.
- MAPAMA (2016) Inventario Nacional de Erosión de Suelos. URL: <https://wms.mapama.gob.es/sig/Biodiversidad/INSErosionCauces/wms.aspx?request=GetCapabilities&service=WMS>
- MARM (2011). Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (MARM): Madrid, España.



Ministerio de Fomento, (1999). Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2019). Sistema de información de Ocupación del Suelo de España de Alta Resolución (SIOSE AR). URL: <https://www.siose.es/siose-alta-resolucion>.

MITECO (2023) Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI). Página web: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Último acceso: 11-01-2023. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/planes-gestion-riesgos-inundacion/>

MITECO (2023) Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Página web Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Último acceso: 11-01-2023. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/>

MITECO (2019). Guía de adaptación al riesgo de inundación: Explotaciones Agrícolas y Ganaderas. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO): Madrid, España.

SIAR (2023) Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. Página web Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Último acceso: 15-02-2023. URL: <https://eportal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>

Ollero Ojeda, A. (2014) Guía metodología sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para Gestores. Universidad de Zaragoza-Fundación Ecología y Desarrollo: Zaragoza, España.

Osío Yépez, M G., Valencia Ventura, F F.; Guevara, E., Cartaya, H. (2011) Cálculo del coeficiente de rugosidad “n” de Manning en los grandes ríos de Venezuela. Revista de Ingeniería, 7(2): 13 p.

WDRR (2015) Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction – WDRR. Sendai, Japón. Último acceso: 15-02-2013. URL: <https://www.wcdrr.org/conference.html>



7. ANEXO I. RESULTADOS CARTOGRÁFICOS Y REPOSITORIO DE IMÁGENES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

A continuación, se adjuntan los mapas cartográficos de los resultados de las simulaciones, para las variables de calado, velocidad y caudal específico. Se adjunta también, la Zona de Flujo Preferente.

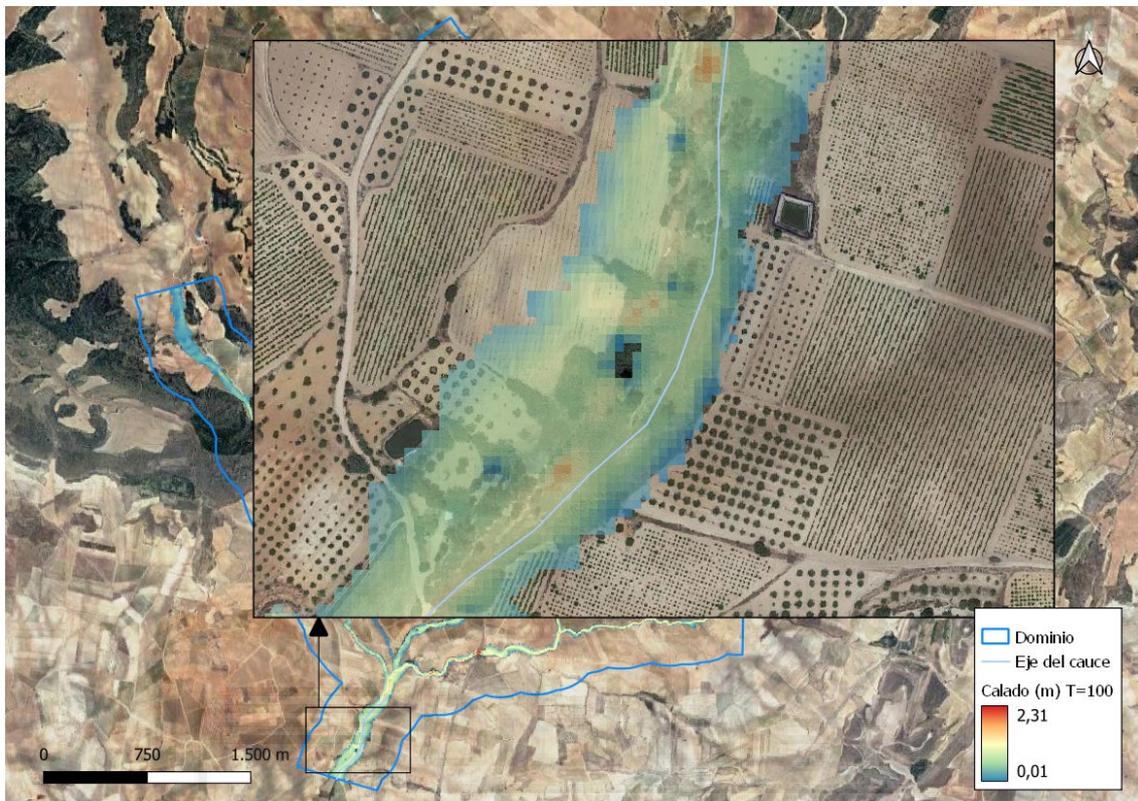
Asimismo, se adjuntan las fotografías tomadas para el área de estudio, tomadas en las zonas más relevantes para el trabajo.





Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo

Efecto de las inundaciones sobre el conjunto de bienes del terreno (exposición económica)(ver apartado 4.7), paraje de El Tollo.





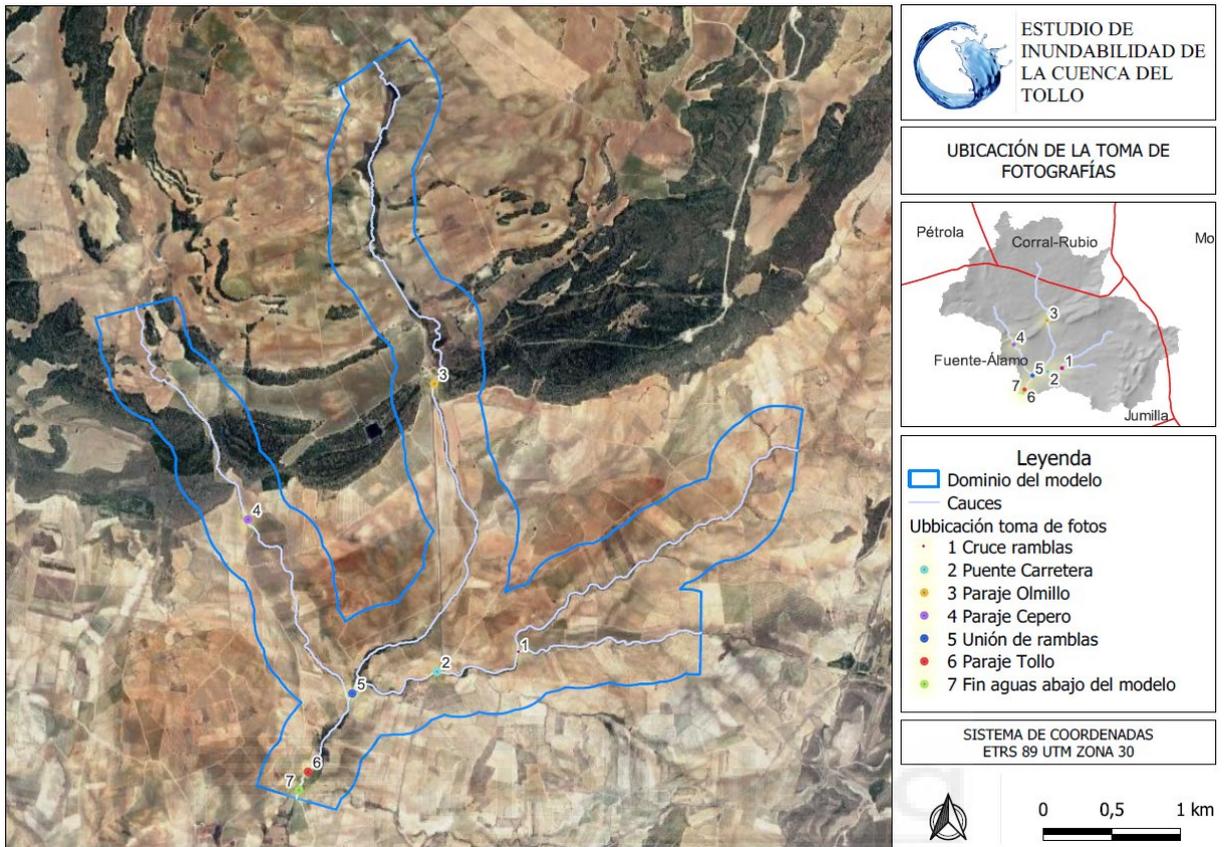
Estudio de Inundabilidad de la Cuenca del Tollo

Como se puede ver, las zonas anegadas por el agua coinciden con los tonos oscuros que se aprecian en el terreno. En estas zonas, se ha podido comprobar insitu que el flujo de agua y el arrastre de sedimentos supone el destrozo de la mayoría de los cultivos de viñedo. Una foto de las inundaciones del 2019 sobre la zona y el punto de realización:





INVENTARIO DE FOTOS



Ubicación 1





Ubicación 2





Ubicación 3





Ubicación 4



Ubicación 5





Ubicación 6





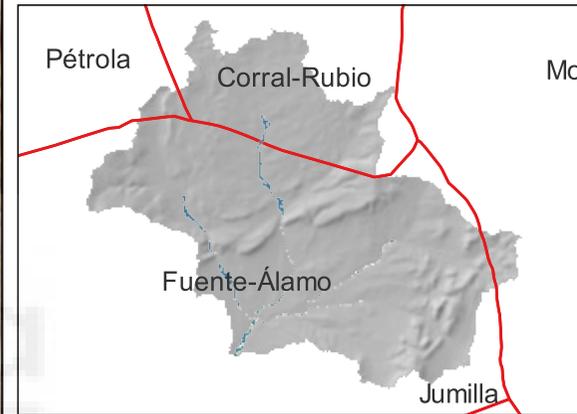
Ubicación 7





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS
CALADO



Leyenda

 Dominio del modelo

Calado (m)

 $\leq 0,6230$

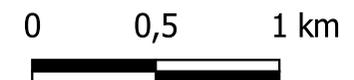
 $0,6230 - 1,2358$

 $1,2358 - 1,8486$

 $1,8486 - 2,4614$

 $> 2,4614$

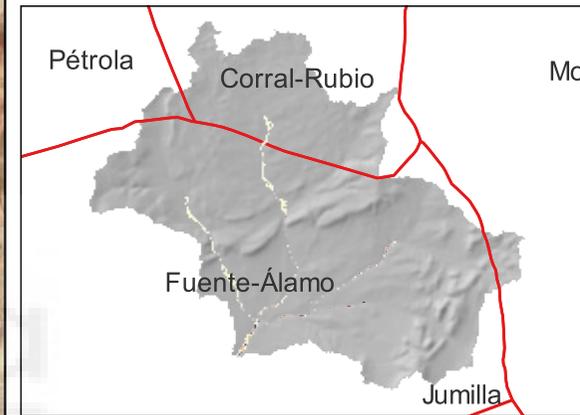
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

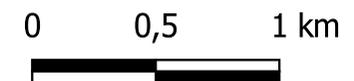
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS
CAUDAL ESPECÍFICO



Leyenda

- Dominio del modelo
- Caudal Específico (m^2/s)
- $\leq 0,2885$
- $0,2885 - 0,5768$
- $0,5768 - 0,8651$
- $0,8651 - 1,1534$
- $1,1534 - 1,4417$
- $> 1,4417$

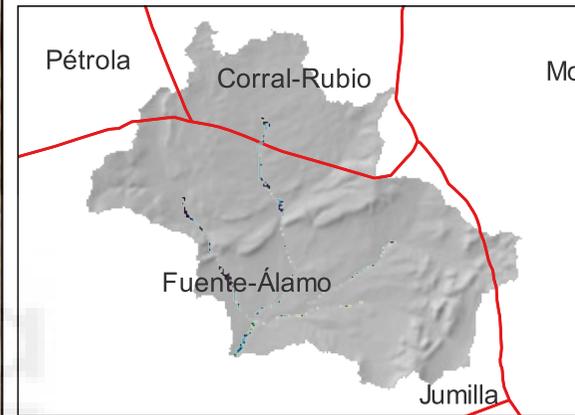
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS
VELOCIDAD



Leyenda

Dominio del modelo

Velocidad (m/s)

$\leq 0,5715$

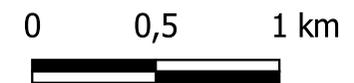
0,5715 - 1,1418

1,1418 - 1,7121

1,7121 - 2,2824

$> 2,2824$

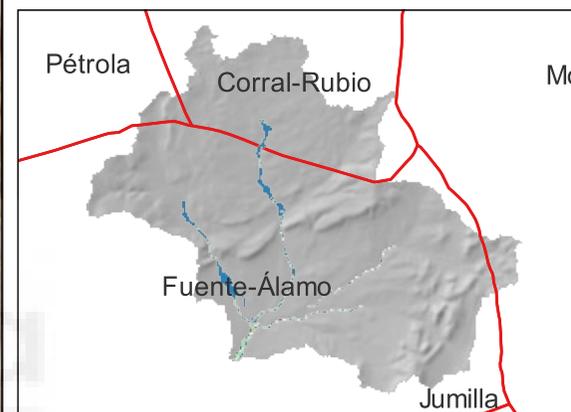
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS
CALADO



Leyenda

 Dominio del modelo

Calado (m)

 $\leq 0,6230$

 $0,6230 - 1,2358$

 $1,2358 - 1,8486$

 $1,8486 - 2,4614$

 $> 2,4614$

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30



0 0,5 1 km




ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS
CAUDAL ESPECÍFICO



Leyenda

- Dominio del modelo
- Caudal Específico (m^2/s)
- $\leq 1,0656$
- 1,0656 - 2,1310
- 2,1310 - 3,1964
- 3,1964 - 4,2618
- $> 4,2618$

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30

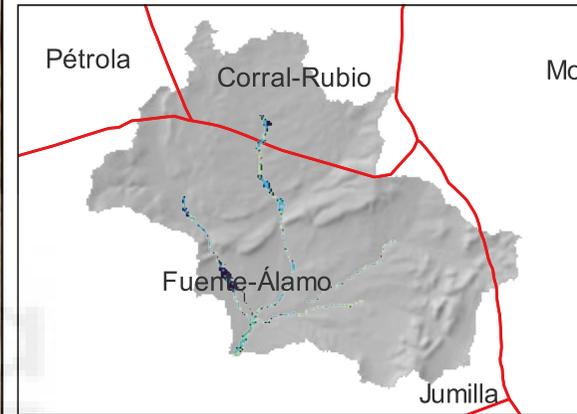


0 0,5 1 km



ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS
VELOCIDAD



Leyenda

 Dominio del modelo

Velocidad (m/s)

 $\leq 0,9195$

 $0,9195 - 1,8373$

 $1,8373 - 2,7551$

 $2,7551 - 3,6729$

 $> 3,6729$

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30



0 0,5 1 km




ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS
CALADO



Leyenda

 Dominio del modelo

Calado (m)

 $\leq 0,7483$

 $0,7483 - 1,4867$

 $1,4867 - 2,2250$

 $2,2250 - 2,9633$

 $> 2,9633$

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30

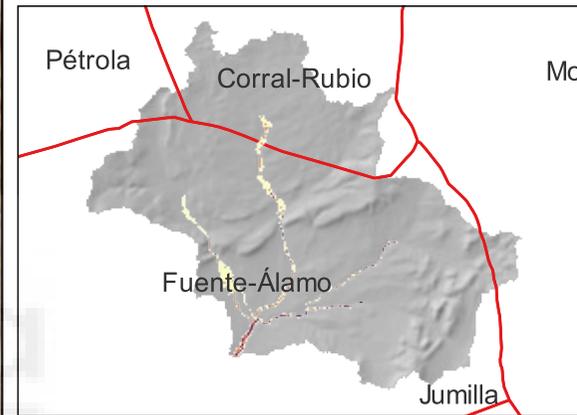


0 0,5 1 km




ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

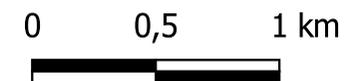
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS
CAUDAL ESPECÍFICO



Leyenda

- Dominio del modelo
- Caudal Específico (m^2/s)
- $\leq 1,5575$
- $1,5575 - 3,1150$
- $3,1150 - 4,6725$
- $4,6725 - 6,2299$
- $> 6,2299$

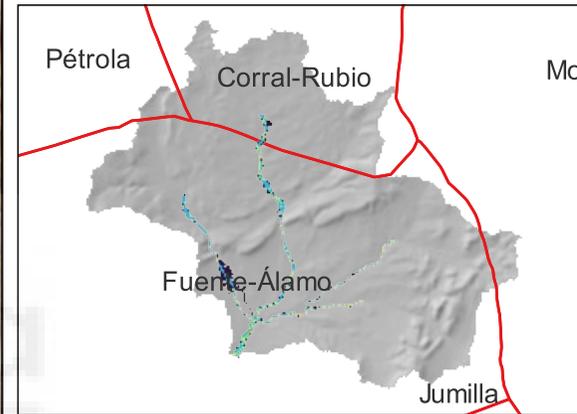
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS
VELOCIDAD



Leyenda

Dominio del modelo

Velocidad (m/s)

$\leq 1,0308$

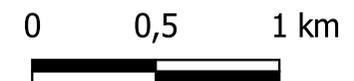
1,0308 - 2,0590

2,0590 - 3,0871

3,0871 - 4,1153

$> 4,1153$

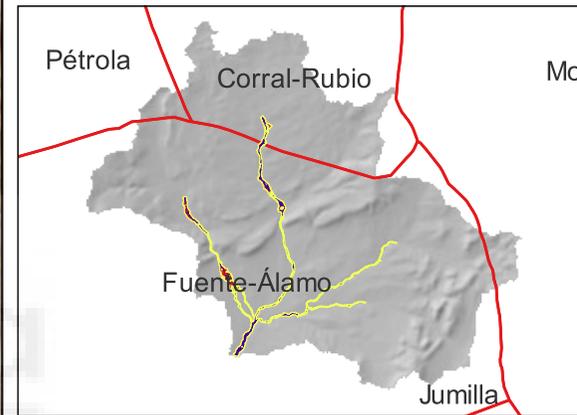
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30





ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA CUENCA DEL TOLLO

ZONA DE FLUJO PREFERENTE



Leyenda

-  Dominio del modelo
-  Zona de Flujo Preferente
-  Vía de Intenso Desagüe
-  Zona de Graves Daños

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 89 UTM ZONA 30

