



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DINÁMICA FLUVIAL DEL RÍO GUADALBULLÓN A SU PASO POR LAS INFANTAS

Alumno: José Antonio Plaza Jiménez

Tutor: Prof. D. Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Dinámica Fluvial del río Guadalbullón a su paso por Las Infantas, que presenta José Antonio Plaza Jiménez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, noviembre de 2015

El alumno:

JOSÉ ANTONIO PLAZA JIMÉNEZ

Los tutores:

PATRICIO BOHÓRQUEZ RODRÍGUEZ DE MEDINA

AGRADECIMIENTOS

Tras finalizar este Trabajo Fin de Grado, sólo me queda agradecer a todas aquellas personas que han hecho que este trabajo salga adelante.

A la primera persona, que se lo quiero agradecer es a mi tutor Patricio, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este Trabajo fin de Grado. Muchas gracias por tus sugerencias y correcciones, por estar tan disponible y guiarme en este trabajo que tanto me costó aterrizar.

A mis padres, por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida.

En especial a mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, y que en esta vida nadie regala nada.

En especial a mi madre, por cada día hacerme ver la vida de forma diferente y confiar en mis decisiones.

A mi hermana por estar siempre que la he necesitado y apoyarme siempre.

A mis compañeros de clase y amigos, con los que he compartido grandes momentos.

ÍNDICE

1	Introducción, metodología y objetivos	2
1.1	Introducción y metodología	3
1.2	Objetivos	5
2	Estado del arte	6
2.1	Descripción del sitio a estudiar	7
2.2	Justificación legal del interés del estudio. Normativa existente	7
2.2.1	Marco Directivo en Europa	8
2.2.2	Marco Directivo en España	9
2.2.2.1	Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI)	11
2.2.2.2	Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundaciones de Andalucía (EPRIA)	18
2.3	Imágenes y noticias de las últimas inundaciones	18
3	Materiales y métodos	22
3.1	Conceptos fundamentales	23
3.2	Estación de aforo	23
3.2.1	¿Qué es una estación de aforo?	23
3.2.2	¿Cómo funciona una estación de aforo?	25
3.2.3	Red oficial de estaciones de aforo	25
3.2.4	Estaciones de aforo estudiadas	27
3.3	Datos e histogramas de las estaciones de aforo	29
3.3.1	Datos Anuales	29
3.3.2	Datos Mensuales	33
3.3.3	Datos Diarios	35
3.3.4	Datos Horarios	38
3.4	Períodos de retorno	40
3.5	Serie de ortofotos históricas	41
3.5.1	Conceptos importantes	42
3.5.2	Servicios WMS	45
3.5.2.1	Descarga de los archivos cartográficos empleados en este proyecto	45
3.5.2.2	Google Earth	47
3.5.2.2.1	Cargar un servicio WMS en Google Earth	48
3.5.3	Análisis de ortofotos	49
3.6	Modelos Digitales de Elevaciones	63
3.6.1	Introducción a los modelos digitales	63
3.6.2	Definición y estructura del modelo digital de elevaciones (MDE)	64
3.6.2.1	Estructuras de datos en el MDE	64
3.6.3	Construcción del MDE	67
3.6.3.1	Métodos directos: alfileros, GPS y estaciones topográficas	67
3.6.3.2	Métodos indirectos: restitución fotogramétrica	68
3.6.3.3	Métodos indirectos: digitalización de mapas topográficos	68

3.6.4 Reflexión sobre el estado de los MDE en España.....	69
3.6.5 Descarga de MDE y ortofotografías para Andalucía	71
3.6.5.1 Modelos digitales de elevaciones de Andalucía	72
4 Resultados	77
4.1 Ecuaciones de aguas someras y código numérico	78
4.1.1 Ecuaciones de Saint-Venant 2D.....	78
4.1.2 DassFlow.....	81
4.2 Preprocesado para simulación 2D.....	81
4.3 Configuración de Dassflow-Shallow	85
4.4 Resultados de la simulación	86
5 Conclusiones.....	92
Bibliografía	95

SINOPSIS

Analizar los distintos regímenes fluviales que ocurren en el río Guadalbullón a su paso por las Infantas (provincia de Jaén), prestando especial atención a las inundaciones ocurridas durante la última década como consecuencia de gotas frías y lluvias extremas en distintos períodos estivales.

Se modelarán los campos de velocidad y de calado mediante las ecuaciones de aguas someras. Adicionalmente, se desea conocer el impacto que tiene la actual vegetación de ribera y los aportes de sedimentos provenientes de la escorrentía del olivar en las modificaciones del cauce del río y, por tanto, en la dinámica de la inundación. Éste estudio permitirá la propuesta de estrategias de restauración fluvial y mejoras del ciclo agua/sedimento en trabajos futuros.

Se comenzará recopilando datos instrumentales a partir de las bases de datos de estaciones de aforo de Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Esta información servirá para cuantificar las series de crecidas de caudales y calados ocurridos en condiciones fluviales normales y extremas. Asimismo, estos datos se emplearán como condiciones de contorno en la simulación de los calados y campos de velocidad en un tramo del cauce próximo a las Infantas, etapa en la que se empleará adicionalmente un modelo digital del terreno de 5 metros de resolución espacial. Se realizará una interpretación conjunta de las condiciones hidráulicas, la morfología del cauce y la vegetación de ribera, así como su evolución a lo largo de los últimos 60 años. Para ello, se emplearán ortofotos de alta resolución partiendo del año 1956-1957.

Capítulo 1

Introducción, metodología y objetivos

En este capítulo se expondrán los fundamentos en los que se basa dicho proyecto. En dicho apartado, se explicará a groso modo algunos objetivos generales además de una breve explicación de cada uno de los capítulos de los que consta este trabajo fin de grado. Además, se mostrarán todos los objetivos que estarán presentes en dicho proyecto. Se expondrán tanto bjetivos generales como los objetivos específicos de cada uno de los apartados de los que consta el trabajo fin de grado.

1.1 Introducción y metodología

El trabajo que se presenta a continuación es un estudio sobre la dinámica fluvial del río Guadalbullón a su paso por Las Infantas, una pedanía de Jaén. Se va a estudiar este tramo ya que ha habido períodos de lluvias intensas, en los cuales el caudal del río ha aumentado considerablemente, produciendo consecuencias algunas veces calamitosas.

Las crecidas se producen cuando el agua cubre un terreno que asiduamente no está sumergido. Esto se debe a que el río recibe aportes de agua que superan la capacidad de almacenamiento, desagüe e infiltración de la cuenca. Las avenidas constituyen un fenómeno natural que ocurre periódicamente como se verá más adelante con el período de retorno, siendo éste el tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos de baja probabilidad, y que son esenciales para la configuración del relieve y para la determinación de las características y de las fertilidad del suelo en dicha cuenca fluvial. Sin embargo, muchas inundaciones son de carácter ocasional, tardan mucho tiempo en repetirse y resultan muy peligrosas debido a la ocupación humana de cauces y llanuras de inundación que aparentemente están a salvo de estos procesos.

A continuación, se va a proceder a explicar brevemente los diferentes capítulos en los que se basa el proyecto.

Primeramente se definirán unos objetivos que se cumplirán en dicho trabajo fin de grado, se tratarán tanto objetivos generales como específicos de cada apartado.

El tercer capítulo, se hablará del Estado del Arte, en el que se expondrá tanto la situación del lugar de estudio, la base legal del proyecto tanto a nivel de comunidad autónoma, nacional y a nivel europeo que deben cumplir los países de la Unión Europea. Por último, se describirán algunas noticias de medios de prensa conocidos que pondrán de manifiesto las crecidas del río Guadalbullón.

A continuación de esto, en el capítulo de Materiales y Métodos, se recopilarán datos instrumentales a partir de las bases de datos de estaciones de aforo de Confederación Hidrográfica del Guadalquivir desde el año 1911, del que se tienen medidas hasta la actualidad. Esta información servirá para cuantificar las series de crecidas de caudales y calados ocurridos en condiciones fluviales normales y extremas. Además, se presentará una serie de ortofotos digitales desde el año 1956 hasta la actualidad, incluyendo sus correspondientes modelos digitales terrestres

(MDT) para estudiar la evolución del terreno. Se realizará una interpretación conjunta de las condiciones hidráulicas, la morfología del cauce y la vegetación de ribera, así como su evolución a lo largo de los últimos 60 años.

Asimismo, los datos de las estaciones de aforo, se emplearán como condiciones de contorno en la simulación de los calados y campos de velocidad en un tramo del cauce próximo a las Infantas, etapa en la que se empleará adicionalmente un modelo digital del terreno de 5 metros de resolución espacial. Usando ecuaciones de aguas poco profundas, que se usan por la precisión de los resultados, capacidad para reproducir fenómenos complejos, etc.

Por último, se expondrán los resultados de la simulación y las conclusiones, discusiones y trabajo futuro de este proyecto.



Ilustración 1. Inundación del río Guadalbullón

Cabe destacar, que este trabajo es pionero en Jaén, pues hasta ahora no se ha realizado ningún estudio de este tipo en un río jienense (a parte del río Guadalquivir).

Por lo tanto es de especial interés y utilidad para nuestra sociedad y nuestro entorno, ya que estudiando los distintos regímenes fluviales que ocurren en el río Guadalbullón se realizará la propuesta de estrategias de restauración fluvial y mejoras del ciclo/sedimento en trabajos futuros. Derivándose en la disminución de las pérdidas de campos de cultivo, infraestructuras o cualquier pérdida humana o material.

1.2 Objetivos

Todo proyecto debe de tener una serie de objetivos que especifiquen los propósitos que se esperan conseguir en el trabajo. A continuación se van a mostrar tanto los objetivos de dicho trabajo fin de grado:

Los objetivos fundamentales de éste proyecto son:

- Conocer el marco legal del trabajo, ya que todos los trabajos se basan en la obligatoriedad de una serie de normas que deben cumplirse, tanto a nivel estatal como europeo.
- Analizar los distintos regímenes fluviales que ocurren en el río Guadalbullón a su paso por las Infantas, desde que se tienen datos, 1962, hasta al actualidad, dichos datos son obtenidos mediante las estaciones de aforo explicadas posteriormente. Además, se prestará atención a las inundaciones ocurridas durante la última década como consecuencia de gotas frías y lluvias extremas en distintos períodos estivales.
- Estudiar los distintos cambios producidos en el terreno gracias a los modelos digitales de elevaciones (MDT) y ortofotos para ver como ha variado el terreno debido a las lluvias intensas.
- Modelar los campos de velocidad y calado mediante ecuaciones de aguas someras. Adicionalmente, conocer el impacto que tiene la actual vegetación de ribera y los aportes de sedimentos provenientes de la escorrentía del olivar en las modificaciones del cauce del río, y por tanto, en la dinámica de la inundación. Este estudio permitirá la propuesta de estrategias de restauración fluvial y mejoras del ciclo agua/sedimento en trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del arte

En este apartado, se va a dar una descripción del sitio de estudio. Así como la justificación legal de dicho estudio, dado que dicho proyecto debe encuadrarse en el marco de la obligatoriedad derivada de la existencia de documentos legales. También, se hará referencia a las noticias y artículos sobre dichas inundaciones acontecidas en los últimos años.

2.1 Descripción del sitio a estudiar

El sitio a estudiar va a ser las proximidades del río Guadalbullón a su paso por Las Infantas.

El río Guadalbullón es un río del sur de España, más concretamente de Jaén, dicho río desemboca directamente en el río Guadalquivir. En su afluente principal, Quiebrajano, se sitúa el embalse del mismo nombre que regula sus aportaciones para abastecer a la población de Jaén, principal núcleo urbano de la cuenca.



Cabe destacar el interés del estudio de esta zona, pues en determinadas ocasiones, lluvias intensas, el nivel del agua aumenta hasta anegar zonas de cultivo, carretera e incluso zonas habitables, tales como casas o naves industriales.

Dicha imagen, ha sido obtenida a través de Google Earth con una escala 1:2000. Se puede observar donde se encuentra la zona de Las Infantas (encuadrada de un rectángulo negro).

Ilustración 2. Ortofoto del río Guadalbullón a su paso por las Infantas

2.2 Justificación legal del interés del estudio. Normativa existente

Este proyecto, debe encuadrarse en el marco de la obligatoriedad derivada de la existencia de documentos legales, los cuales deberían cumplir los países de la Unión Europea. Considerando que, las inundaciones pueden provocar víctimas mortales, el desplazamiento de personas, causar daños al medio ambiente, comprometer el desarrollo económico y debilitar las actividades económicas de la Comunidad.

Es obvio que las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. No obstante, algunas actividades humanas (incremento de asentamientos y la reducción de capacidad natural de retención de las aguas) y el cambio climático están aumentando las posibilidades de que ocurran.

Por lo que es necesario y conveniente reducir el riesgo de consecuencias negativas. Pero las medidas dirigidas a reducir dichos riesgos, para ser efectivos, deben de coordinarse en la medida de lo posible en toda una cuenca hidrográfica.

2.2.1 Marco Directivo en Europa

El día 23 de octubre de 2007, se aprobó dentro de la Unión Europea el documento legislativo 2007/60/CE. En dicho documento se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, impone la elaboración de planes de gestión de cuenca fluvial para cada demarcación hidrográfica con objeto de conseguir un buen estado químico y ecológico, y contribuirá a mitigar los efectos de las inundaciones. No obstante, la reducción del riesgo de inundación no es uno de los objetivos principales de esa Directiva, que tampoco tiene en cuenta los futuros cambios del riesgo de inundación que se derivarán del cambio climático. [\[1\]](#)

Entre 1998 y 2004, Europa sufrió más de cien inundaciones graves. Esas inundaciones causaron el desplazamiento de aproximadamente medio millón de personas y al menos 25.000 millones de euros de pérdidas económicas en seguros. Por este motivo la Comisión Europea aprobó dicha ley. El Real Decreto fundamentalmente ayudará a la coordinación de todas las administraciones extiéndase no solo a la política hidráulica general de todas las cuencas, sino fundamentalmente a la ordenación territorial, urbanística, protección civil, protección ambiental, infraestructuras, etc... en lo necesario para hacer efectiva la prevención y protección frente a los efectos adversos de las inundaciones.

Los beneficios de la aplicación del real decreto derivarán de un doble efecto:

Por una parte la introducción de las nuevas herramientas de gestión agilizará la implantación de los mecanismos de protección de los cauces y de las zonas inundables, lo que redundará en evitar o disminuir los daños ambientales y sobre los bienes y personas que se protegen.

Por otra parte, el conjunto de disposiciones introducidas en el real decreto permiten responder de modo más eficaz ante las fuertes presiones de ocupación que

sufren las zonas limítrofes con los cauces, lo que redundará en una disminución de los daños derivados de las inundaciones por avenidas.

El Real Decreto establece una serie de obligaciones fundamentales que se concretan en:

1) Evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) e identificación de las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSIs).

El Real Decreto 903/2010 prevé que se proceda a una evaluación preliminar del riesgo de inundación y, sucesivamente, a la identificación de las áreas de riesgo potencial significativo de inundación. [\[2\]](#)

Este último aspecto implica la evaluación cuantitativa de los daños potenciales generados por las inundaciones en sus diferentes periodos de retorno y el establecimiento de los umbrales que definan el concepto de “significativo”, con el objeto de identificar las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSIs).

2) Los mapas de peligrosidad y de riesgo en las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs). a elaborar antes de diciembre de 2013. Estos mapas incluirán las zonas geográficas que podrían inundarse clasificándolos en: baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos, probabilidad media de inundación y probabilidad de inundación, indicarán también la extensión de la inundación, los calados del agua o nivel de agua, la velocidad de corriente o el caudal de agua correspondiente. Incluyendo también el número de habitantes que pueden verse afectados y tipos de actividades económicas de la zona que puede verse afectadas.

3) Los planes de gestión del riesgo de inundación para cada Demarcación Hidrográfica: a elaborar antes de diciembre de 2015. Para esta fecha, los Estados deberán tener redactados los planos de gestión del riesgo de inundaciones para esas zonas que han identificado y catalogado.

2.2.2 Marco Directivo en España

Las inundaciones en España son el desastre natural con más impacto sobre las vidas y bienes en la península ibérica. La lucha contra sus efectos requiere la puesta en marcha de soluciones tanto estructurales como no estructurales. Entra las últimas medidas se encuentran los planes de Protección Civil y la implantación de sistemas

de alerta temprana, la corrección hidrológico-forestal de las cuencas y, especialmente, las medidas de ordenación del territorio.

Toda esta problemática y la búsqueda de soluciones han tenido un importante respaldo en nuestra legislación. Así, la seguridad de las personas y bienes frente a las inundaciones ha sido recogida tanto en el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, así como en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, modificada por la Ley 11/2005, de 22 de junio. [\[3\]](#)

Como primera respuesta a esta nueva Directiva, el Ministerio de Medio Ambiente está llevando a cabo el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNZCI), como elemento básico en la planificación territorial para la identificación y gestión adecuada de las zonas inundables, con el objetivo de disminuir los daños frente a inundaciones a la vez que se preserva el espacio fluvial para lograr un estado ecológico óptimo de nuestros cauces.

La determinación y delimitación de las zonas inundables según los criterios geomorfológicos (INDUROT) e hidráulicos (CEDEX) establece las siguientes figuras:

- Dominio público hidráulico
- Zona de flujo preferente
- Zonificación del área inundable o Muy frecuente: la que corresponde al dominio público hidráulico probable.

Paralelamente al desarrollo de los trabajos del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), se ha trabajado también en el marco normativo en los últimos años, en el cual se apoya actualmente el desarrollo de estos trabajos como es:

La modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 849/1986 de 11 de abril), según Real Decreto 9/2008 de 11 de enero, donde se da cabida a nuevos conceptos o definiciones, como la Zona de Flujo Preferente y la Vía de Intenso Desagüe, y se adaptan y completan otros a las demandas actuales, como son la definición de cauce (que deja de definirse por un criterio meramente hidráulico) y la zona de policía (que deja de ser una delimitación puramente geométrica).

Para el presente estudio se considerarán como zonas inundables las recogidas dentro de la definición del mencionado Reglamento:

“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.”

En el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir se han llevado a cabo numerosos estudios de inundabilidad elaborándose mapas de cada uno de ellos, aunque dichos mapas están sujetos a revisión continua. La revisión de estos estudios se llevará a cabo con una óptica interdisciplinar, teniendo en cuenta aspectos geomorfológicos e históricos, además de los hidrológico-hidráulicos. [4]

2.2.2.1 Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI)

EPRI, Evaluación preliminar del Riesgo de Inundación, específicamente en nuestro caso en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, existe con el fin de identificar aquellas zonas del territorio para las cuales se ha determinado que existe un riesgo potencial elevado de inundación o en las cuales la materialización de ese riesgo puede considerarse probable en los términos indicados en la Directiva 2007/60/CE, y así, tras el establecimiento de los umbrales de riesgo significativo, proceder a la identificación de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo por Inundación (ARPSIs).

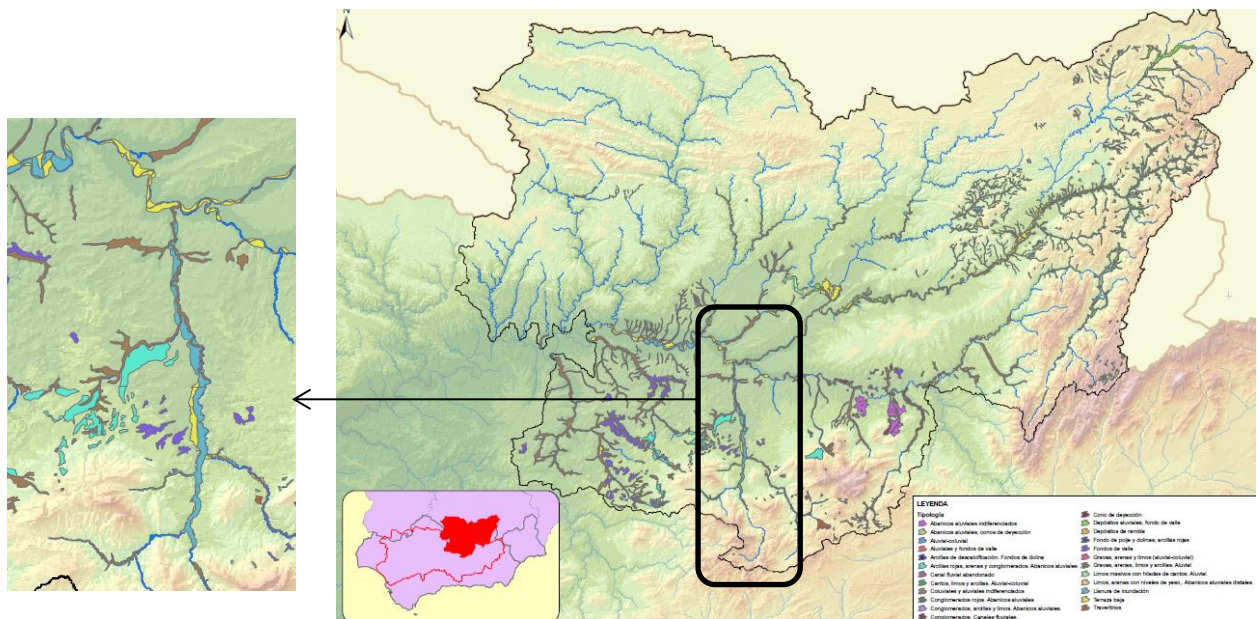
Este proceso se ha concretado en la identificación y preselección de unas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs), obtenidas al aplicar los umbrales de riesgo significativo. Todo ello conforme a las características de la cuenca y los criterios emanados de las directrices adoptadas por la Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, que en sucesivos apartados se exponen y desarrollan. En dicho documento vamos a indicar lo que concierne a nuestro proyecto. [5]

Área del Guadalbullón

EPRI tiene una serie de planos cartográficos en los que se indica el tipo de geología, peligrosidad, vulnerabilidad, riesgos y los ARPSIs. Los cuales serán explicados para nuestra zona en concreto.

Plano geológico

El primer mapa que vamos a exponer, es el geológico del alto Guadalquivir, en el se indica las zonas potencialmente inundables.



- Cono de deyección
- Depósitos aluviales, fondo de valle
- Depósitos de rambla
- Fondo de polje y dolinas, arcillas rojas
- Fondos de valle
- Gravas, arenas y limos (aluvial-coluvial)
- Gravas, arenas, limos y arcillas. Aluvial
- Limos masivos con hiladas de cantos. Aluvial
- Limos, arenas con niveles de yeso,. Abanicos aluviales distales.
- Llanura de inundación
- Terraza baja
- Travertinos

Ilustración 3. Plano Geológico

Procedemos a realizar un zoom sobre nuestra zona y sobre la leyenda. Podemos observar que nuestra zona, Las Infantas, hay cono de deyección y llanura de inundación.

Un cono de deyección, es una forma de modelado fluvial que en planta se caracterizan por tener una silueta cónica o en abanico y una suave pendiente (entre 1 y 10 grados, dependiendo de la pendiente por la que se desliza). Normalmente son las formas más importantes derivadas de la dinámica torrencial. Los torrentes que construyen no tienen un curso fijo, pudiendo cambiar de posición sobre toda la superficie del cono. Esta es la razón por la cual se puede inundar todo el cono. Las inundaciones en los conos son diferentes de las de los ríos donde el agua va subiendo. Por poner un ejemplo, las inundaciones del camping de Biescas (Huesca) con 87 muertos en 1996 es uno de los ejemplos más claros de cono de deyección.

Y una llanura de inundación es un espacio de terreno llano lindante con un río principalmente con sus tramos inferiores y constituidos por aluviones depositados por el río. Se originan por la migración de la franja de meandros aguas abajo; ensanchando por lo tanto el valle, cuyas laderas pueden llegar a separarse algunos kilómetros. En épocas de inundación, cuando el río rebosa sus orillas se depositan sedimentos a lo largo de éstas y en el mismo canal. El proceso eleva el canal del río por encima de la llanura aluvial. Estas orillas elevadas se conocen con la denominación de diques de canales y la zona próxima que queda a nivel inferior como «zona pantanosa». Los diques pueden constituir un peligro cuando existen ciudades en esas zonas, debido a la posibilidad de inundación.

Plano de peligrosidad

En este plano podemos observar las zonas de peligrosidad de la zona hidrográfica. Teniendo en cuenta, el plano anterior que indicaba que nuestra zona estaba en un cono de deyección y una llanura de inundación, se han asociado las distintas categorías de inundabilidad del GEODE y los periodos de retorno de los estudios previos a estos grados de peligrosidad, revisándose con la información el CNIH. Se han establecido 3 categorías de peligrosidad: Alta Media y Baja. Para nuestra zona, según el GEODE:

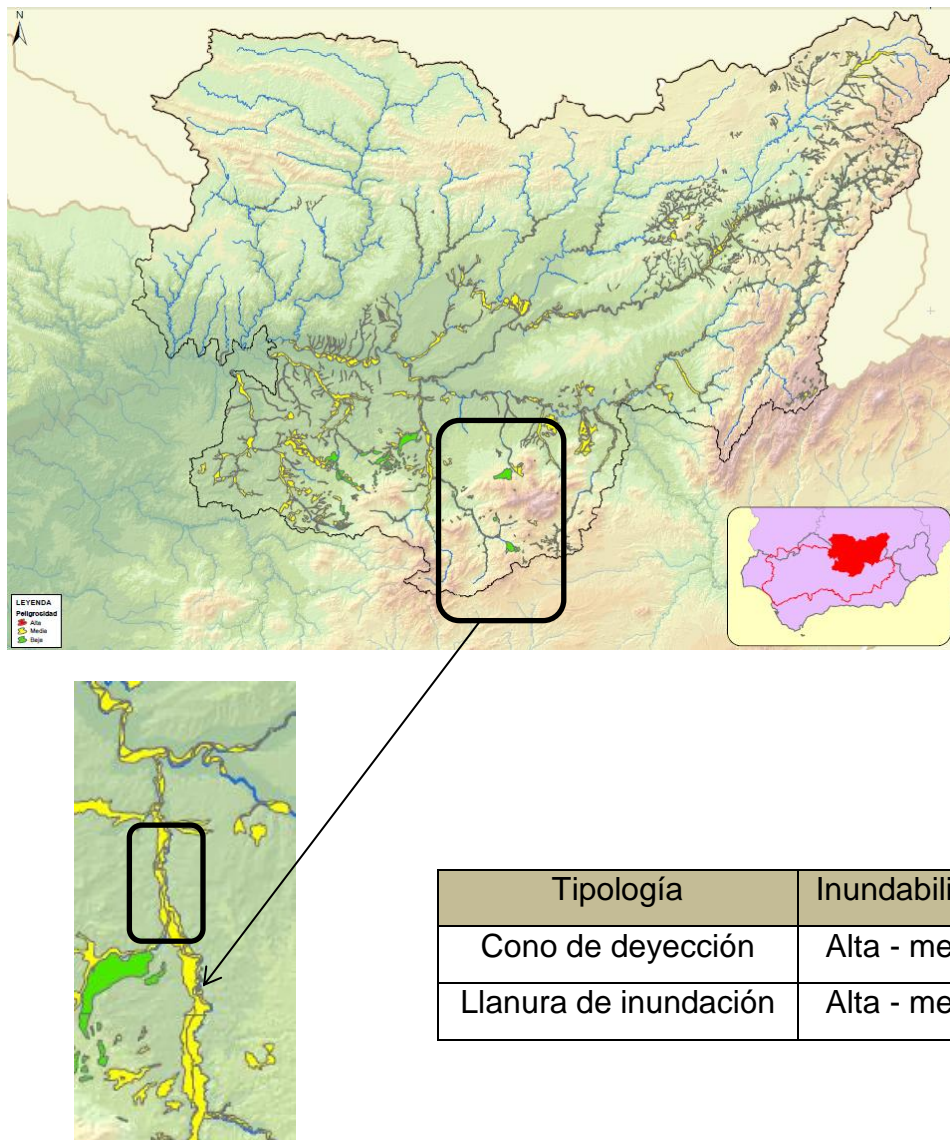


Ilustración 4. Plano de Peligrosidad

Plano de vulnerabilidad

Los usos actuales del suelo en la cuenca deben de clasificarse en función de su grado de exposición y vulnerabilidad, de forma que se puedan evaluar los impactos significativos o consecuencias potenciales negativas de las inundaciones para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica.

Los polígonos tendrán una cobertura simple cuando ésta sea única, y una cobertura compuesta cuando se encuentre formada por 2 o más coberturas simples y/o compuestas a su vez. Por ejemplo, cobertura simple podría ser ramblas, suelo desnudo, cultivos o terrenos sin edificación. En cambio, cobertura compuesta podrían ser asentamientos agrícolas, olivar, artificial compuesto (piscifactoría, oficinas, etc)

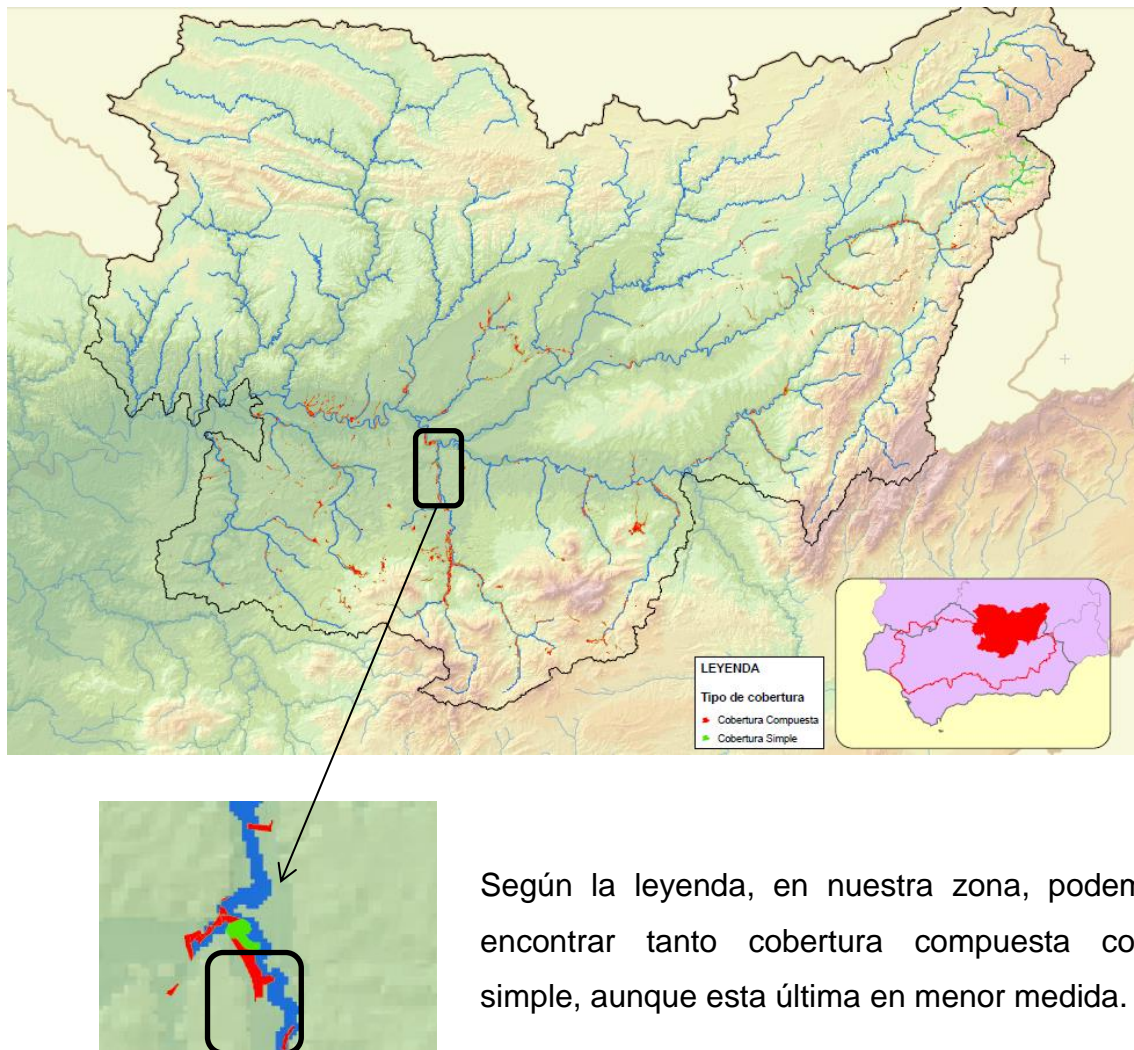


Ilustración 5. Plano de Vulnerabilidad

Plano de riesgo

Se ha realizado un análisis de las áreas obtenidas contrastándolo con los Planes de Protección Civil y con el Plan Especial ante Riesgo de Inundaciones de la Junta de Andalucía, revisando que ningún área, río o municipio que esté catalogado en dichos planes con riesgo significativo, se haya quedado fuera.

Se han establecido 4 categorías diferentes para representar los riesgos: Muy Alto, Alto, Medio y Bajo.



Se puede observar que según la leyenda, nuestra zona está entre riesgo bajo y medio. Esto no quiere decir que tenga menos riesgo que los demás, sólo que Las Infantas es un barrio periférico de Jaén de aproximadamente 500 personas y no está estudiada dicha zona con detenimiento. Pues debería ser riesgo medio-alto, pues es una zona de grandes inundaciones, como se verá más adelante en nuestro proyecto.

Ilustración 6. Plano de Riesgo

Plano de ARPSIs

Este es el último plano que tiene el documento EPRI, algunos tramos se han agrupado en Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs). Se han identificado un total de 109 ARPSIs a cada una de las cuales se ha asignado un código compuesto en primer lugar, por la matrícula identificativa de la Demarcación del Guadalquivir (ES050), a continuación “APSFR” (Areas of Potential Significant Flood Risk), posteriormente 2 letras en función de la cuenca “AG” (Alto Guadalquivir), “BG” (Bajo Guadalquivir), “CS” (Costero), “GE” (Alto Genil y Guadiana Menor) o “MG” (Medio Guadalquivir) y por último un número ordinal de tres dígitos.

Nuestra zona es la siguiente, que estaría entre:

ES050_APSFR_AG054 Río Guadalquivir en Mengíbar

ES050_APSFR_AG052 Río Guadalbullón

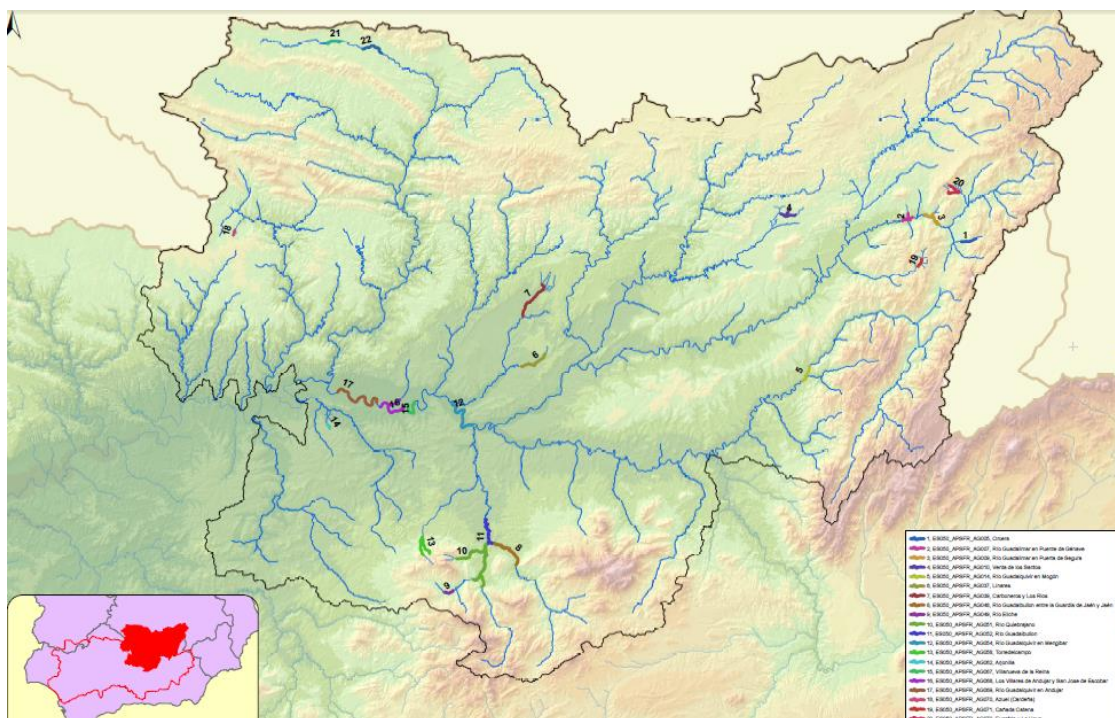


Ilustración 7. Plano de ARPSIs

Nuestra zona no está indicada como se puede ver a simple vista, ni en los planos ARPSIs, pero si está indicada como área de riesgo la zona del río Guadalbullón.

2.2.2.2 Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundaciones de Andalucía (EPRIA)

La Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundaciones de Andalucía (EPRIA) tiene como objetivo la identificación de las zonas donde existe riesgo potencial significativo de inundación. Para su determinación se ha realizado un análisis ponderado de los diferentes factores que determinan los riesgos de inundación tanto actual como potencial.

La elaboración de la EPRIA se estructuró en tres grandes bloques, uno primero donde se ha realizado una labor de recopilación de la información disponible, uno segundo de preselección de zonas de riesgo de inundación y uno último relativo a la definición de los umbrales de riesgo significativo de las Áreas de Riesgo Potencial de Inundación Significativo (ARPSIs) antes mencionadas.

Además de esto, en Andalucía la información contenida en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas ha sido tratada para su geo-referenciación, formándose una base de datos estructuradas por Demarcaciones Hidrográficas asociadas a unas capas de información regional. El objeto del trabajo fue elaborar un análisis de la información histórica disponible y la evaluación de los impactos de las inundaciones pasadas, con el propósito de predecir lo que pueda ocurrir en el futuro, para facilitar la realización de una evaluación preliminar del riesgo de inundaciones. [6]

2.3 Imágenes y noticias de las últimas inundaciones

En el siguiente apartado se va a dar un enfoque desde el punto de vista visual, es decir, se van a exponer fotografías que se realizaron después de una gran inundación así como una serie de noticias de medios de comunicación bastante importantes.

El fondo de un río con transporte de sedimento, puede presentar una configuración no plana sino ondulada, siguiendo las llamadas formas de fondo. Las formas de fondo tienen importancia porque participan en el transporte de sedimentos y porque intervienen decisivamente en la resistencia al flujo (rugosidad). Las formas de fondo ocurren con toda propiedad en lechos de arena, mientras que en ríos de grava y en ríos con materiales gruesos de granulometría extendida parecen ser que se presentan limitadamente o no se presentan (Martín Vide, 2002) [7].

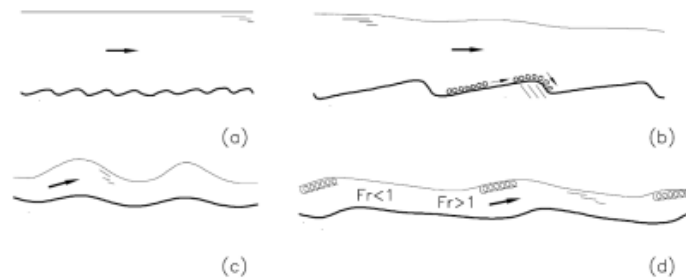


Ilustración 8. Formas de fondo: arrugas (a), dunas (b), antidunas (c), rápidos y pozos (d).

Como se puede observar en las siguientes fotografías hay tanto arrugas como dunas. Las arrugas o ripples son pequeñas ondulaciones con altura máxima del orden de centímetros y longitud de onda máxima del del orden de decímetros, solo aparecen con arena fina. En cambio, las dunas son ondulaciones triangulares pero con taludes muy diferentes: el de aguas arriba es muy suave y el de aguas abajo muy marcado. La superficie libre se ondula suavemente en oposición al fondo lo que indica que el régimen hidráulico es lento. Al tener mas velocidad, el lecho se ondula en formas simétricas llamadas antidunas que se migran aguas abajo o aguas arriba (Martín Vide, 2002).



Ilustración 9. Arrugas y dunas río Guadalbullón

Además, se puede observar como el agua se lleva por delante no sólo árboles, bienes, si no que puede provocar una pérdida de suelo creando terrazas escalonadas como se puede ver en la siguiente imagen.



Ilustración 10. Terraza escalonada

Asimismo, existen un gran número noticias sobre las inundaciones del río Guadalbullón, pero sobre todo imágenes sobre los sucesos. Algunas noticias importantes son:

Lasexta. Se desborda el río en Las Infantas (Jaén) y se espera subida del Guadalquivir [8]. Con fecha a 23 de febrero de 2010, en dicho artículo se publica:

Jaén.- El río Guadalbullón se ha desbordado en Las Infantas, barriada de Jaén capital, y el barro se ha acumulado en calles, casas, naves y campos de labor, mientras en Marmolejo y Andújar esperan lo peor para esta tarde, pues el caudal del río Guadalquivir podría superar los 1.500 metros cúbicos por segundo.

El País. En dicho periódico, aparece referenciada Las Infantas con la misma fecha, 23/02/2010 [9]. Con el título de “La crecida del Guadalquivir pone alerta a tres provincias andaluzas”. En el periódico se detalla:

Jaén: La Delegación de la Junta de Andalucía en Jaén informa de que el río Guadalbullón se ha desbordado en Las Infantas, barriada de la capital, donde el barro se ha acumulado en calles, casas, naves y campos de labor. Anoche, se produjeron "desalojos puntuales" en la zona Los Puentes, también en la capital.

Andalucía Información

Con fecha a 25/02/2010 dice así el artículo [10].

“El barrio de Las Infantas recupera, poco a poco, la normalidad. Varios días después de la riada causada por el desbordamiento del río Guadalbullón, los vecinos de la zona analizan los daños. Entretanto, el suministro de agua potable se recuperó ayer por la tarde, aunque con algunos problemas.

El alcalde pedáneo del barrio, Pedro Quesada, confirmó que la situación “vuelve a su cauce normal”, excepto en el suministro de agua. La rotura de una tubería por la riada causó la interrupción del servicio. Operarios trabajaron desde el pasado miércoles en la zona hasta que se restableció. No obstante, la fuerza con la que llegaba el agua a las casas, a última hora de ayer, era muy baja. “Ha habido un tapón de cal en la tubería colocada y tendremos el servicio en las próximas horas”, resaltó Quesada.

Al margen del servicio de agua, los vecinos de casi una decena de casas, principalmente de la zona más baja, se vieron seriamente afectados. A ello hay que añadir el “desastre” que ha provocado la “subida tan grande” del río en las huertas de la zona.”

Ideal Jaén

El período Jienense argumentó lo siguiente el día 07/12/2010, [11] con el título “Afectados por las inundaciones en Las Infantas: “Nunca había visto nada así”.”

Viviendas del barrio jienense de la Infantas, situadas en la parte baja de la pedanía -calle Francisco del Moral- vieron impotentes cómo el agua entraba en sus casas ayer a la media noche, cuando una potente tormenta descargó sobre todo el área metropolitana de la capital.

Los vecinos afectados, que han perdido enseres y mobiliario, aseguran que “nunca habíamos visto nada igual” y añaden que la avenida sobrevino tras fallar una especie de balsa construida para proteger la vía del tren cuando se producen precipitaciones torrenciales.

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y Ministerio

En algunas páginas y archivos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir aparecen escritos sobre las inundaciones. Se añade una tabla que indica los daños de las inundaciones entre 2010 y 2011.

EPISODIOS DE INUNDACIONES MÁS RECIENTES - AÑO HIDROLÓGICO 2010-2011						
CH GUADALQUIVIR						
Localización		Fecha del episodio	Origen de la información	Descripción	Daños	Actuaciones llevadas a cabo por la Confederación
Provincia	Término municipal					
Jaén	Las Infantas	6-jun-11	Prensa	Inundación de casas y garajes. Cortes de carreteras. Daños a la vía del tren	materiales importantes	
Jaén	Baeza, La Yedra, Vilches, Mengibar	6-jun-11	Prensa	Inundación de bajos, portales y locales.	materiales importantes	
Jaén	Mágina	6-jun-11	Prensa	Inundación de viviendas y locales	materiales	
Almería	Vélez Rubio	6-jun-11	Prensa	Inundación de viviendas, bajos y garajes	materiales	
Córdoba	Baena	6-jun-11	Prensa	Inundación del Aula de la Naturaleza	materiales	

Ilustración 2. Episodios de inundaciones

Además de noticias, hay una gran cantidad de imágenes relacionadas con las inundaciones que han acaecido en Las Infantas, algunas se presentan a continuación:

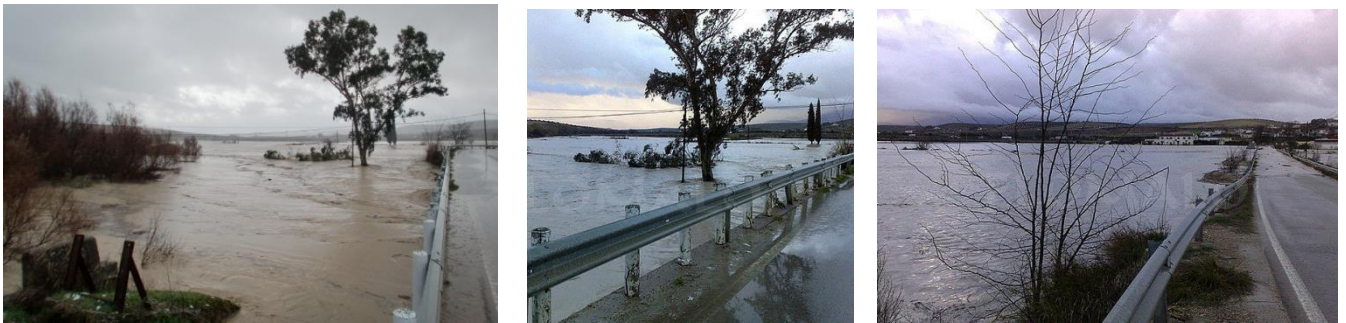


Ilustración 32. Inundación Puente de Villagordo 2010 y 2014

Capítulo 3

Materiales y métodos

En este apartado se estudiarán los caudales históricos y el calado muestreados en el río Guadalbullón a través de varias estaciones de aforo. Debido a la ausencia de datos en algunos períodos en la estación del río Guadalbullón, averías provocadas por crecidas extremas, obtendremos datos complementarios de otros aforos ubicados en tributarios del río o del mismo río Guadalquivir. También se introducirán unos conceptos importantes que pueden ser de utilidad para el lector que no esté familiarizado con la temática en cuestión.

3.1 Conceptos fundamentales

Para entender el proyecto se debe tener idea de algunos conceptos generales. Tales como períodos de retorno, gota fría, estaciones de aforo, etc. Vamos a presentar algunos conceptos a groso modo.

Un período de retorno [12] se define como el número medio de años entre acontecimientos sucesivos de un evento hidrológico con una cierta magnitud. El concepto de frecuencia o periodo de retorno responde a la idea de que la probabilidad de que se produzca una lluvia de determinadas características (en intensidad y duración) siempre va asociada a un intervalo de tiempo concreto. Los períodos de retorno varían típicamente de 10 a 100 años, y en lugares donde la Precipitación Máxima Probable no ha sido definida, hasta 10,000 años.

De acuerdo a la definición establecida en Francisco Martín León (2003), la gota fría [13] es probablemente uno de los términos meteorológicos más usados coloquialmente en España. La gota fría se asocia vulgarmente con inestabilidad atmosférica. En esta acepción subyace el hecho de que la gota fría es sinónimo de la presencia de aire muy frío en niveles medios y esto, unido al aire cálido de Mediterráneo en la época otoñal (o incluso durante la primavera-verano sobre las tierras soleadas peninsulares provoca lluvias extremas de corta duración.).

Es importante conocer el término gota fría, pues ha habido varios sucesos en España en los que ha habido fallecidos, desaparecidos y en algunos casos especiales, pérdidas materiales por valores bastantes elevados, en torno a 50 millones de euros, como es el caso de la gota fría en Tenerife de 2002.

3.2 Estación de aforo

3.2.1 ¿Qué es una estación de aforo?

Un aforo es un local, ya sea natural o preparado para tal efecto, o sistema de medición que partiendo del nivel de agua, calcula el caudal circundante que pasa por una determinada sección de un río. En ocasiones, se relaciona el caudal del río con la profundidad de la lámina de agua mediante curvas y relaciones empíricas calibradas de antemano. [14]



Ilustración 13. Esquema Ilustrativo de una Estación de Aforo

Algunas partes importantes de una estación de aforo son las siguientes:

1. Equipo de transmisión: dispositivo que permite recibir las preguntas del punto de concentración y enviarle los datos almacenados.
2. Estación remota: equipo de adquisición de datos al que están conectados los medidores y que sin necesidad de presencia de personal, almacena la información de los mismos.
3. Pozo tranquilizador: alberga el flotador y permite el registro exacto del nivel del agua.
4. Limnómetro: medidor el cual es accionado por el flotador sobre la superficie del agua y que desciende y asciende con ella.

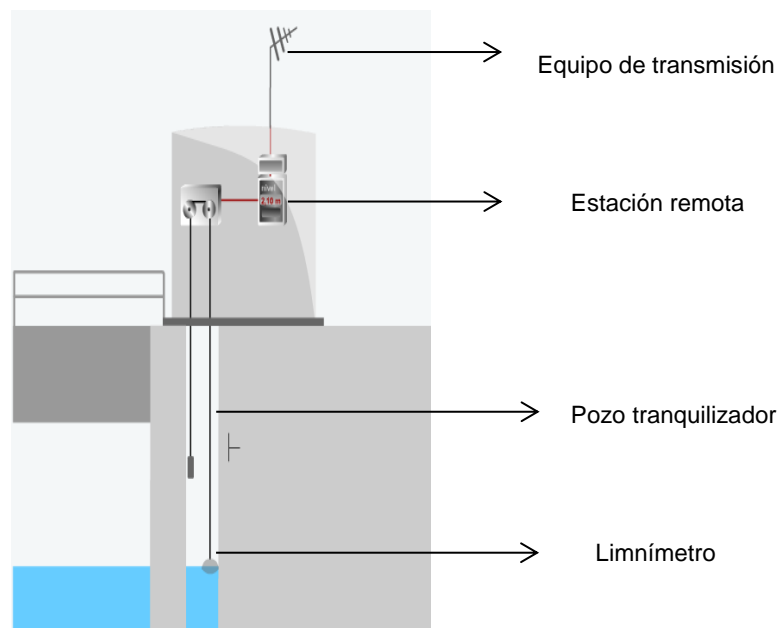


Ilustración 14. Esquema más preciso de una estación de aforo

3.2.2 ¿Cómo funciona una estación de aforo?

Está claro que para poder medir un caudal con exactitud es necesario conocer el área transversal que moja el río y la velocidad media del flujo en dicha sección.

Cuando no se necesita una información continua del caudal, o en canales en los que las fluctuaciones de nivel se producen de una forma gradual, pueden obtenerse datos suficientes efectuando lecturas periódicas del nivel del agua, a partir del cual se obtiene el área mojada y la velocidad mediante ecuaciones de correlación previamente calibradas.

Cuando el nivel del río aumenta o disminuye, el limnómetro detecta esta variación y envía una señal a la estación remota que registrará esta medición. En cada intervalo de tiempo programado los puntos de concentración recogen las últimas mediciones registradas. El Centro de proceso de Cuenca, en nuestro caso, la Cuenca del Guadalquivir, solicitará la información y la transforma representándola en gráficas y/o tablas de datos.

3.2.3 Red oficial de estaciones de aforo

Los datos que hemos recogido en este estudio provienen del Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca del Guadalquivir (SAIH), que puede consultarse en el enlace [\[15\]](#), además del Sistema de Información del Anuario de Aforos [\[16\]](#).

La Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir consta de alrededor de 70 estaciones de funcionamiento que se reparten por toda la cuenca.

De acuerdo al Catálogo de Inundaciones Históricas de la cuenca del río Guadalquivir (CNIH 2011), la primera inundación datada en el valle del Guadalquivir aconteció en Córdoba en el año 711 d.C., mientras que la segunda fue en Sevilla el 849 d.C. Cabe destacar, que la primera inundación datada en la provincia de Jaén se corresponde con el año 1618 d.C. Aunque no se conoce ninguna crecida anterior a esa fecha en el alto Guadalquivir, obviamente cabe pensar que esto es debido a una falta de información y estudios científicos sobre paleoinundaciones ya que no existen registros documentales. Quizá por la falta de inversión que hubo en estos temas o puede ser por el lento desarrollo de la provincia.

Entre 1865 y 1911, el Estado adquirió una creciente dimensión hidráulica que se reflejó en el organigrama de la Administración. Al mismo tiempo, las concesiones a nuevos usuarios (mayores demandas urbanas, captaciones subterráneas, aprovechamientos hidroeléctricos etc.) movilizaron los recursos hídricos con una orientación claramente productivista.

Fue en 1991 cuando el Ministerio de Fomento dio instrucciones a las Divisiones Hidráulicas para que se instalaran a escalas y practicara aforos a fin de establecer los correspondientes estudios.

En lo que se refiere al SAIH del Guadalquivir, a finales de 1993 comenzó su implantación en toda la cuenca, estando en la actualidad totalmente operativo. La red SAIH se extiende por 63,160 km² de cuenca y se distribuye por las Provincias de Córdoba, Granada, Huelva, Jaén y Sevilla. Cabe destacar que consta de más de 400 puntos de control entre los que se incluyen: 68 presas, 84 tomas de riego o abastecimiento, 27 centrales hidroeléctricas, 104 marcos de control o aforos en río y 146 pluviómetros. Todos estos puntos, que cuentan con un total de casi dos mil sensores instalados, se agrupan en 229 puntos de transmisión de datos [\[17\]](#).

Los beneficiarios del sistema son todos los usuarios, empresas y ciudadanos, en general, que se abastecen de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas controladas o que son susceptibles de verse afectados por posibles avenidas o inundaciones en las mismas.

El SAIH ha puesto a disposición de los ciudadanos un sistema automático de información que permite:

- Suministrar automáticamente y en tiempo real información sobre las variables climáticas e hidrológicas que son significativas y condicionantes de la gestión, control y operación hidráulica de la cuenca.
- Controlar y optimizar a corto plazo la operación de los embalses, canales y conducciones principales de la cuenca, tanto a efectos de satisfacción de demanda como de control de avenidas.
- Hacer previsiones a corto plazo sobre la evolución de niveles y caudales en los ríos de la Cuenca y generar automáticamente alarmas, lo cual permitirá minimizar los daños causados por avenidas e inundaciones.

Los Anuarios de Aforos tienen como objetivo la publicación de los datos hidrológicos suministrados por las Confederaciones Hidrográficas y Administraciones

Hidráulicas de Cuencas Intracomunitarias. El Sistema de Información del Anuario de Aforos proporciona los datos hidrológicos procedentes de las estaciones de aforo en ríos, embalses, conducciones y estaciones evapométricas asociadas a los embalses.

3.2.4 Estaciones de aforo estudiadas

Se estudiarán cuatro estaciones de aforo, entre las cuales se encuentran la zona de Las Infantas. Dos estarán situadas cerca de Mengíbar, la que mide el caudal del Guadalquivir y la otra mide el caudal del Guadalbullón. Y otras dos, cerca de Jaén, que miden el caudal del río Guadalbullón proveniente de Granada y el del río Quiebrajano. Aquí se puede apreciar la situación en el mapa de cada una de las cuatro secciones de aforo, como se aprecia, se encuentran delimitando el río Guadalbullón a su paso por las infantas.

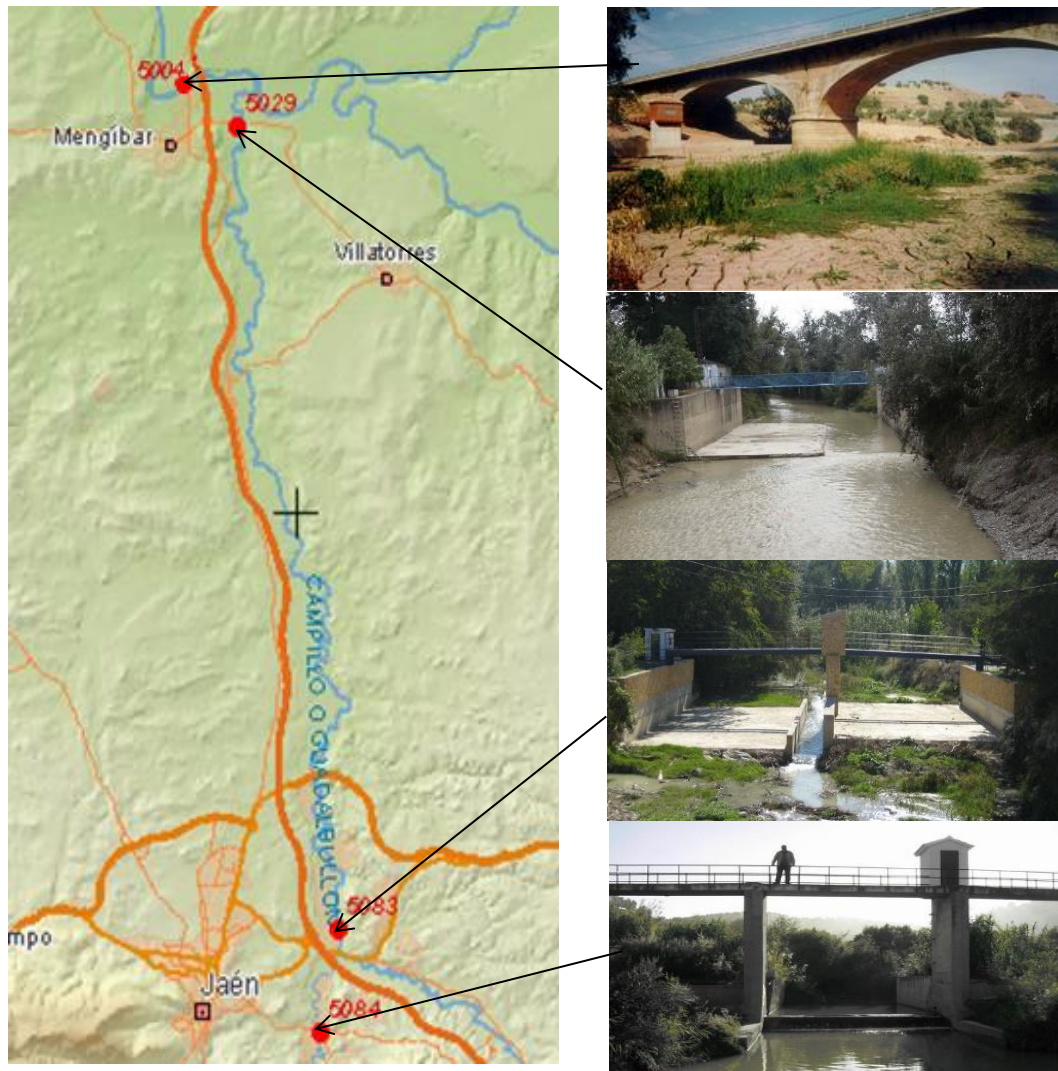


Ilustración 15. Estaciones de aforo estudiadas

A continuación se describen brevemente los detalles de cada una de las estaciones de aforo:

Aforo - Estación 5029 - A07: Río Guadalbullón en Mengíbar

La estación del Guadalbullón es la más importante, ya que se puede conocer el calado y caudal del río de manera continuada.

La estación es una estación de encauzamiento con caudal de aguas bajas. Dicha estación comenzó a funcionar en 1911 y sigue operativa actualmente.



Ilustración 16. Estación Guadalbullón en Mengíbar

Aforo - Estación 5004 - A08: Río Guadalquivir en Mengíbar

La estación del Guadalquivir, se ubica en el río Guadalquivir próximo a Mengíbar. El interés de dicha estación radica en que permite estudiar la relación existente entre las crecidas del río principal (Guadalquivir) y del afluente de estudio (Guadalbullón).

Funciona desde 1911 y actualmente sigue operativa.



Ilustración 17. Estación Guadalquivir en Mengíbar

Aforo-Estación 5083: Río Guadalbullón en Puente Nuevo

Se puede ver la estación del Guadalbullón a su paso por Puente Nuevo.. El tipo de estación es de encauzamiento con azud vertedero. Funciona desde 1970 hasta nuestros días.



Ilustración 18. Estación Guadalbullón en Puente Nuevo

Aforo-Estación 5084 - A28: Río Quiebrajano en Puente Jontoya

La estación del Río Quiebrajano, la vamos a estudiar para comparar como afecta el caudal del río Quiebrajano al del Guadalbullón, para ver en qué medida aumenta este último cuando se le une el río Quiebrajano. La estación es del tipo encauzamiento con canal de aguas bajas. Funciona desde el 1974 hasta la actualidad



Ilustración 19. Estación Quiebrajano en Puente Jontoya

3.3 Datos e histogramas de las estaciones de aforo

Se va a mostrar los datos máximos anuales, mensuales, diarios y horarios de cada una de las cuatro estaciones, aunque se utilizarán en mayor medida sólo dos de ellas. Y se podrá apreciar las semejanzas y diferencias existentes entre los fenómenos hidráulicos que acontecen en cada uno de los ríos.

Así se sacarán algunas conclusiones que se presentarán a posteriori.

3.3.1 Datos Anuales

Como se puede ver en la primera gráfica, gracias a los datos obtenidos del SAIH, se van a realizar histogramas para la estación del río Guadalbullón en Mengíbar. Los datos son de los caudales máximos diarios anuales.

Más adelante, se procederá a ver qué años han tenido mayor crecida para así realizar la simulación, pues es inservible el uso de caudales mucho mayores a los documentados. Si el caudal máximo que se ha observado ha sido de unos $250 \text{ m}^3/\text{s}$ sería una pérdida de tiempo simular una crecida de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ pues esta última no sucedería o tendría muy poca probabilidad. Así mismo, en la simulación no se procederá a realizar la misma con un caudal relativamente bajo, pues como veremos más adelante, las crecidas se suelen repetir como se explicaba en el concepto de período de retorno.

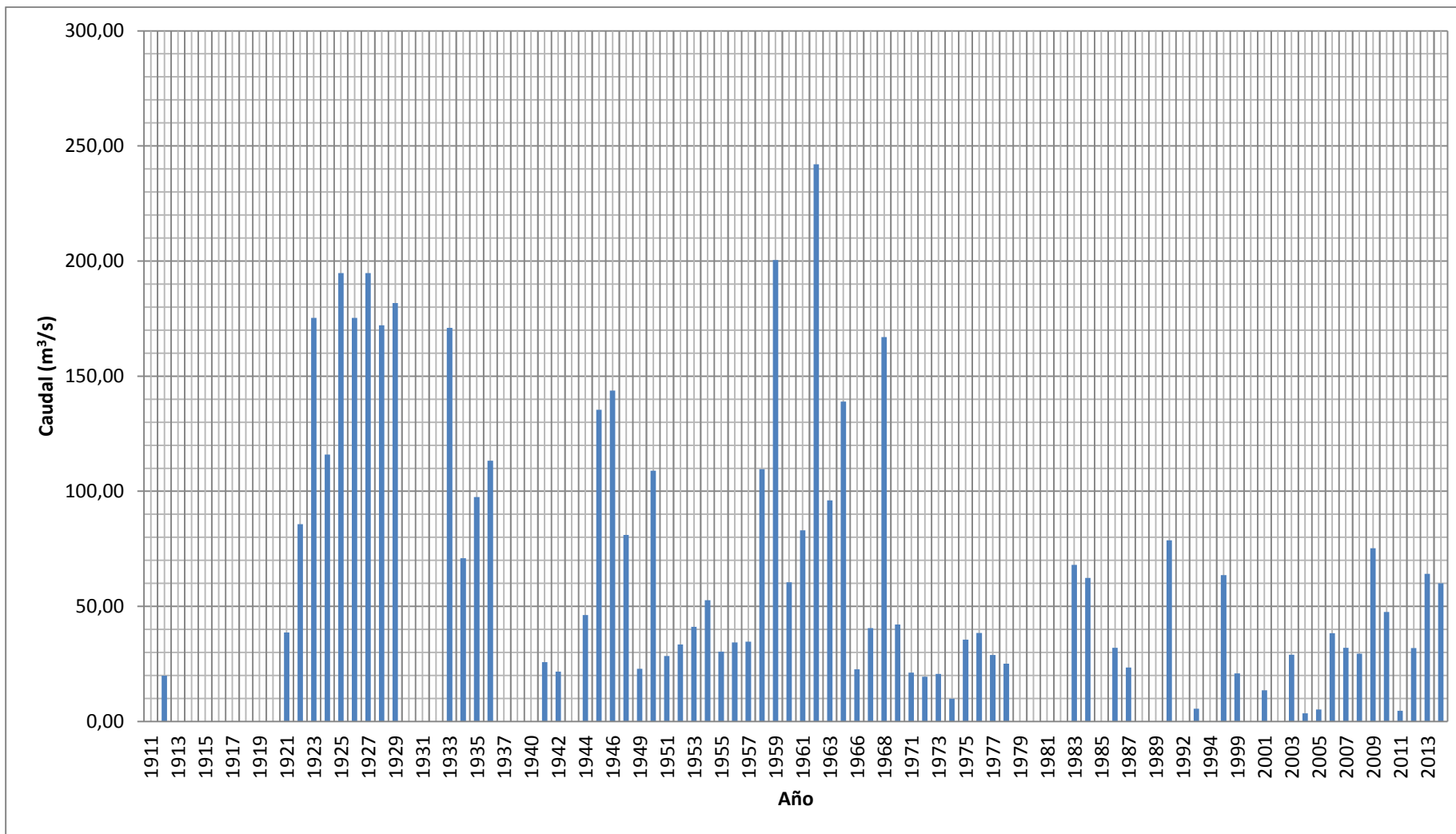
En cuanto a las dos gráficas siguientes, la primera del río Guadalbullón en Mengíbar y la otra del río Guadalquivir en Mengíbar también, podemos observar

varias similitudes. De la primera sólo se tienen datos desde 1911 hasta la actualidad, además hay algunos años en los que no hay datos, probablemente son años de crecidas grandes en los que el sistema de medida falló mecánicamente.

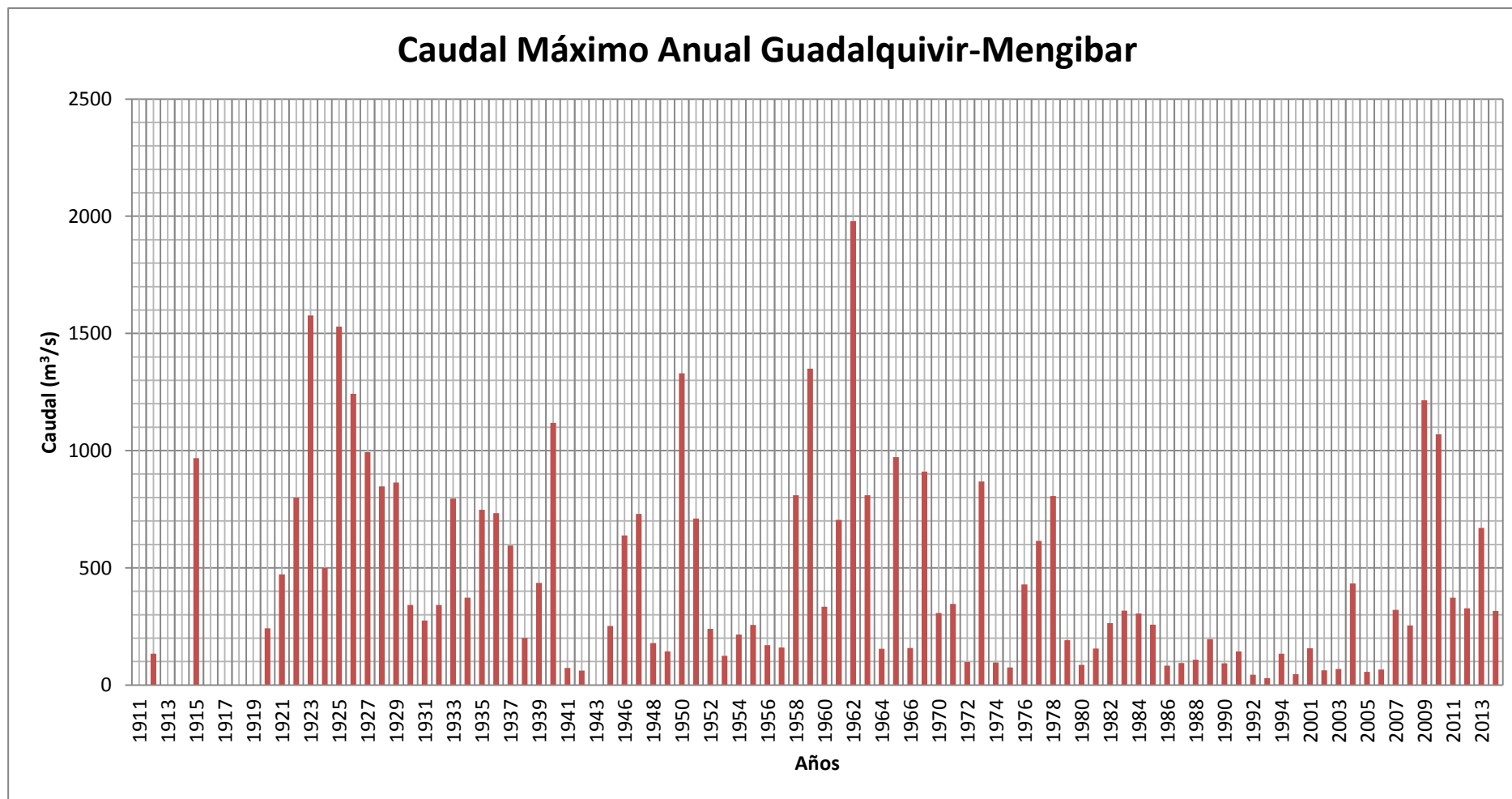
El período que va desde 1920 hasta 1930 fue una década de lluvias intensas, pues están muy cerca del caudal máximo registrado, en torno a $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Cabe destacar el año 1962, en el cual se produce la mayor crecida para este río, $255 \text{ m}^3/\text{s}$.

Del mismo modo, en la segunda gráfica, los datos van desde 1949 hasta la actualidad. En esta gráfica, se puede observar que hubo un máximo en 1962. Por lo que en este año, el río Guadalquivir aumentó más de 10% debido al caudal proveniente del río Guadalbullón. Como se puede ver, cerca de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Guadalquivir y $255 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Guadalbullón.

Se puede observar que en los últimos años, también representa el río Guadalbullón en torno a un 10% del Guadalquivir. Para ser más precisos, a continuación, se va a hacer un estudio exhaustivo de los últimos años, en los cuales también ha habido crecidas significativas así como inundaciones importantes.



Gráfica 1. Caudal máximo anual Guadalbullón-Mengíbar

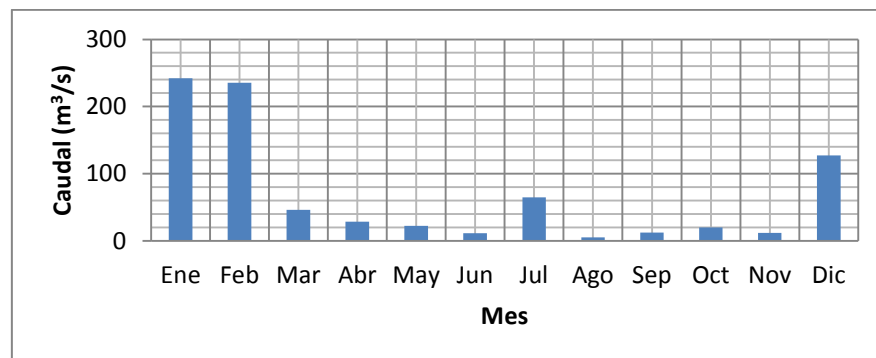


Gráfica 2. Caudal máximo anual Guadalquivir-Mengibar

3.3.2 Datos Mensuales

Se van a examinar los datos mensuales de los años cuyas crecidas han sido más significativas.

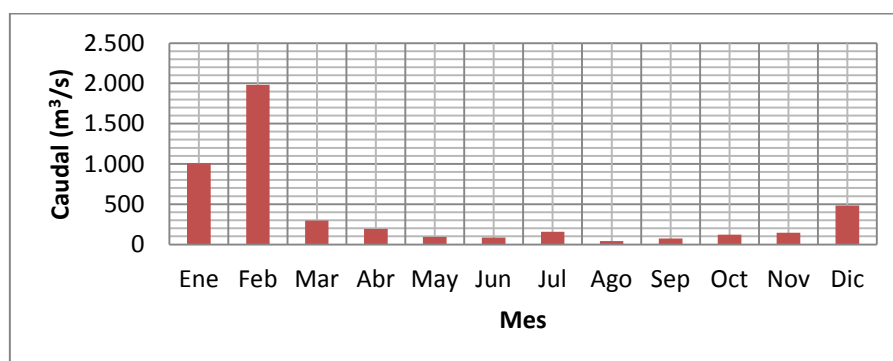
La máxima crecida del Guadalbullón fue datada en el año 1962, los máximos se encuentran en los meses de invierno, como cabía de esperar. Llegando a su máximo en enero, llegan a 255 m³/s.



Gráfica 3. Caudal máximo mensual Guadalbullón 1962

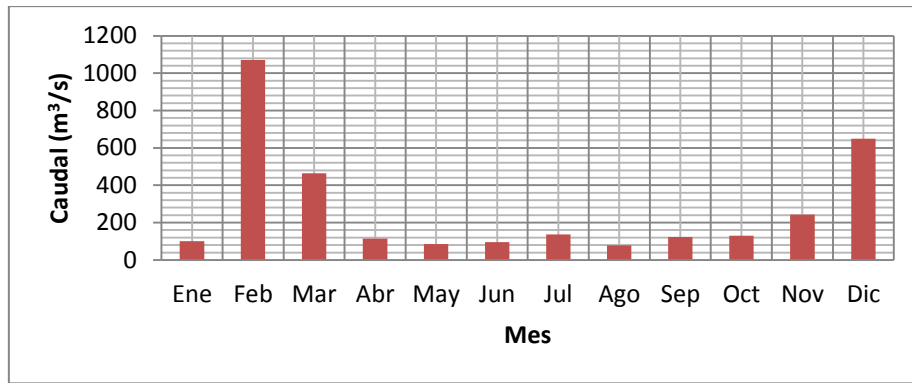
Análogamente, la gráfica 4 muestra la evolución del caudal máximo mensual en el río Guadalquivir durante el año 1963.

Se puede observar como al comparar coinciden los datos y se puede verificar que las crecidas del río Guadalbullón y Guadalquivir están bien correlacionadas durante los meses de Enero y Febrero.



Gráfica 4. Caudal máximo mensual Guadalquivir 1962

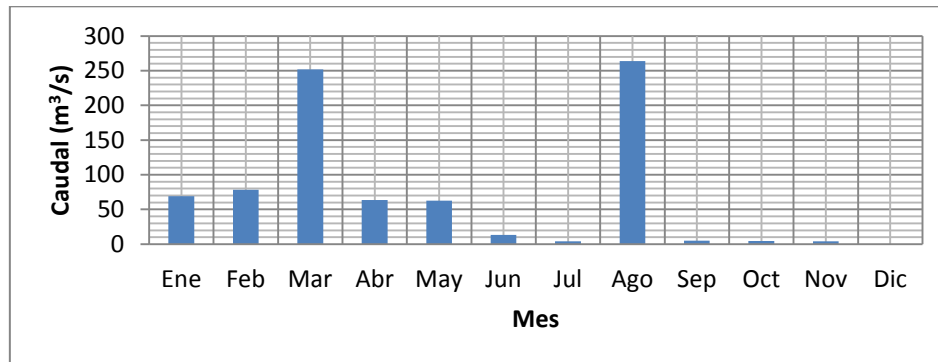
También se estudia la última crecida que hubo en 2010. Para la cual no tenemos datos de la estación de aforo del Guadalbullón. Pues este dejó de proporcionar datos posiblemente debido a un fallo mecánico. Sólo hay datos disponibles para la estación del río Guadalquivir.



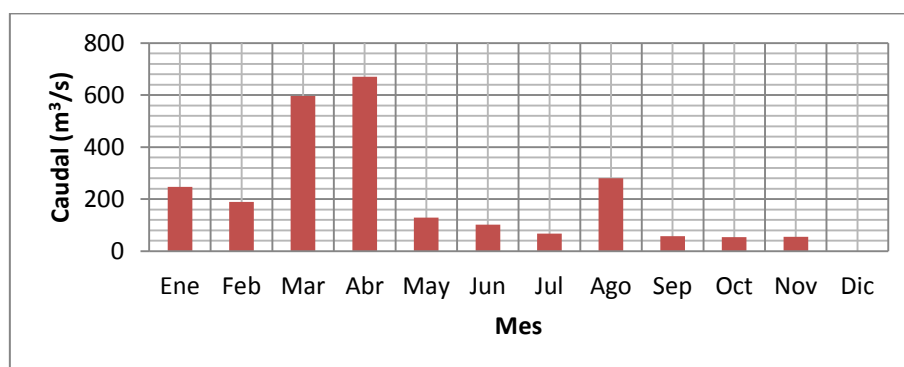
Gráfica 5. Caudal máximo mensual Guadalquivir 2010

Se puede distinguir como durante el mes de febrero aumenta significativamente el caudal desde unos 100 m³/s a unos 1100 m³/s.

Así mismo, hace relativamente poco, durante el 2013 hubo dos grandes crecidas también en el río Guadalbullón que se hacen visibles en las siguientes gráficas:



Gráfica 6. Caudal máximo mensual Guadalbullón 2013



Gráfica 7. Caudal máximo mensual Guadalquivir 2013

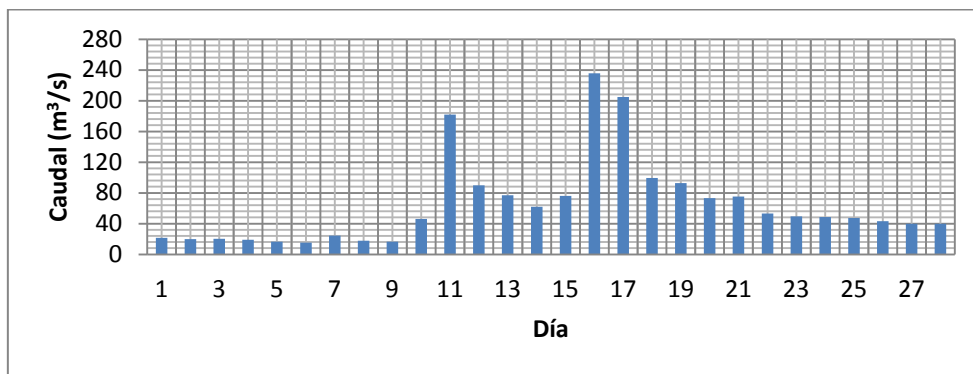
Como se puede observar, durante los meses de marzo y agosto se ha producido una subida bastante elevada de caudal. Como se aprecia en marzo, el caudal aportado por el Guadalbullón al Guadalquivir fue aproximadamente del 40 %, en

cambio, el caudal proporcionado del Guadalbullón al Guadalquivir es prácticamente del 100% en agosto.

3.3.3 Datos Diarios

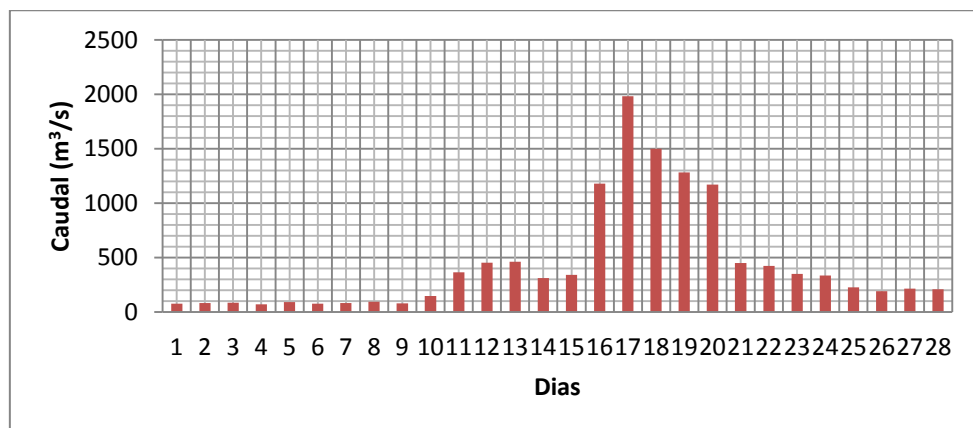
Ya se han estudiado los datos mensuales, a continuación se van a estudiar los datos diarios y horarios más significativos de los meses anteriormente expuestos.

Se puede observar como durante el mes de febrero de 1962, en el que mayor fue la crecida, podemos apreciar que para los días 16-17 hay un aumento considerable del caudal, aumentando de unos 80 m³/s a 240 m³/s.



Gráfica 8. Caudal máximo diario Guadalbullón Febrero 1962

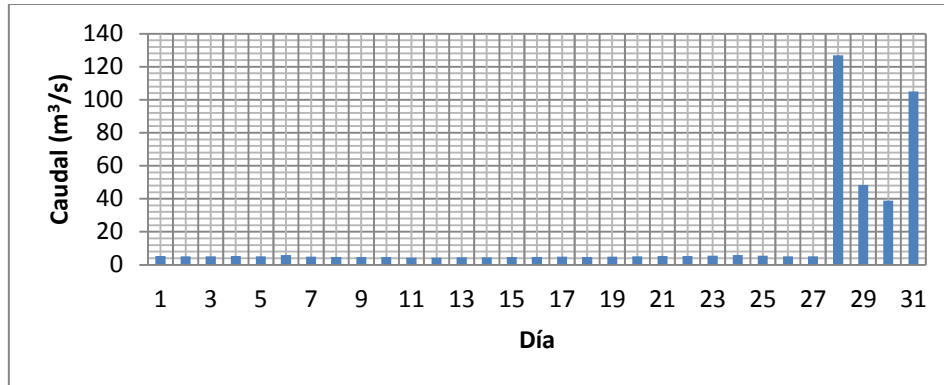
El caudal máximo para el 16 de febrero de 1962 fue de 235.5 m³/s en el río Guadalbullón. Y de 1980 m³/s en el río Guadalquivir a su paso por la estación en Mengíbar. Posiblemente fue una de las mayores inundaciones del siglo XX de la zona alta del Guadalquivir.



Gráfica 9. Caudal máximo diario Guadalquivir Febrero 1962

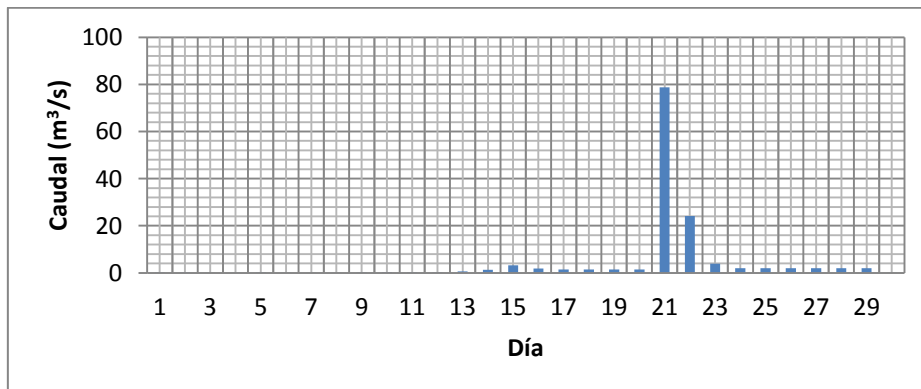
Como se ha visto antes, la gota fría es normalmente un fenómeno atmosférico bastante catastrófico o intenso. Un ejemplo es el ocurrido en Diciembre de 1962 que fue de 127 m³/s, en el que en cuestión de horas, el caudal aumento casi en 120

m^3/s . En Diciembre de este año, el Guadalbullón aportó al Guadalquivir $127 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzando el Guadalquivir un caudal de $273 \text{ m}^3/\text{s}$. El río Guadalbullón aportó casi un 50% del caudal total.



Gráfica 10. Caudal máximo diario Guadalbullón Diciembre 1962

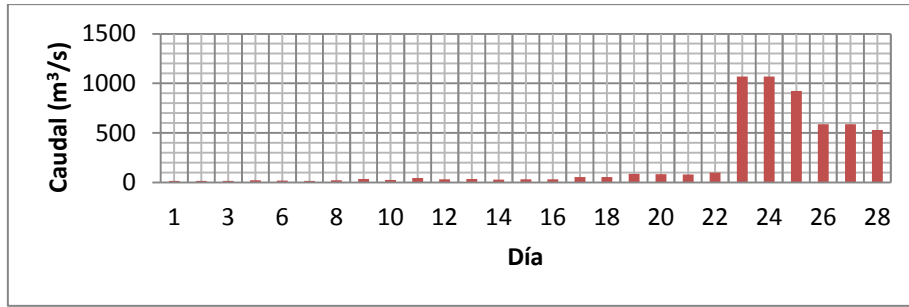
Por poner otro ejemplo, podemos observar como en 1991 hubo un día en el que se dio este fenómeno. Como podemos ver en este gráfico, fue el 21 Junio de 1991.



Gráfica 11. Caudal máximo diario Guadalbullón Junio 1991

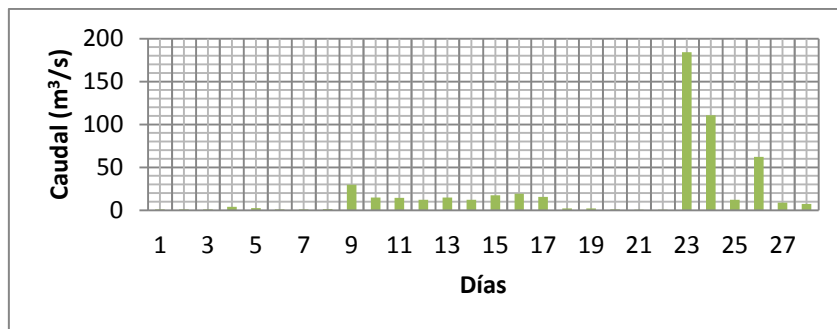
Este proceso ocurrió después de lluvias muy débiles y no fue de esperar, más aun siendo en un mes normalmente en el que las precipitaciones suelen ser bastante bajas. En este caso, especialmente, afectó al caudal del Guadalquivir casi en un 60%, aportando a éste $78.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Otra fecha importante, es febrero y marzo de 2010. El río Guadalbullón creció tanto que el aforo fue imposible de medir dicho caudal. Tenemos los datos provenientes de la estación del Guadalquivir en Mengibar.

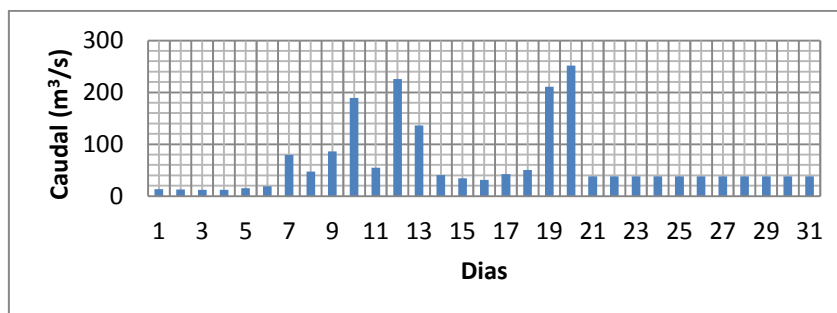


Gráfica 12. Caudal máximo diario Guadalquivir Febrero 2010

Se puede observar como aumentó de 100 a 1070, pero la estación del río Guadalbullón en Mengíbar no fue capaz de medirlo. Aumentó un 1000% en cuestión de horas causando grandes inundaciones a su paso por Las Infantas y por más pueblos y ciudades de Jaén, posiblemente una de las mayores inundaciones de este siglo. También, como se puede ver a continuación, en la gráfica de la estación de Puente Jontoya apreciando que la onda provenía del río Quiebrajano.



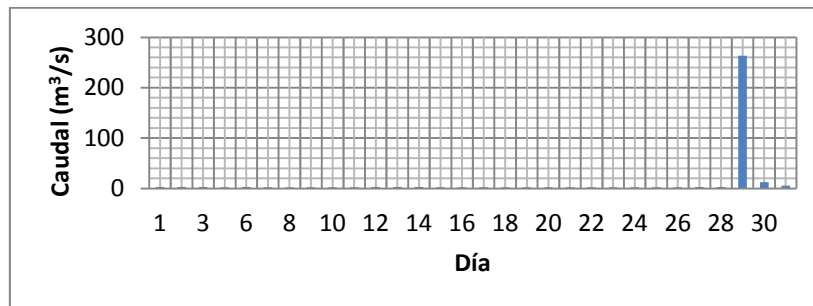
Gráfica 13. Caudal máximo diario Quiebrajano Febrero 2010



Gráfica 14. Caudal máximo diario Guadalbullón Marzo 2013

Se aprecia también como creció bastante el río durante Marzo de 2013, siendo de hasta 250 m³/s. También hay que tener especial atención, a finales de agosto de 2013. El pico del caudal fue de 264 m³/s. La onda se propaga aguas abajo hacia

Andújar, creciendo el nivel del río de manera repentina, aproximadamente, hasta 3 metros en un periodo de un día.



Gráfica 15. Caudal máximo diario Guadalbullón Agosto 2013

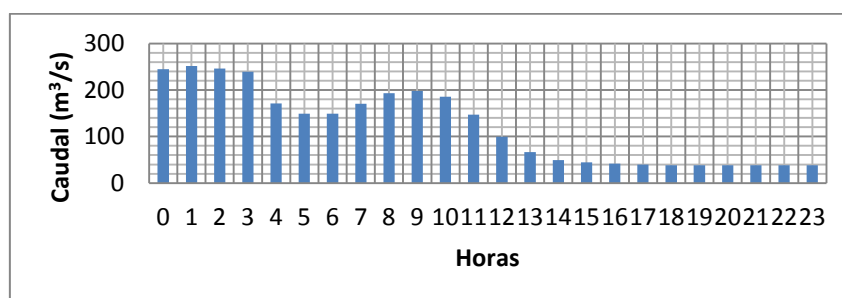
El día 29 de agosto de 2013 se produce el fenómeno de la gota fría. Pues aumenta el caudal de 2 m³/s a 264 m³/s.

3.3.4 Datos Horarios

Hay que hacer un inciso, ya que, algunos de los datos extraídos son datos máximo diarios. Para estos años, antes de 2008, no están disponibles los datos horarios en el SAIH. Por lo que no podemos saber si los picos horarios son mayores que los diarios. Seguramente los datos horarios, en una hora determinada, fueron superiores a los máximos diarios, ascendiendo quizá a 250 m³/s o quizá más aún. Por ejemplo no tenemos datos para estas horas, pero gracias a la simulación se podrá inferir en el caudal que circuló en antaño.

Para los últimos años, si tenemos datos horarios, como por ejemplo vamos a tratar el último año, 2013.

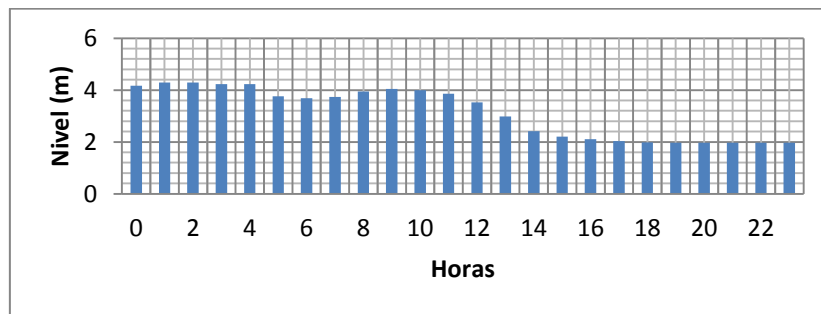
El día 20 de marzo, círculo un caudal bastante elevado por lo que se va a estudiar por separado. También se estudiará la gran crecida de agosto así como los datos del 2010.



Gráfica 16. Caudal máximo horario Guadalbullón 20 de Marzo 2013

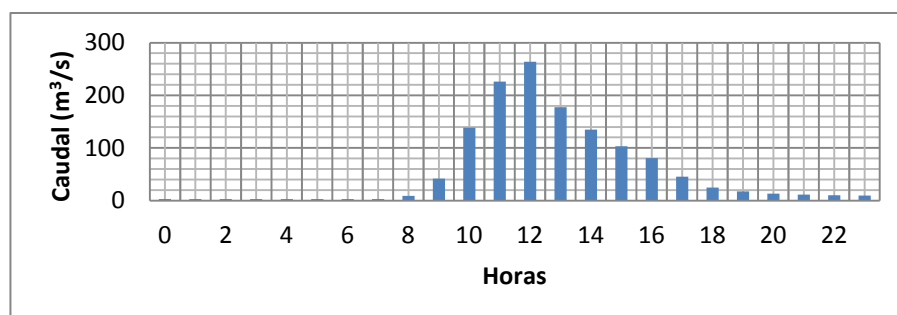
Se puede ver que el caudal que pasó durante el día 20 fue de $252 \text{ m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, los datos diarios que tenemos suelen ser menores que los datos horarios, pues se hacen una media. Lo mismo dicho anteriormente, por ejemplo, en el año 1962 hubo una gran crecida y por desgracia, al no tener los datos horarios no podemos saber cuál fue el valor del caudal máximo horario.

También podemos estudiar para este día, el nivel del río.

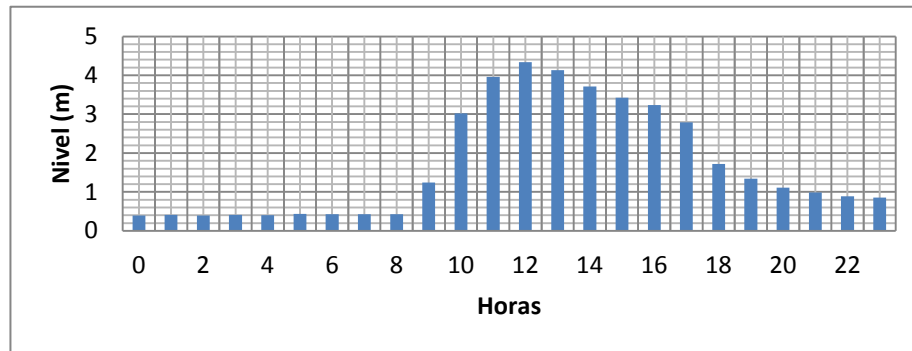


Gráfica 17. Calado máximo diario Guadalbullón 20 de Marzo 2013

Se puede observar como el nivel subió bastante, prácticamente el doble (gráfica 17). Este es el caudal del día 20 de agosto de 2013. Se puede observar como en cuestión de horas, cuatros horas exactamente, el caudal del rio aumentó de $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$ a $263.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Así mismo, el nivel, aumenta bastante en tan solo 4 horas. Pudiendo tener graves consecuencias pues en tan poco tiempo es difícil dar una respuesta o una solución a este tipo de eventos.



Gráfica 18. Caudal máximo horario Guadalbullón 20 de agosto 2013



Gráfica 19. Caudal máximo horario Guadalbullón 20 de agosto 2013

En cuanto a los años 2014 y 2015, hasta el momento no ha habido precipitaciones significativas.

3.4 Períodos de retorno

En la introducción de este capítulo, se explicó el concepto de período de retorno. La probabilidad de crecida se comentará a continuación.

Se puede ver en la siguiente gráfica, como las tormentas están asociadas a tiempos concretos. Es decir, por ejemplo, hay tres grandes bloques desde 1910. En los que hay crecidas significativas.

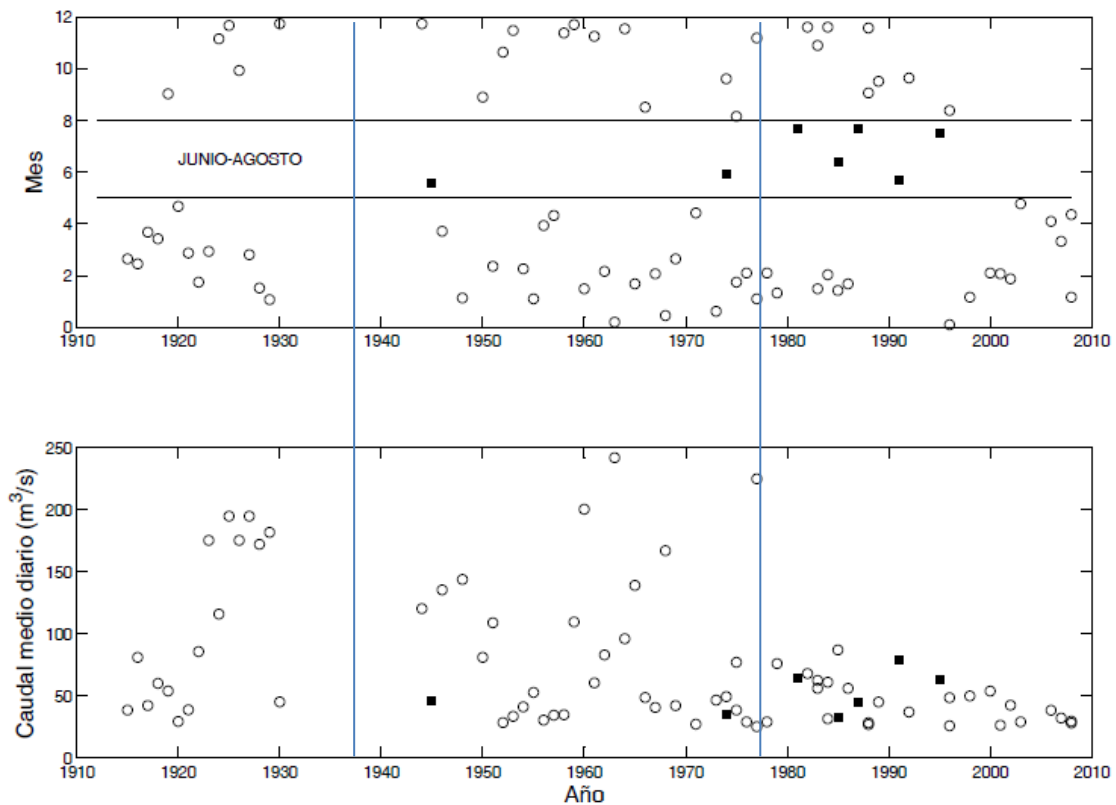
El primero período de tormentas a las cuales van asociadas unas crecidas significativas irían desde 1910 hasta 1940 aproximadamente. Luego desde 1940 hasta 1970 y el último desde 1970 hasta la actualidad.

En la gráfica inferior, se observa el gráfico que se explicó anteriormente, datos de caudal con respecto a año del río Guadalbullón. En la superior, las crecidas máximas de cada año por meses con respecto al año.

Se puede observar dos tipos de puntos representativos, los negros y los blancos. Los negros hacen referencia a meses normalmente secos pero en los cuales ha habido crecidas importantes. En cambio, los puntos blancos sólo hacen referencia a meses en los cuales es normal que se presenten crecidas en el caudal del río.

Se puede apreciar como por ejemplo, en el año 1962, la crecida más grande de ese año, fue en el mes de febrero.

Utilizando estos datos, se puede suponer que como cada x años se produce una crecida en el nivel del río, probablemente haya otra crecida próxima en el futuro, parecida a las de 1925 o 1962.



Gráfica 20. Estacionalidad del río Guadalbullón

3.5 Serie de ortofotos históricas

En este capítulo se procederá a analizar la serie disponible de ortofotografías aéreas que comprende desde el año 1956 hasta la actualidad. Para ello, se ha descargado los datos desde la página web de la Junta de Andalucía y a continuación, se ha empleado Google Earth, para analizar la evolución temporal de la vegetación, cauce y morfología de la zona de estudio. Estos parámetros son muy importantes porque condicionan la respuesta del río ante situaciones hidrológicas extremas y afectan a las áreas de riesgo potencial significativo de inundación.

Antes de realizar dicho análisis, se procederá a introducir algunos conceptos de interés que pueden ser de utilidad para el lector que no sea un especialista en la materia.

3.5.1 Conceptos importantes

Ortofotos

Las fotografías aéreas son una importante fuente de información en muchas actividades que centran su estudio en el territorio.

La principal limitación de las fotografías aéreas es su falta de referenciación espacial, es decir, la falta de referencia geométrica de los elementos representados. Es una representación cónica de la realidad y por consiguiente está afectada de las limitaciones debidas a la perspectiva, las deformaciones producidas por el relieve del terreno, la falta de verticalidad de la toma fotográfica y las distorsiones propias del objetivo de la cámara empleada.

La Ortofotografía Aérea es un producto cartográfico georreferenciado y corregido de éstas deformaciones que afectan a las fotografías, en la que se pasa de la representación en perspectiva cónica del territorio a una perspectiva ortogonal, corrigiendo las deformaciones por los aspectos mencionados. Este proceso se denomina ortoproyección que aplicado a fotografías o imágenes (digitales) aéreas, mediante las herramientas adecuadas permite la obtención de la Ortofotografía digital. El resultado mantiene toda la información de la fotografía aérea, permitiendo además medir a escala, tanto distancias como superficies, garantizando el ajuste con mapas existentes en la misma.

Vuelos fotogramétricos

La fotogrametría es la técnica de obtener mediciones reales de un objeto por medio de la fotografía, tanto aérea como terrestre. Las fotografías se realizan con una cámara métrica y mediante una operación denominada restitución se corrigen las distorsiones de estas. [\[18\]](#)

Para la toma de los datos cartográficos, se realiza un vuelo fotogramétrico único y un tratamiento riguroso de los datos cumpliendo con unas especificaciones técnicas consensuadas entre todas las Administraciones Públicas participantes.



Ilustración 20. Vuelo fotogramétrico

La realización de Vuelos Fotogramétricos viene abordándose históricamente desde la Consejería de Medio Ambiente como fuente importante de información territorial, reconociendo sus grandes ventajas respecto a otras fuentes. Si originalmente se han utilizado las imágenes fotogramétricas para interpretación fundamentalmente de la vegetación (en espacios naturales o forestales), el potencial que ofrece esta metodología de captura de información ha favorecido que la CMA apostara por la realización de vuelos para su explotación en otros ámbitos de interés ambiental, ya sea directamente sobre las imágenes fotogramétricas obtenidas o mediante el tratamiento de las mismas para obtener información base sobre la cual realizar los levantamientos de información, fundamentalmente en la generación de Ortofotos.

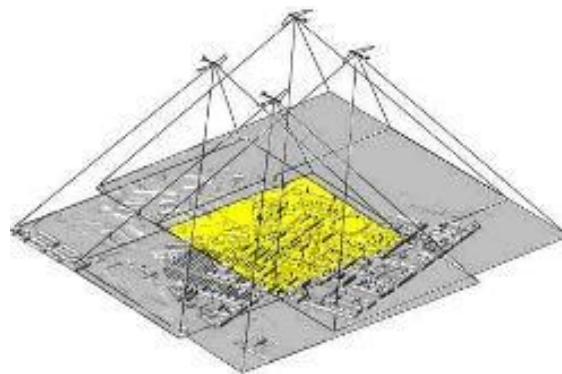


Ilustración 21. Vuelo fotogramétrico (2)

Hasta hace pocos años los vuelos fotogramétricos que se venían realizando utilizaban cámaras fotogramétricas analógicas que proporcionaban fotografías (principalmente verticales) en soporte analógico, que eran posteriormente digitalizadas mediante unos escáneres de alta resolución y exactitud geométrica (escáneres fotogramétricos) para disponer de las fotografías en formato digital. De

esta forma la gestión, el mantenimiento, la explotación directa y la generación de productos derivados revolucionaron la obtención de información a partir de los mismos. A partir de cada fotografía analógica se obtenía una imagen digital. Las películas fotográficas utilizadas podían ser pancromáticas, color, e infrarrojo color, obteniéndose imágenes digitales en escalas de grises, color natural o color infrarrojo respectivamente.

Actualmente todos los vuelos que se realizan, se hacen con cámaras fotogramétricas digitales de última generación y que pueden considerarse o denominarse sensores. Éstas pueden proporcionar varias imágenes ya que capturan información en diferentes zonas del espectro electromagnético.

Además de las cámaras fotogramétricas de última generación, las plataformas utilizadas para transportarlas (normalmente aviones), pueden transportar otro tipo de sensores, fundamentalmente el LIDAR, con el que se obtiene principalmente información altimétrica de muy alto detalle del territorio (pero también imágenes de intensidad). Actualmente es muy común que un avión (o helicóptero) transporte ambos tipos de sensores: cámara fotogramétrica digital y sensor LIDAR. La tecnología para la integración de los sensores en las plataformas aéreas (aviones, helicópteros,...) y la geometría en las que se basan las técnicas de cálculo y obtención de productos tienen su base en la Fotogrametría clásica, por ello al hablar de vuelos con cámaras digitales y LIDAR (sensores aerotransportados) suele hablarse de vuelos Fotogramétricos/LIDAR o vuelos combinados cuando se realiza la captura de información simultáneamente con ambos sensores.

En la década de los 40 y 50 del siglo XX se llevan a cabo los primeros vuelos completos con fotografía aérea orientada a la producción de cartografía topográfica en Andalucía. El de 1956 fue un trabajo de cooperación entre el Ejército del Aire de España y la Fuerza Aérea de EEUU.

En las imágenes que se obtuvieron con este vuelo, el paisaje de Andalucía y su medio ambiente aparecen en el estado que tenían con anterioridad a la vorágine de actuaciones territoriales que se desarrollaron a partir de la década de los años 60. El medio rural enmarca pueblos y ciudades cuyos cascos urbanos se mantienen en sus límites históricos, aunque no dejan de apreciarse las huellas del largo proceso histórico de explotación de los ecosistemas, legado de la agricultura tradicional y del aprovechamiento ancestral de las masas vegetales.

3.5.2 Servicios WMS

El servicio WMS (Web Map Service) proporciona una sencilla interfaz HTTP para solicitar mapas georreferenciados a través de internet, provenientes de uno o más servidores. Una petición WMS define la capa/s a obtener y el área geográfica de interés. La respuesta a esta petición, la podemos obtener en diversos formatos (JPEG, PNG...) y simplemente a través de un navegador web. Existen multitud de servidores y entidades cartográficas que proporcionan este tipo de servicio WMS.

3.5.2.1 Descarga de los archivos cartográficos empleados en este proyecto

Los datos cartográficos han sido obtenidos desde dos páginas web: la primera web es la del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) [1], la cual tiene como objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 ó 50 cm así como modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión de todo el territorio español, con un período de actualización de 2 ó 3 años, según las zonas; la segunda es la página de la PNOA la cual la utilizaremos para obtener los datos cartográficos LINEAv2 es una aplicación web para la consulta y descarga de la cartografía disponible por la Junta de Andalucía. [\[19\]](#)

El servicio de Descarga de Ortofotografías y datos del territorio permite la descarga de ficheros georreferenciados de diferentes series de productos cartográficos, como Ortofotos, Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) o Datos LiDAR, referidos al territorio de Andalucía.

Generalmente han sido generadas en el marco de Planes Nacionales (PNOA) o Programas Regionales de Producción de Ortofotografías y de otros productos cartográficos para cubrir el territorio nacional y/o regional.

La información disponible está organizada por años (fechas) del vuelo fotogramétrico, LiDAR o similar a partir del cual se ha generado el producto ofrecido: Ortofotografía, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), datos LiDAR,...

Hay disponibles para la descarga productos de las siguientes 2 categorías:

- Ortofotografías regionales y locales
- Modelos digitales de elevaciones (MDE) tanto regionales como locales.

Debido a la complejidad y características de estos proyectos la cobertura regional puede ser completa (en fechas específicas) o mediante unión de cuadrantes (años diferentes) que conforman ciclos en estos planes o programas. La distribución geográfica de los cuadrantes establecidos al efecto en Andalucía para abordar estos proyectos se muestra a continuación, siendo nuestro cuadrante de interés el NE-239:

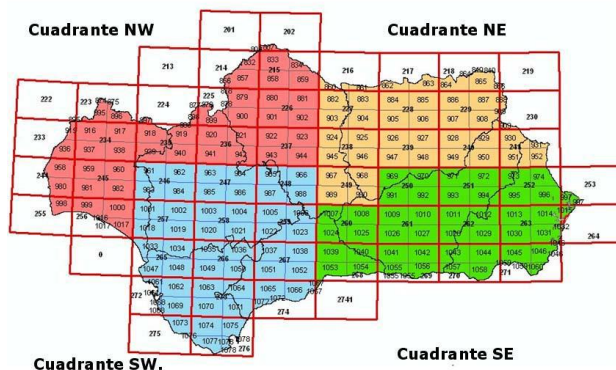


Ilustración 22. Distribución geográfica en cuadrantes

El acceso a estos productos de cobertura regional se lleva a cabo mediante localización de ficheros denominados y coherentes con las hojas 1:10.000 del Mapa Topográfico de Andalucía según una malla de cobertura regional correspondiente a esta cartografía.

Cada una de las fotografías lleva asociado un servicio OGC Web Map Service (WMS) que permite su visualización tanto en el Visor Descargador como en cualquier otra compatible con este tipo de servicios.

Ortofotografías Regionales y servicios OGC (WMS) asociados	Ámbito	Organismo
1956 -57 en Blanco y Negro de 1 m http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Ortofoto_Andalucia_1956?	Andalucía	CMA – CECAF
1977-78 (IRYDA) en Blanco y Negro de 0.5 m. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Ortofoto_BN_1977_83?	Andalucía	CMA – CNIG.
1984-85 (Nacional) en Blanco y Negro de 1 m. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Ortofoto_PAN_Andalucia_84_85?	Andalucía	CMA – CNIG.

1998-99 en Color de 1 m. http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto1998?	Andalucía	CVOT (ICA) - CAP-CMA
2001-02 en Blanco y Negro de 0.5 m http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2001?	Andalucía	CVOT (ICA) - CAP-CMA
2004 en Color de 1 m http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2004?	Andalucía	CVOT (ICA)
2005 Cuadrante NE Infrarr. Color de 0.5 m http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Ortofoto_CIR_Andalucia_NE_2005?	NE	CVOT (ICA)- CAP – CMA- IGN (*)
2007 Cuadrante NE Color de 0.5 m (PNOA) http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Ortofoto_RGB_Andalucia_NE_2007?	NE	CVOT (ICA)- CAP – CMA- IGN (*)
2009 Cuadrante NE Color e Infr. de 0.5 m (PNOA) http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2009_norte?	NE	CVOT (ICA)- CAP – CMA- IGN (*)
2011 Cuadrante NE Color de 0.5 m (PNOA) http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2010?	NE	CEICE(IECA) – IGN (*)

3.5.2.2 Google Earth

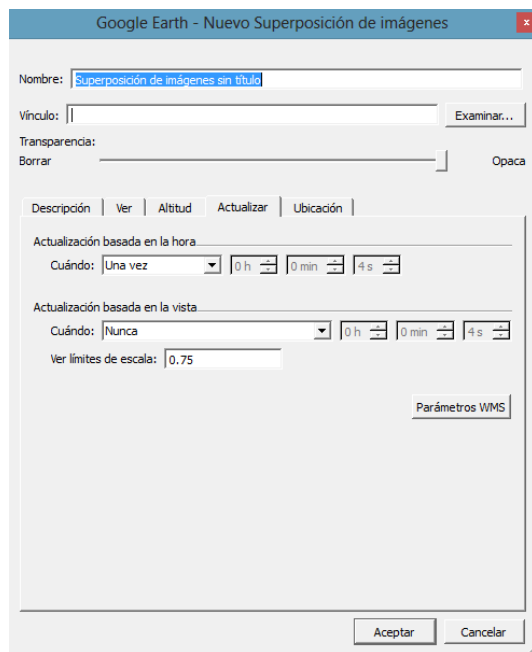
En este proyecto se usará el programa Google Earth, es un sistema de información geográfica (SIG). Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por imagen satelital, fotografía aérea, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos creados por ordenador.

Google Earth también puede acceder fácilmente a fuentes de datos WMS, incluyendo acceso directo a los datos de elevación e imágenes coloridas de todo el mundo, además de visualizar datos de elevación en 3D a partir de la degradación del raster por modelos de elevación. Es capaz de leer muchos tipos de archivos, pero se usarán solo los archivos con extensión .gmp, jp2 o jpj.

3.5.2.2.1 Cargar un servicio WMS en Google Earth

Se expone a continuación el procedimiento para visualizar mapas WMS (Web Map Service) en Google Earth mediante carga de la URL correspondiente al servicio en el apartado “Añadir superposición de imágenes”.

Una vez abierto Google Earth, para visualizar un WMS hay que pulsar en el icono "Añadir superposición de imágenes" o ir al menú “Añadir > Superposición de imágenes”.



En el cuadro de diálogo que se abre, ir a la pestaña "Actualizar" y allí pulsar el botón "Parámetros WMS".

En el nuevo cuadro que se abre, llamado “Parámetros de servicio de mapas web”, se pulsa en "Añadir" para introducir la URL del servicio. Se accede entonces a la lista de capas que componen el mapa, con distinción de las que son opacas y transparentes.

Ilustración 23. Superposición de imágenes Google Earth

De este listado se han de ir pasando capas a la ventana “capas seleccionadas”, donde también se pueden ordenar (las capas opacas deben quedar siempre debajo de las transparentes).

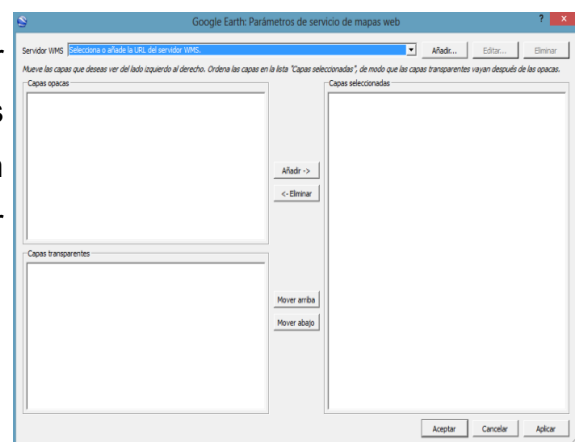


Ilustración 24. Parámetros de servicio Google Earth

Pulsando en Aceptar se conecta con el servicio WMS y se muestra el mapa superpuesto sobre la imagen de satélite de Google Earth.

Hay que tener en cuenta que para cargar correctamente los mapas, en muchas ocasiones, es necesario aumentar la escala de visualización. Una vez activo el WMS pueden realizarse efectos de transparencia combinando las imágenes superpuestas mediante la barra de transparencias, y acceder mediante botón derecho a las propiedades del WMS para modificar elementos de la vista.

3.5.3 Análisis de ortofotos

Las primeras ortofotos que se pueden encontrar en la PNOA son las referentes a los años 1956-1957. Se va a realizar un estudio exhaustivo de las diferentes imágenes además, de una comparación entre dichas.

A medida que se describa la morfología del río y sus variaciones durante los años de los que disponemos de ortofotos, se presentarán conceptos básicos para comprender la morfología fluvial del río Guadalbullón. Esto incluye su clasificación, características físicas, formación de meandros, etc. Para explicar estos conceptos, se usará como bibliografía el libro Ingeniería de ríos de Juan P. Martín Vide [5]

Como es sabido, los ríos tienen un régimen hidrológico determinado por las características de la cuenca y de las precipitaciones. Primeramente se expondrán las ortofotos y se podrá visualizar la variación que hay entre unos años y otros sin prestar atención a las características hidrológicas de la cuenca que están fuera del alcance de este trabajo fin de grado.



Ortofoto 1956-1957



Ortofoto 1977-1978



Ortofoto 1984-1985



Ortofoto 1998



Ortofoto 2001

Ilustración 25. Ortofotos 1956 a 2001



Ortofoto 2004



Ortofoto 2006-2007



Ortofoto 2008-2009



Ortofoto 2011



Ortofoto 2015

Ilustración 26. Ortofotos 2004 a 2014

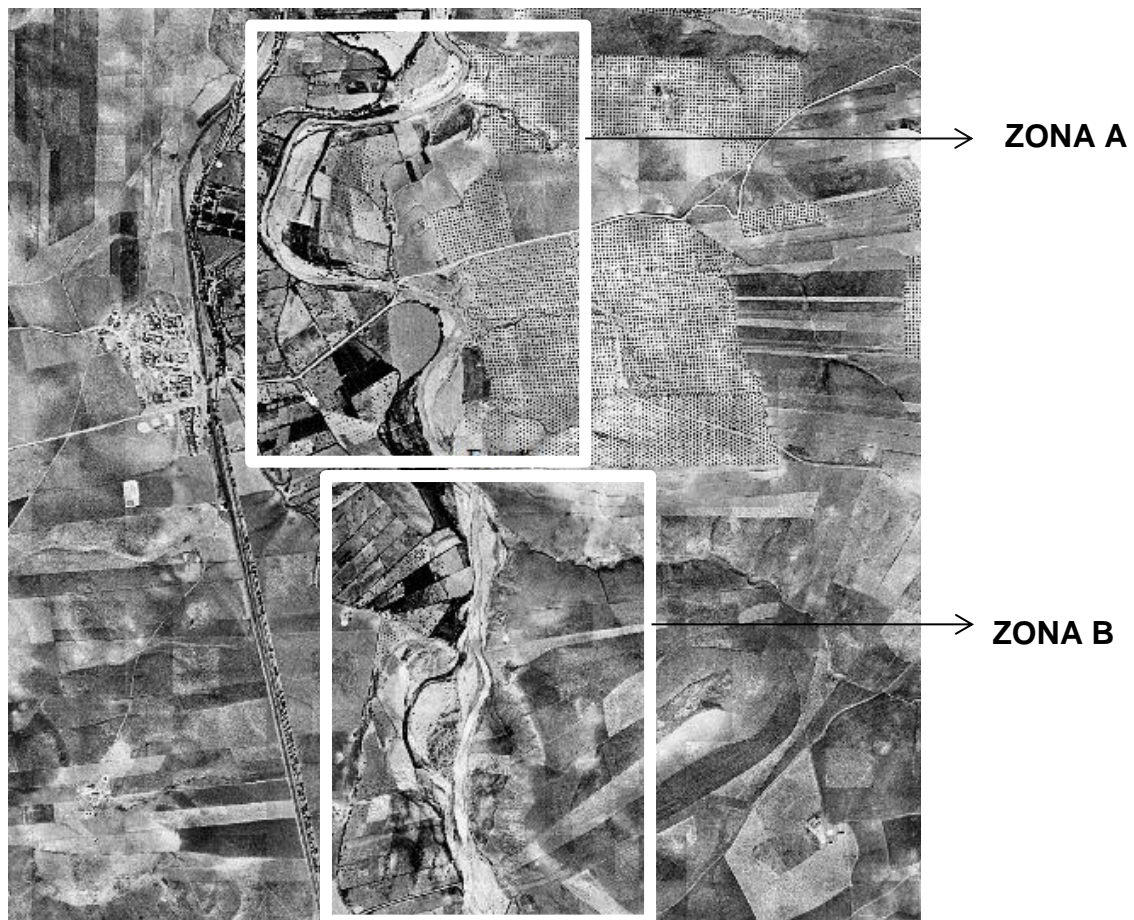
Ortofoto 1956-1957

Ilustración 27. Ortofoto 1956-1957

Es esta primera ortofoto y aunque, infortunadamente, carece de mucha calidad, se van a diferenciar dos zonas, la zona A, cerca de la localidad de Las Infantas y la zona B, la cual es la zona que más se estudiará.

El río Guadalbullón es un río aluvial por el que discurren materiales sedimentarios modernos, generalmente aportados por la propia cuenca. Es muy común que los materiales aluviales ocupen mucha más extensión horizontal que la del cauce actual, formando en nuestro caso, unas llanuras ocasionalmente inundables, llamadas llanuras de inundación.

En la naturaleza es muy difícil encontrar cauces rectos y regulares. En este caso, como se podrá apreciar más adelante en las demás ortofotos, en las primeras imágenes se trata de un cauce trenzado o cauce anastomosado, es un cauce ancho, compuesto por una multiplicidad de cauces menores entrelazados, que dejan islas entre sí al unirse y separarse. Suelen ser cauces inestables.

Ortofoto 1977-1978



Ilustración 28. Ortofoto 1977-1978

En esta ortofoto, tiene más resolución que la anterior.

La zona A como se puede observar permanece relativamente invariante. Suele ser lineal, excepto por los meandros, se observa un poco más de vegetación en el cauce del río. En cambio en la ortofoto de 1956 no se apreciaba dicha vegetación (debido a la tala de árboles que se produjo a mitad del siglo XX, posiblemente). Pero hay una zona que comparada con la ortofoto anterior varía:

Primeramente, la zona de la esquina superior del primer meandro, se observa que el río ha cambiado de forma durante este periodo de 20 años.

La zona de la esquina inferior del primer meandro está más pronunciada en 1977. Esto probablemente se debe a la crecida que hubo en el año 1962. El cauce varió de posición inicial unos 80 metros.

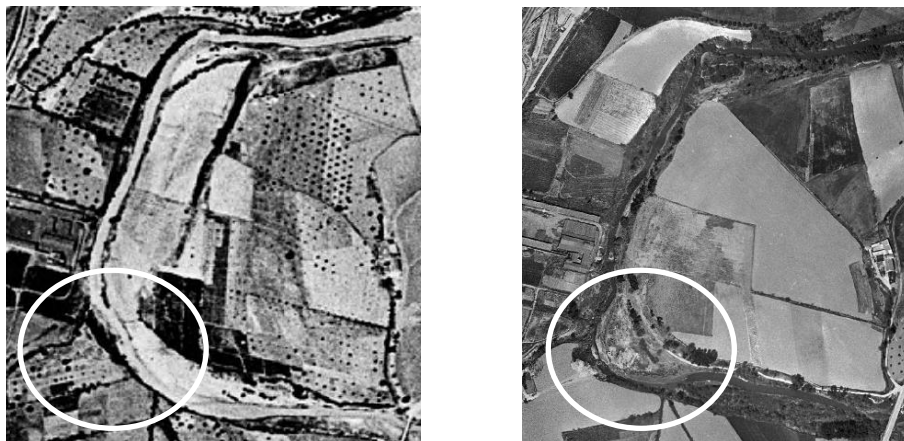


Ilustración 29. Ortofoto meandro zona A 1977-1978

Otra zona que varía muchísimo es la que se encuentra en el área A y B. El cauce ha variado muchísimo tal y como se observa en dichas ortofotos. Por ejemplo, entre ambos años, la vegetación ha crecido sustancialmente. Además el cauce ha cambiado de ser un meandro a prácticamente un río rectilíneo.

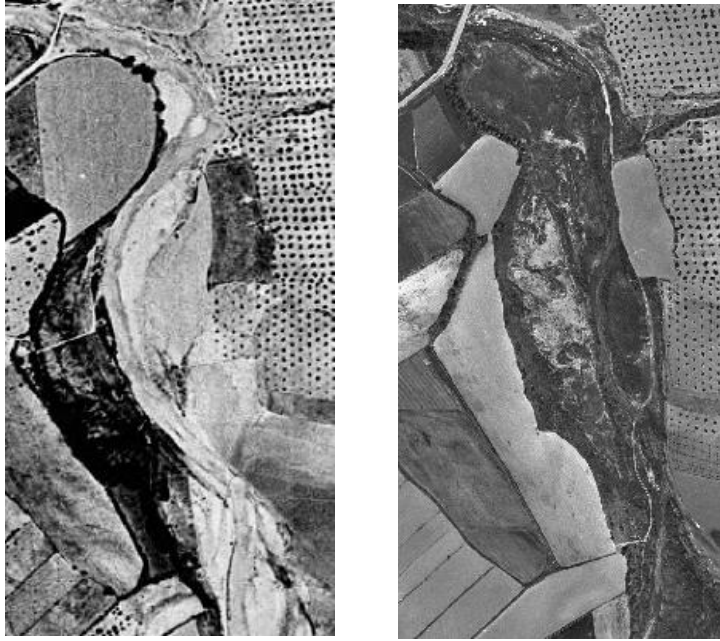


Ilustración 30. Ortofoto meandro zona B 1977-1978

En el meandro de la zona B se aprecia realmente como es un río trenzado. Se pueden observar las islas. El cauce por aquel entonces no estaba bien definido, se aprecia en la zona principal del río que hay varios meandros que aparecen en el transcurso del mismo, produciendo islas. Esto posiblemente es debido a la gran crecida del año 1962, que se estudió en la sección anterior.



Ilustración 31. Ortofoto meandro zona B 1977-1978 (2)

Ortofoto 1984-1985



Ilustración 324. Ortofoto 1984-1985

En la ortofoto del año 1984-1985, se observa que los cambios en la zona A son menores y difíciles de apreciar. En cambio, aunque no ha variado apenas tampoco, sufre un pequeño cambio y se divide el río en dos afluentes, que vuelven a juntarse unos metros más abajo.

De una ortofotografía a otra aumenta la calidad pero no se ven cambios significativos en el cauce del río de la zona B. Se podría decir que en esos 10 años, una época que como se observó en la sección anterior no presenta grandes crecidas. Si no que fue un periodo hidrológico normal.

Ortofoto 1998



Ilustración 33. Ortofoto 1998

Gracias a las ortofotos a color se pueden distinguir más capas. Así como vegetación, cauce mejor definido, etc. La forma no varía mucho, es prácticamente igual que diez años antes en la zona A, excepto por que tiene más calidad y es posible apreciar mejor el cauce del río. En la zona B si se aprecia una gran variación

Hasta aquí, podría parecer que las formas y dimensiones de los cauces son exclusivamente el resultado de la interacción del agua con los materiales sólidos del cauce. Pero también se ha reconocido la importancia de un tercer factor, la vegetación.

El papel morfológico de la vegetación se explica por su acción directa sobre el suelo. Las raíces de las plantas fijan el material suelto, por ejemplo, las arenas sueltas. Esta acción de fijación ocurre en lugares como las orillas del cauce principal o las llanuras de inundación. Las secciones fluviales resultan de la interacción del

agua, los sólidos y la resistencia ofrecida por la vegetación, tanto en el sentido de resistencia del flujo (rugosidad) como en el de resistencia frente al arrastre del material aluvial. Obviamente es más importante en los ríos pequeños que en los grandes.

La vegetación se desarrolla en función de factores físicos, climáticos e hídricos. De estos últimos, tres son destacables: la humedad en la zona de las raíces determinada por los niveles ordinarios del río, la acción mecánica de las aguas altas y avenidas, y la cantidad del agua.

En la zona B, varía la forma del río, se forma solamente un cauce, en el cual había dos anteriormente, como se puede observar en las fotos. Y aparecen dos grandes meandros.

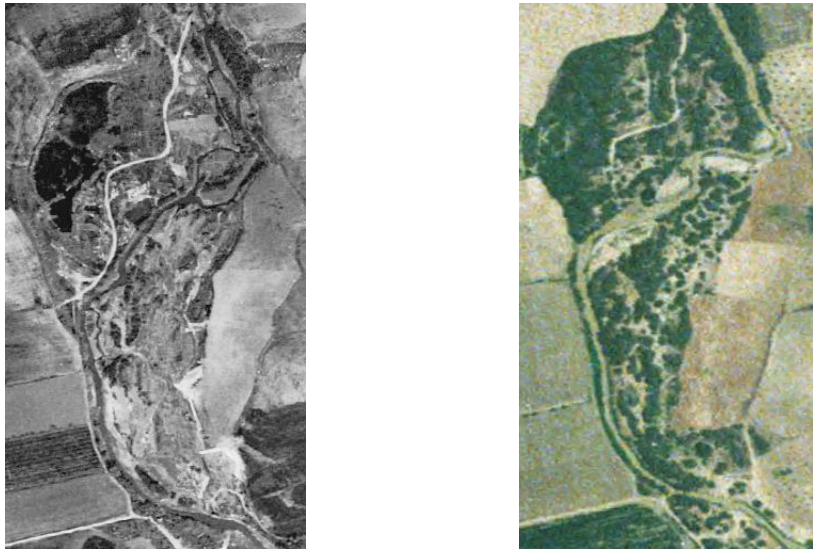


Ilustración 34. Ortofoto meandro zona B 1998

Ortofoto 2001



Ilustración 35. Ortofoto 2001

La ortofoto de 2001 es en blanco y negro como se puede apreciar. En la zona A, se ve como el río vuelve a su cauce normal, la zona tan pronunciada que apareció en 1976, ha disminuido y se ha posicionado otra vez en el mismo lugar. Es decir, la curvatura acentuada del cauce ha vuelto a su forma ovalada.



Ilustración 36. Ortofoto meandro zona A 2001



Ilustración 37. Ortofoto meandro zona B
2001

Aquí se puede observar como los meandros que aparecieron en 1998 están desapareciendo. Se observa como han vuelto a ser lineal el cauce del río. No ha experimentado otra variación significativa.

Ortofoto 2004-2005



En la ortofoto de 2004 se aprecia un cauce más rectilíneo, presentando vegetación ambos taludes de su cauce, a diferencia de lo que ocurría en los años anteriores. El río se encuentra totalmente rodeado de vegetación.

En los tramos medios o bajos de los ríos, el efecto de las crecidas no es siempre tan drástico y regular y, sobre todo, la velocidad del agua es menor: los árboles pueden llegar hasta las orillas y los arbustos se ven limitados a zonas donde el bosque está degradado o, localmente, poco desarrollado.

Ilustración 38. Ortofoto 2004-2005

En la zona de estudio, nuestro cauce al principio ha aumentado y se eliminaron completamente los meandros que se observaban al principio, como se puede observar en la siguiente fotografía.

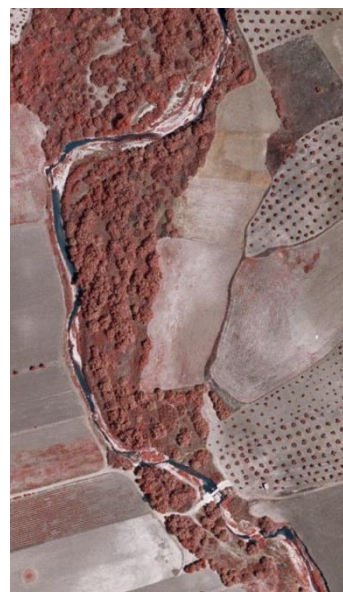


Ilustración 39. Ortofoto meandro zona B 2004-2005

Ortofotos 2006-2007 a 2008-2009

**Ilustración 40. Ortofoto
2006-2007**



**Ilustración 41. Ortofoto
2008-2009**

Durante estos años, empezaron a emplearse medios con más resolución. Gracias a ello es posible observar ortofotos con bastante calidad.

Aunque el problema es que hay demasiada vegetación y a veces es casi imposible distinguir el cauce del río. El cauce como se observa, no varía absolutamente de un año a otro, también es sabido que sólo ha transcurrido poco tiempo. Y como se vio en la sección anterior, no hubo crecidas importantes durante estas fechas.

Ortofoto 2011



Ilustración 42. Ortofoto 2011

Como se estudió en la anterior sección, en el año 2010 hubo una gran crecida en el mes de febrero. Sus consecuencias son observables en esta ortofotografía. Cauces más pronunciados, aumento del número de meandros. Y falta de vegetación en algunas zonas.

La vegetación desapareció debido a que el aumento del nivel del río y la velocidad favorecieron la erosión de la flora del lugar. Se puede observar en muchos sitios como el cauce se desvía completamente de la zona por la que circulaba años anteriores.

Se van a estudiar las zonas por separado. La zona A pierde mucha vegetación. Y en la esquina inferior izquierda, se observa como desaparecen además zonas de cultivo, apareciendo nuevos meandros e inundando zonas de cultivo.



Ilustración 43. Comparación ortofotos zona A 2008-2009 y 2011

En la zona que hay entre medias de las zonas A y B. Se puede observar la formación de numerosos meandros. Que no estaban anteriormente, dando lugar a la formación de mega dunas y barras laterales.



Ilustración 44. Comparación ortofotos zona B 2008-2009 y 2011

Y la zona que más llama la atención es nuestra zona B.



Ilustración 45. Comparación ortofotos zona B 2008-2009 y 2011

Se puede observar como la zona lineal de esta parte del río, se ha vuelto ovalada, inundando una gran porción de zona de cultivos. Se pueden ver las zonas de sedimentación en la parte cóncava del río en todos los meandros. El curso del río se desplaza transversalmente unos 90 metros de la posición inicial.

Factor humano

Como se ha visto hasta ahora, existen múltiples factores por los cuales el cauce del río ha variado. Estos han sido tales como las crecidas debidas a lluvias intensas y la vegetación cercana al cauce del río. Pero también hay que tener cuenta una de las mayores fuerzas de modificación de terrenos, la actuación humana. Éste es el

caso de la presa de la localidad de Mengíbar. Dicha presa no sólo ha transformado el cauce del río Guadalquivir, sino también la del río Guadalbullón.

Como se puede observar en la siguiente ortofoto, podemos observar donde se encuentra la presa de Mengíbar.



Ilustración 46. Presa de Mengíbar 1956

Dicha ortofoto pertenece al año 1956, (en 1916 finalizó la construcción de la presa). Se puede observar como es la forma del cauce variando ésta en el año para el 2007.



Ilustración 47. Presa de Mengíbar 2007

Además de la variación del río Guadalquivir, se puede observar que varía el río Guadalbullón aguas abajo, formando varios meandros en su cercanía con el río Guadalquivir.

Para una mejor visualización, se procede a superponer la superficie mojada del río en 2007 sobre la ortofoto de 1956, obteniendo la siguiente. Se aprecia

claramente la evolución morfológica que sufre el cauce aguas arriba de la presa de Mengibar, mientras que aguas abajo, el río Guadalquivir mantiene su forma y dimensiones.



Ilustración 48. Ortofoto 2007 sobre ortofoto 1956

3.6 Modelos Digitales de Elevaciones

3.6.1 Introducción a los modelos digitales

Los avances en las técnicas de recogida de información, conjugados con los nuevos formatos de almacenamiento de dicha información y la creciente potencia informática disponible para su manejo, se han erigido en los últimos años como los verdaderos impulsores de las técnicas y planteamientos existentes en las disciplinas fundamentadas de análisis del territorio y el medio físico, entre ellas la hidrología [\[20\]](#).

De entre las formas cartográficas analizadas es preponderante, tanto por su importancia general como por el mayor empleo del que será objeto posteriormente en las formulaciones hidrológicas, el Modelo Digital del Terreno (MDT), equivalente directo en formato digital de la cartografía de elevaciones habitual mediante curvas de nivel.

La definición del MDT que se menciona en los trabajos del pionero Miller y Laflamme (1958) dice así “un modelo digital del terreno es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de

puntos selectos con coordenadas (x,y,z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario”.

3.6.2 Definición y estructura del modelo digital de elevaciones (MDE)

Un modelo digital de elevaciones se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un MDE puede definirse matemáticamente como:

$$z = f(x, y)$$

donde z es la altitud, del punto situado en las coordenadas x e y, y f es la función que relaciona la variable con su localización geográfica.

Esta superficie está formada por un número infinito de puntos siendo imposible su modelización sin cierta pérdida de información, proceso equivalente al de generalización cartográfica en los mapas convencionales. [1]

3.6.2.1 Estructuras de datos en el MDE

De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, z, al que acompañan los valores correspondientes de x e y, expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial. Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

Mientras que los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (las curvas de nivel) para la representación de la superficie del terreno, los MDE disponen de alternativas más variadas. Históricamente, las estructuras de datos en los sistemas de información geográfica y, por extensión, en los modelos digitales del terreno, se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster:

- I) El modelo de datos vectorial está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.
- II) El modelo de datos raster está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

En el modelo vectorial, los atributos del terreno se representan por puntos, líneas o polígonos.

Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas con un atributo de altitud, las líneas mediante un vector de puntos y los polígonos mediante la agrupación de líneas.

En el modelo raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan el terreno con una distribución regular, sin solapamiento o con recubrimiento total del área representada. Las unidades se llaman celdas o teselas y, si se admite la analogía con los términos usados en el proceso de imágenes, píxeles.

Cada modelo de datos se puede expresar mediante diferentes estructuras de datos, las más representativas son dos estructuras vectoriales: la basada en isohipsas o contornos y la red irregular de triángulos, TIN (triangulated irregular network) y dos estructuras raster: las matrices regulares, URG (uniform regular grids) y las matrices jerárquicas (quadrees) [21].

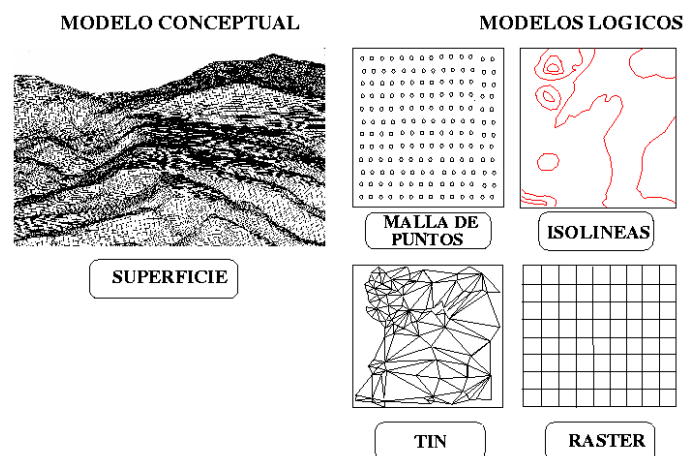


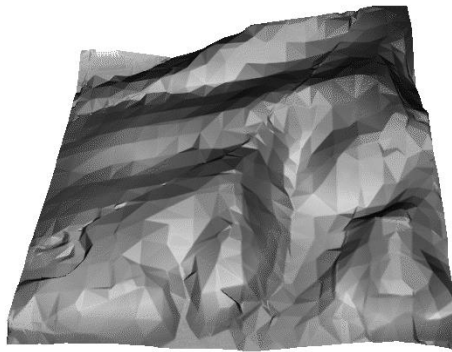
Ilustración 49. Modelos lógicos para representar superficies

Modelo vectorial: contornos

La estructura básica es el vector, compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (x,y) que describe la trayectoria de líneas isométricas. El número de elementos de cada vector es variable y la reducción de éste es n único elemento que permite incorporar cotas puntuales sin introducir incoherencias estructurales. Una curva de nivel queda definida mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados para garantizar la exactitud necesaria del modelo.

Modelo vectorial: redes de triángulos irregulares (TIN)

Una estructura de datos cada vez más utilizada es la que se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que pueda adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del terreno. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos.



**Ilustración 50. Representación del relieve mediante redes de triángulos irregulares (TIN)
(Adaptado de Mitasova)**

Modelo raster: matrices regulares

Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas.

Modelo raster: matrices de resolución variable

El interés de las matrices reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices regulares (su resolución espacial prefijada), manteniendo, en principio, sus principales ventajas: la sencillez conceptual y operacional. La estructura final es un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con una

profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel.

3.6.3 Construcción del MDE

Los métodos para la generación de los MDE se dividen en dos grupos:

Métodos directos. Estos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, en los que podemos citar:

Una toma directa de datos por medio de levantamientos topográficos con estación total o con GPS. Uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o el láser.

Métodos indirectos. Cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un modelo digital de elevación, en los cuales podemos citar:

La digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos de conversión automática (vectorización) o manual (uso de tableta digitalizadora).

Restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

3.6.3.1 Métodos directos: altímetros, GPS y estaciones topográficas

Algunos satélites han incorporado altímetros entre sus instrumentos, con lo que se hace posible, al menos, el registro directo de los datos de altitud en formato digital. Suelen ser extremadamente precisos, un ejemplo de ellos es el ERS-1, European Remote-Sensing Satellite, es un radar de 13.8 GHz con un error nominal de apenas unos centímetros.

En los últimos años se han desarrollado sistemas de localización geográfica conocidos como GPS (siglas de su denominación en inglés: global positioning system). Estos métodos utilizan un conjunto de satélites de referencia y, mediante métodos de triangulación, permiten obtener valores de las tres coordenadas espaciales para un lugar localizado sobre la superficie terrestre. Pero presenta de algunas limitaciones que reducen su utilidad. Entre ellas, las dos principales son la necesidad de acceder físicamente al lugar de medida y el tiempo relativamente elevado que se precisa para realizar una toma de datos fiable. A estas limitaciones

convierten al método GPS más en un recurso de apoyo que en el sistema básico de captación de datos.

Finalmente, las estaciones topográficas más avanzadas pueden generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital. A pesar de su utilidad, el método tiene problemas similares al anterior ya que la recogida de información exige la presencia física sobre el terreno. Asimismo, el tiempo necesario para realizar una toma de datos fiable y completa invalida el método como única vía de incorporación de datos en la construcción del MDE.

3.6.3.2 Métodos indirectos: restitución fotogramétrica

Es más frecuente utilizar métodos indirectos para la generación de los MDE. Las causas son principalmente que estos métodos no necesitan acceder físicamente a la totalidad de la zona de estudio, pues utilizan documentos preexistentes, y que la generación de datos se hace de forma relativamente rápida, cuestión básica cuando el volumen de información es muy elevado.

En las operaciones de restitución se utiliza como documento básico un conjunto de pares estereoscópicos de imágenes de la zona a estudiar. El trabajo se basa en métodos fotogramétricos que, examinando puntos homólogos en los pares estereoscópicos, deducen de su paralaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía. Actualmente existen sistemas (restituidores fotogramétricos) completamente automatizados que realizan esta labor grabando directamente los resultados en un formato digital compatible con sistemas de información geográfica.

El método se utiliza también en la elaboración de cartografía analógica y sólo se diferencia en el formato de la salida de los datos. En la cartografía convencional, la salida se realiza sobre un soporte físico estable (minuta), mientras que en el otro caso se graba directamente en un soporte informático. Ambos tipos de productos, sin embargo, no son incompatibles y pueden ser generados paralelamente.

3.6.3.3 Métodos indirectos: digitalización de mapas topográficos

Los métodos fotogramétricos son utilizados generalmente por organismos estatales o por empresas especializadas. El elevado coste de los aparatos necesarios para la restitución hace difícil que pequeños equipos puedan abordar la

construcción de los MDE por esta vía. La opción alternativa es la digitalización de los mapas topográficos preexistentes, lo cual puede realizarse bien de forma manual (mediante un tablero digitalizador), bien automáticamente (mediante sensores ópticos de exploración).

La digitalización automática ha sido una línea de investigación en constante desarrollo en los últimos años debido a que los métodos de digitalización manual son lentos y proporcionalmente muy costosos dentro del total de procesos. El método usado mayoritariamente en la actualidad se basa en el uso de microdensitómetros de exploración (scanners) que detectan un cierto número de niveles de gris en un mapa original mediante sensores ópticos. Existen dos variantes básicas en función del formato del resultado, vectorial o raster.

En la primera, el cabezal se sitúa al inicio de una línea y realiza el seguimiento de la misma de forma automática, generando directamente una salida vectorial. Este proceso presenta problemas en los casos en que las líneas se interrumpen o se cruzan: cotas en medio de las curvas de nivel, caminos o carreteras que las cortan, etc., por lo que precisa de un operador que intervenga para solucionar todas las situaciones conflictivas. En el caso de mapas sencillos y limpios de información imprecisa, el método supera en eficacia a la digitalización manual, pero si la información es compleja puede ser considerablemente más lento.

La digitalización mediante scanners puede generar también salidas en formato raster cuando el barrido se hace de acuerdo con un esquema matricial. La salida digital es una matriz de valores de gris, de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) en los dispositivos sensibles al color o, simplemente, de blanco y negro. La generación de esta matriz es un proceso simple pero constituye una información que no es aprovechable directamente para la construcción del modelo digital.

3.6.4 Reflexión sobre el estado de los MDE en España

El Programa Nacional de Cartografía desarrollado en los EE.UU. menciona tres principios básicos que guían la estrategia cartográfica federal:

- La ejecución de la cartografía de una nación es crucial para su desarrollo económico y protección ambiental.
- Los mapas deben contener información construida con criterios científicos y precisión técnica.

- Los mapas deben poder transmitir información a un amplio espectro de clientes para usos diversos.

La cita tiene interés ya que estos tres puntos, cuya enumeración data ya de hace 15 años, son aplicables tanto a la cartografía analógica como a la digital, y probablemente son asumidos mayoritariamente por los profesionales dedicados a las ciencias ambientales, que encuentran en la cartografía el soporte básico de su trabajo.

La realidad en nuestro entorno está, en este sentido, en una fase primaria de desarrollo. Por ejemplo, en 1993, Asturias sólo posee una cobertura completa de mapas topográficos a escala 1:50.000 mientras que la cartografía a escalas más detalladas es sólo fragmentaria y muy heterogénea.

La evolución de los últimos años sugiere que estas escalas no estarán disponibles hasta que haya transcurrido un periodo relativamente importante. La disponibilidad de modelos digitales es, como resulta previsible, algo más pobre. En España, los MDE de más amplia cobertura están comercializados actualmente por el Centro Nacional de Información Geográfica, organismo dependiente del Instituto Geográfico Nacional.

Se trata de modelos construidos a partir de mapas originales a escala 1:200.000 y que se presentan en formato matricial, con intervalos entre datos de 200 m (serie MDT200). Este modelo está disponible ya para la totalidad de España aunque su nivel de resolución es limitante para muchas aplicaciones.

El mismo organismo ha comenzado a ofrecer una serie similar (MDT25) que, por su mucho mayor grado de detalle, cubrirá previsiblemente una buena parte de las necesidades de la investigación en las ciencias ambientales. Este serie, construida a partir de los mapas topográficos a escala 1:25.000, se presenta con intervalos entre datos de 25 m. En la actualidad, sin embargo, la superficie cubierta es aún reducida y, en el caso particular de Asturias, no existe todavía ningún modelo disponible.

En este contexto, los equipos de investigación suelen optar por la elaboración de modelos propios para realizar su trabajo. Esto requiere habitualmente un esfuerzo importante dentro del conjunto general de los proyectos pero probablemente es una inversión inevitable. El motivo reside en la previsible necesidad de modelos de muy diferente grado de detalle, aplicados a los proyectos concretos, cuya producción sólo pueden abordar los propios equipos de trabajo.

Sin embargo, los tres puntos básicos mencionados en los párrafos iniciales contienen implicaciones que obligan a una cierta agilidad institucional, así como a una visión que tenga en cuenta los beneficios generados por un uso extensivo de los datos digitales. Ante esta situación, es procedente incitar a los organismos públicos responsables de la cartografía digital en España a que asuman los tres puntos mencionados al principio del presente apartado, concediendo la prioridad necesaria a la construcción de una cobertura digital del territorio estandarizada, correcta, detallada, completa y económicamente asequible.

3.6.5 Descarga de MDE y ortofotografías para Andalucía

Se va a proceder a explicar cómo se pueden descargar los modelos digitales de elevaciones de la provincia de Andalucía.

La aplicación, mediante un interfaz web cómoda e intuitiva, permite la consulta y descarga de las diferentes ficheros individuales o series completas de datos disponibles a nivel regional o de ámbitos específicos en los que se ha obtenido productos (normalmente de mayor detalle): Ortofotografías, Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), Datos LiDAR,... y otros posibles productos cartográficos (ya sean cartografía básica, derivada, temática,...).

Para ello es necesario acceder a la página de la Junta de Andalucía aquí indicada: <http://ws041.juntadeandalucia.es/medioambiente/dlidar/index.action>

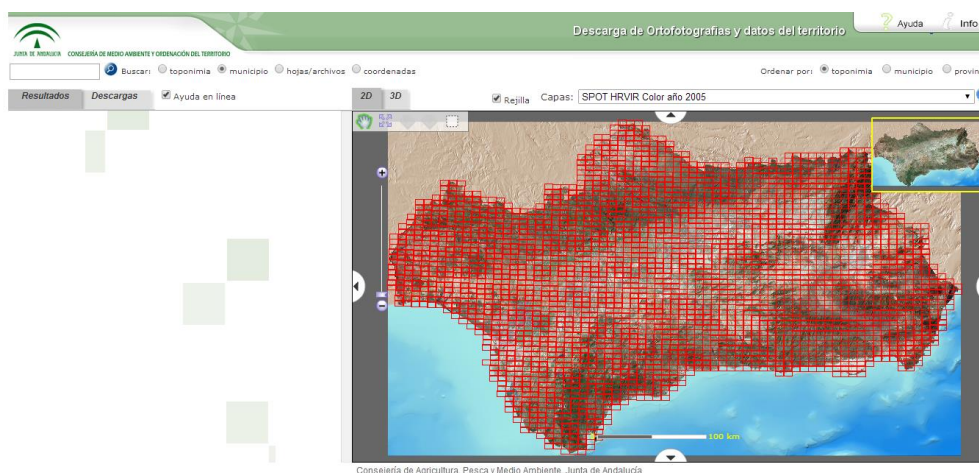


Ilustración 51. Página de descarga de MDE Andalucía

Una vez accedido a la página, se elige en la pestaña “capas”, lo que queramos descargar, tanto MDE como ortofotografías. Una vez realizado esto, se procede a elegir la zona de estudio que nos ocupa. Una vez hecho esto, a la izquierda aparecerá en la pestaña los datos que se desea descargar. Se eligen dichos datos y se descargan dichos MDE u ortofotografías.

Para una mayor ampliación de los contenidos que se pueden encontrar en esta aplicación, está disponible el siguiente enlace: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/rediam/documentos/manual_visor_descarga.pdf

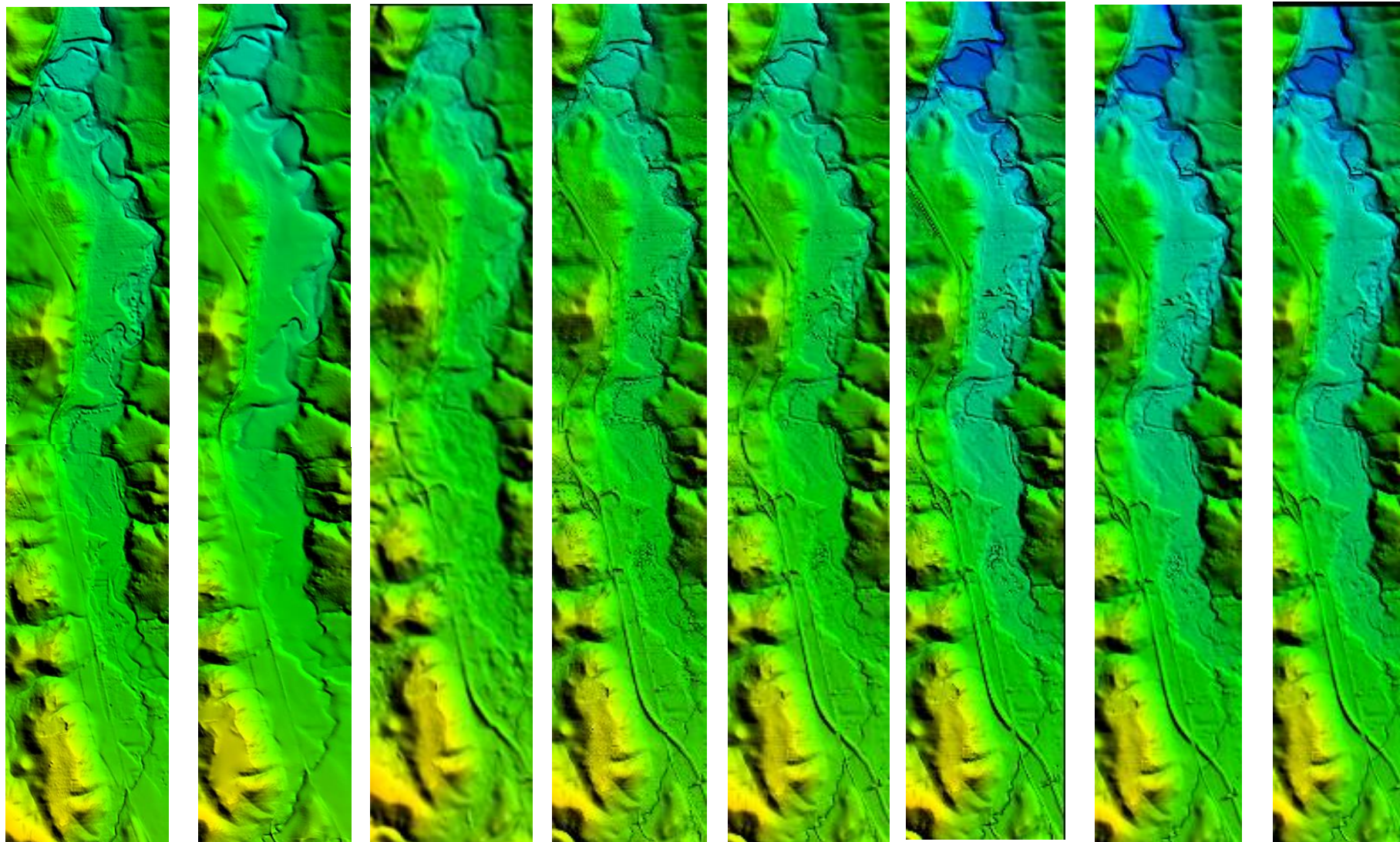
3.6.5.1 Modelos digitales de elevaciones de Andalucía

Hay disponibles 22 series de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de ámbitos locales obtenidas con diferentes resoluciones geométricas (principalmente 1m) en función del objeto del proyecto: inventarios forestales, estudios hidrológicos, explotación de canteras, afección de incendios...

Estos Modelos Digitales se han generado a partir de vuelos fotogramétricos o vuelos LiDAR principalmente (desde el año 2000 hasta la actualidad). La mayor parte de ellos se corresponden con series de Ortofotografías generadas en esos proyectos. Para algunos de las series de MDE puestos en servicio se dispone tanto de información del terreno (MDT) como de la superficie (MDS).

Los ficheros que hacen referencia a la zona de estudio serían los de los ámbitos 926-1-2 y 926-1-3. Cada archivo está hecho para una parte de dicha zona de estudio. Tras una búsqueda detallada se puede observar el MDE de nuestra zona de estudio.

En primer lugar se van a ordenar por años los diferentes modelos digitales de elevaciones, como se observará en la siguiente página, se hará una comparación en cuanto a variaciones a lo largo del tiempo del terreno.



MDE 1977-1983

MDE 1984-1985

MDE 1998-1999

MDE 2001-2002

MDE 2004-2005

MDE 2006-2007

MDE 2008-2009

MDE 2010-2011

Como se puede observar existen bastantes diferencias entre ellos, la mayor de todas ellas es la resolución, quizá el MDE del año 1999 es el de menos resolución. También se puede observar que existen zonas en los que los sedimentos aumentan y otras en los que disminuyen.

Como son muy parecidos los MDE, se va a comparar únicamente los más notables, siendo estos el del año 2001 y el del año 2011.

Como se aprecia, en el año 2001, el cauce está definido en cuanto a inundaciones, quizá también debido al factor humano, anteriores a este año, como la inundación de 1962 por poner un ejemplo. Se va a ver como varía el cauce de un río y donde son aportados los sedimentos cuando ocurre una crecida.

Para empezar, se van a comparar la ortofotografía con su MDE correspondiente, el cauce se puede ver bastante definido en la zona A, Las Infantas, y la zona B, el meandro significativo de la zona de estudio. En la zona A, se aprecia prácticamente la zona del río, en cambio en la zona B es más difícil pues el nivel es más alto, es una llanura de inundación.

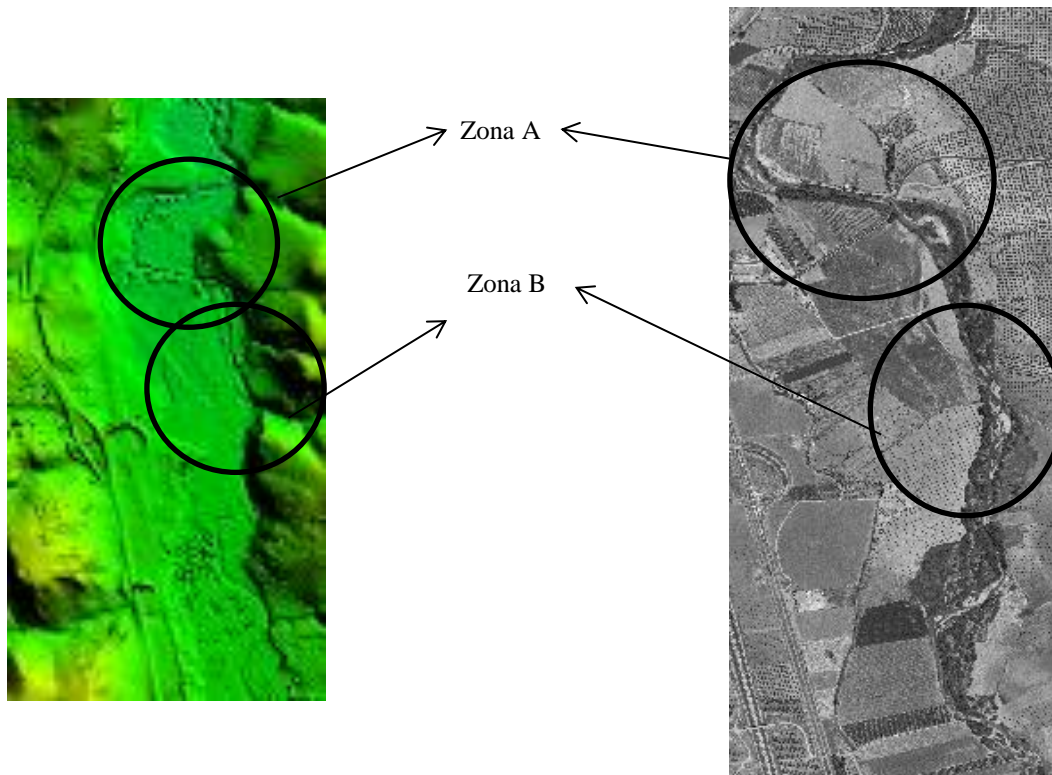


Ilustración 52. Comparación MDE y Ortofoto 2001

En cuanto al año 2011, es completamente igual, pero con más resolución como se puede ver a continuación. El cauce del meandro de estudio se puede observar con más facilidad.

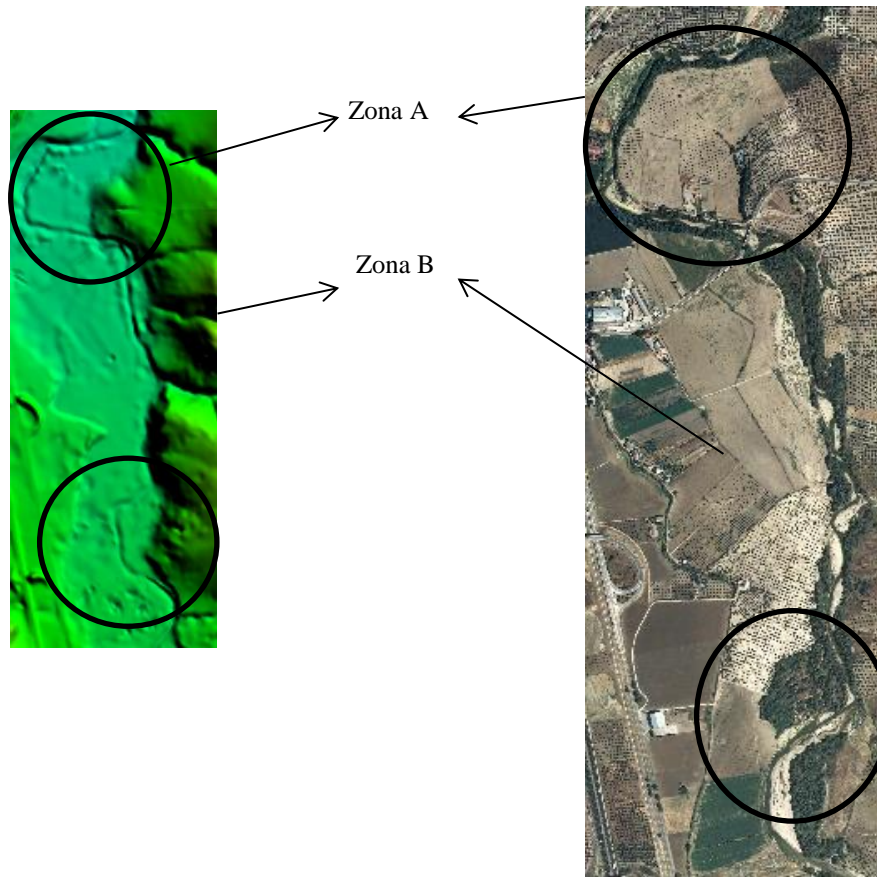


Ilustración 53. Comparación MDE y Ortofoto 2011

En cuanto a las diferencias no son abrumadoras, pues se puede ver que la delimitación del cauce es prácticamente la misma entre 2001 y 2011 en la zona que se ha visto, en cambio, un problema importante es que la altura del terreno ha variado, los sedimentos han ido disminuyendo y el nivel del río, la altura del terreno, cada vez es menor. Siendo transportados los sedimentos a otras zonas, más lejanas. Se puede observar, como la zona B de 2001, no se aprecia bien, en cambio en 2011 sí, esto es debido a lo anterior, los sedimentos han ido disminuyendo y se va apreciando en este terreno mejor el cauce. Esto se puede relacionar con las crecidas de los últimos años, como por ejemplo febrero y marzo de 2010. El río Guadalbullón creció tanto que el aforo fue imposible de medir dicho caudal. Y se llevó muchos sedimentos, definiendo más el cauce en unas zonas y en otras disminuyendo el nivel.

Las zonas que más cambios significativos pueden tener son aguas abajo y aguas arriba de nuestra zona de estudio. Por ejemplo cerca del río Guadalquivir como se puede observar, la altitud del terreno baja. En los MDE que se expusieron antes, se

puede observar como en la zona de arriba, que se encuentra la zona próxima a Mengibar, los sedimentos han ido siendo arrastrados por la corriente, por lo que la altitud de la zona ha disminuido.

Como se explicó en el apartado de ortofotos, el papel morfológico de la vegetación se explica por su acción directa sobre el suelo. Al no haber cubierta vegetal, los sedimentos son arrastrados por la lluvia hasta el cauce, cuando esto ocurre y la corriente es fuerte, los va arrastrando hasta otras zonas más bajas, con lo cual, cada vez el río va debilitando el suelo. Debido a esto, como se puede observar en la zona que se encuentra casi a 250 m por encima del nivel del mar, se va produciendo una llanura de inundación que antes no existía. Con el paso del tiempo y si hay más crecidas, estas zonas podrían ir en aumento.

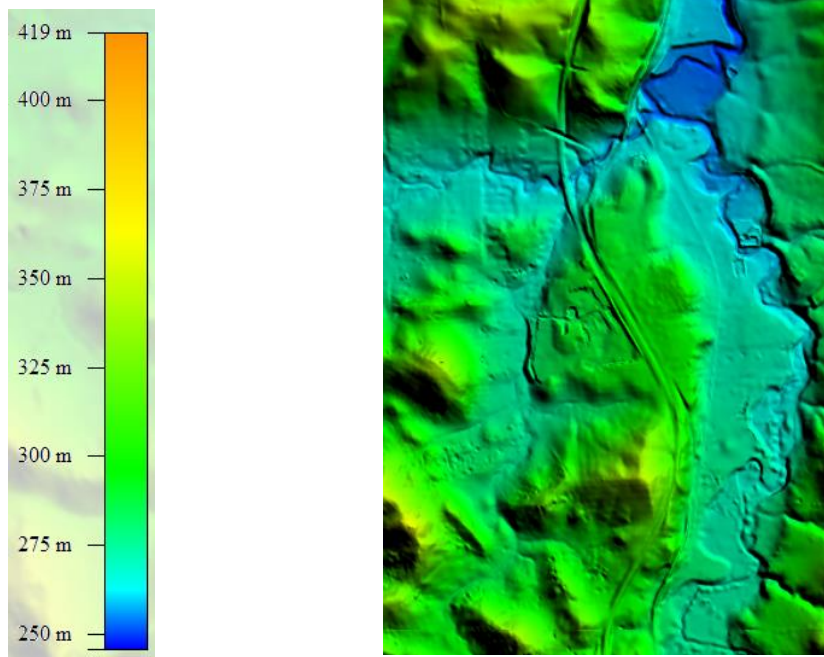


Ilustración 54. MDE con leyenda

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se expondrán para finalizar los resultados extraídos de los datos anteriores usando el software Dassflow Shallow-Waters. Asimismo, se observarán los resultados mediante un software de postprocesado.

4.1 Ecuaciones de aguas someras y código numérico

Las ecuaciones de aguas someras se obtienen a partir de una serie de simplificaciones en las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones describen el comportamiento de un fluido en zonas poco profundas, ya sea en costas o en cuerpos de agua (ríos y lagos). A pesar de las hipótesis empleadas, los resultados obtenidos de la solución de estas ecuaciones, han demostrado una buena aproximación con los datos experimentales. Así también, estas ecuaciones siguen sin tener solución analítica, por lo que la solución numérica es la única alternativa viable. Para la realización de dicho estudio haremos uso, tanto de un código propio desarrollado por el tutor del proyecto, como del software Dassflow-Shallow 2.0, proporcionado por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Toulouse (Francia) en colaboración con la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza) y la Universidad de Jaén.

4.1.1 Ecuaciones de Saint-Venant 2D

El modelo de aguas someras 2D es muy utilizado a día de hoy por múltiples motivos: precisión de los resultados, capacidad para reproducir fenómenos complejos (zonas de recirculación, expansión y contracción en el flujo), capturar de manera natural resaltos hidráulicos... Las ecuaciones de aguas poco profundas modelizan de manera efectiva el proceso de inundación.

Las ecuaciones de aguas someras son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(F_x) + \frac{\partial}{\partial y}(F_y) = gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(G_x) + \frac{\partial}{\partial x}(G_y) = gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad (3)$$

Donde h es la profundidad, u y v son las componentes x e y velocidades, S_0 y S_f son el gradiente de elevación del cauce (o vector pendiente) y el coeficiente de fricción, g la gravedad. Además, entre otras fórmulas (como Darcy-Weisbach y Chezy), el término S_f puede ser estimado mediante la fórmula de Manning:

$$S_{fx} = \frac{n^2 q_x \sqrt{(q_x)^2 + (q_y)^2}}{h^{7/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 q_y \sqrt{(q_x)^2 + (q_y)^2}}{h^{7/3}} \quad (4)$$

Siendo q_x y q_y las componentes de descarga unitarias y donde n es el coeficiente de Manning. En función del tamaño de grano, la forma de obtener dicho coeficiente sería:

$$n = 0.0150 \cdot d^{1/6} \quad (5)$$

Donde d es el diámetro medido del grano, indicado en milímetros.

El caso de los meandros, por ejemplo, no es necesario tenerlo en cuenta, ya que para el caso de la simulación bidimensional, el campo de velocidad bidimensional directamente modelará las pérdidas. En la simulación unidimensional sí que habría que aumentar el coeficiente de Manning.

En la mayoría de los ríos S_f es grande, siendo $S_0 \approx S_f \gg \frac{\partial hu}{\partial t} \approx \frac{\partial hv}{\partial t}$

La hipótesis de aguas poco profundas desprecia la componente z pues la escala de longitud horizontal es mucho mayor que la de longitud. Por lo tanto se prescinde de la componente vertical debido a:

Conocida la ecuación de continuidad para líquidos perfectos:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Llamamos $u^* = \frac{u}{U}$; $v^* = \frac{v}{V}$; $w^* = \frac{w}{W}$; y $x^* = \frac{x}{L}$; $y^* = \frac{y}{L}$; $z^* = \frac{z}{H}$

$$\frac{U}{L} \cdot \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{V}{L} \cdot \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{W}{H} \cdot \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0$$

$$\frac{U}{L} \approx \frac{V}{L} \approx \frac{W}{H}$$

$$U \approx V \approx \frac{L}{H} W \quad (8)$$

$$w \approx \frac{H}{L} U \equiv \epsilon U \text{ siendo } \frac{H}{L} \ll 1$$

$$W \ll U$$

Siendo despreciable la componente en z.

Las ecuaciones en derivadas parciales anteriores (1), (2), (3) son de primer orden en tiempo y espacio, siendo las incógnitas h, u, v. Por ende, es necesario incluir una condición inicial y varias condiciones de contorno. Como se pretende hacer un estudio en estado estacionario, se hará un análisis transitorio previo en el que se parte de que el lecho está seco, por tanto las condiciones iniciales son nulas, y éste valor se irá actualizando hasta llegar a dicho estado estacionario. En la entrada hay una altura mínima, z_{\min} , que sumada a la altura del río, h, resulta ser una constante. Por otro lado, mediante Matlab es posible calcular el área mojada.

El caudal del río es el área mojada por la componente normal a dicha área de la velocidad. A la salida se establece unas condiciones de contorno tipo Neumann.

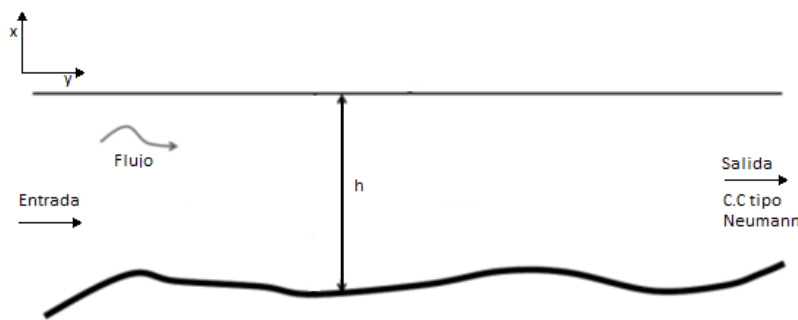
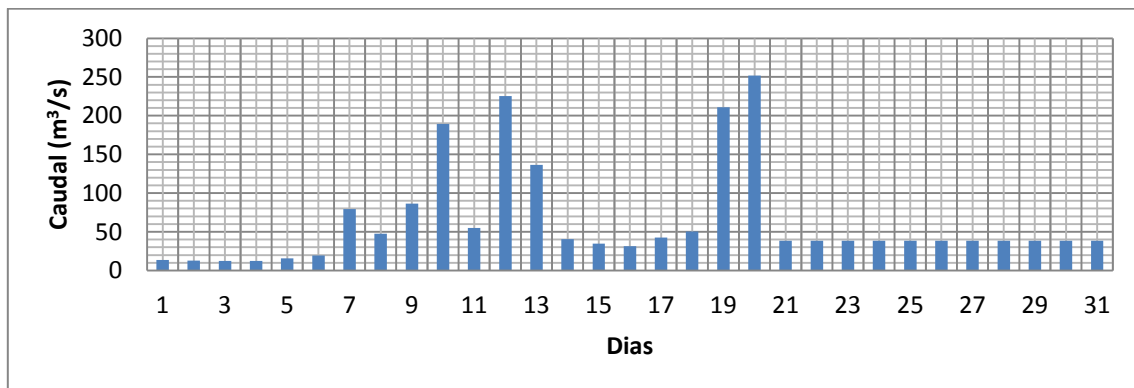


Ilustración 56. Volumen de control de un río

Además, se va a suponer una crecida lenta (lluvias intensas durante mucho tiempo) para nuestra simulación. Del estilo de marzo de 2013 en la que llovió durante varios días así como las lluvias intensas de 1962.



Gráfica 21. Caudal río Guadalbullón marzo 2013

Se considera una crecida cuasiestática pues es más realista y ayuda a comprender más la dinámica de la simulación al contrario de una crecida súbita (gota fría). A continuación se dará una explicación sobre el software utilizado.

4.1.2 DassFlow

DassFlow es un software computacional para la simulación numérica de flujos de superficie libre. Está diseñado especialmente para el análisis de sensibilidad variacional, identificación de parámetros, la asimilación de datos (4D-VAR) usando ecuaciones adjuntas.

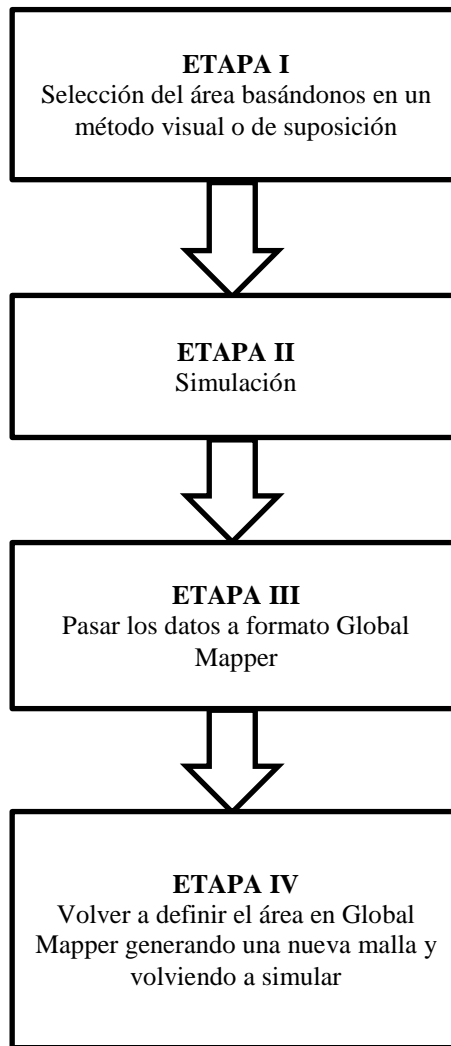
DassFlow se desarrolló en la Universidad de Toulouse-INSA / IMT (Instituto de Matemáticas de Toulouse), Francia. Contiene el código: DassFlow-Shallow ecuaciones de aguas poco profundas y volúmenes finitos [\[22\]](#).

El software Dassflow permite la simulación numérica directa del calado y del vector velocidad conocido el caudal, la geometría del cauce y la rugosidad del medio lechoso. La ventaja de Dassflow es que, además de la simulación numérica directa, éste permite la asimilación de datos. Esto quiere decir que, conocido el calado del flujo y la geometría del cauce, se puede inducir cual es el campo de velocidad y caudal asociado.

Otro ejemplo de asimilación de datos es, conocido el campo de velocidad y calado, se puede obtener la geometría del fondo del canal. Esto se realiza mediante un método variacional, que se basa en la teoría de control óptima de ecuaciones diferenciales parciales, fusionando así de manera óptima las medidas con los modelos matemáticos: por un lado tiene en cuenta en análisis de sensibilidad, y por otro ofrece un modo óptimo de identificación de algunos valores de parámetros de entrada.

4.2 Preprocesado para simulación 2D

Antes de realizar la simulación se hará un preprocesado para optimizar la malla y para obtener una precisión mayor de la malla. La estructura del preprocesado será la siguiente como se puede observar en el siguiente diagrama de bloques:



Lo primero es cargar en Global Mapper la ortofoto, para ello se usará la de 2011 pues es la última de la que se dispone de MDE. Una vez hecho esto, se procede a situar los puntos en el cauce de nuestro río dejando dentro del área delimitada por los puntos las posibles zonas inundables. Este paso será intuitivo, pues no sabemos a ciencia cierta qué área quedará inundada y cual no.

Una vez hecha la malla y simulada se observa que el agua sale de los límites de la malla por lo que es necesario volver a simular para abarcar la totalidad de la zona inundable.

Como se puede observar en las imágenes siguientes, hay muchas zonas en la que el agua sale del área descrita.

En las siguientes imágenes se puede observar la malla de prueba en la cual una vez simulada se superpondrá la zona inundada en ella. Se aprecia cómo sale de los límites del área por lo que se debe crear otra malla acorde a esta situación, delimitando de forma más precisa el área y aumentando el área.

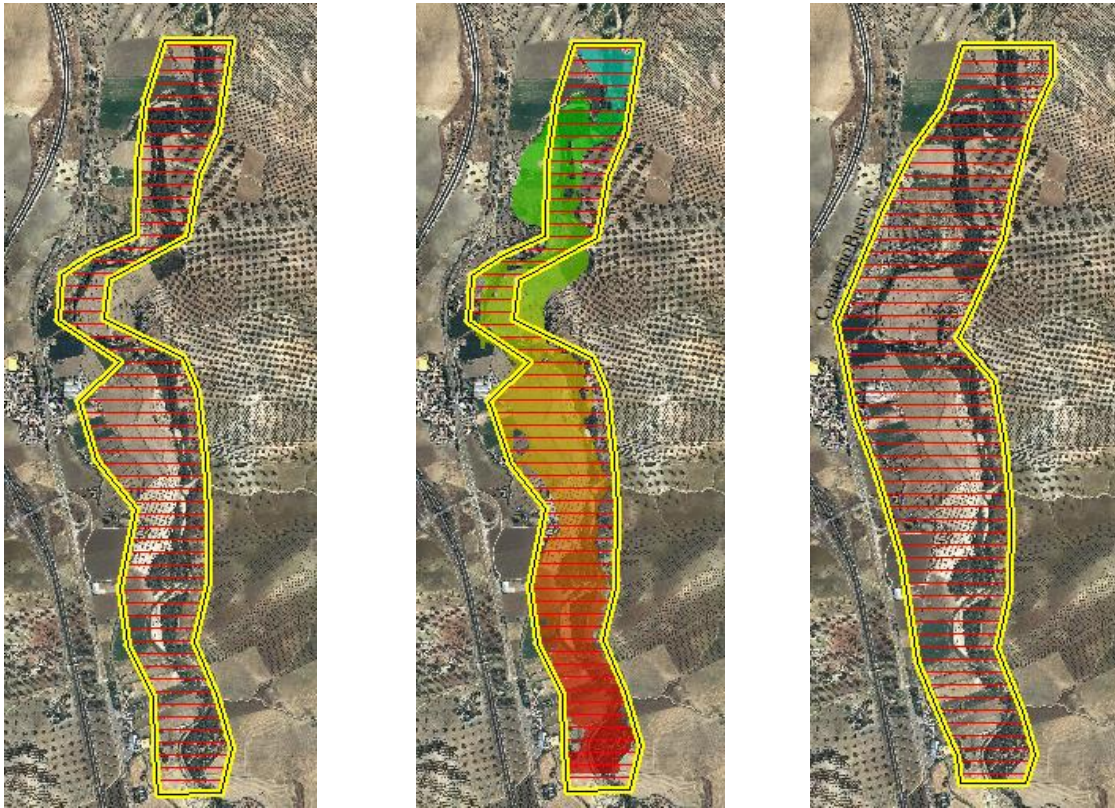


Ilustración 57. Malla de prueba, simulada y final

Se necesitan unas condiciones de entrada (Inlet), salida (Outlet) y tipo pared (Wall) para la simulación. Un río no es muy distinto a un volumen de control de un cilindro por ejemplo, como se puede observar a continuación:

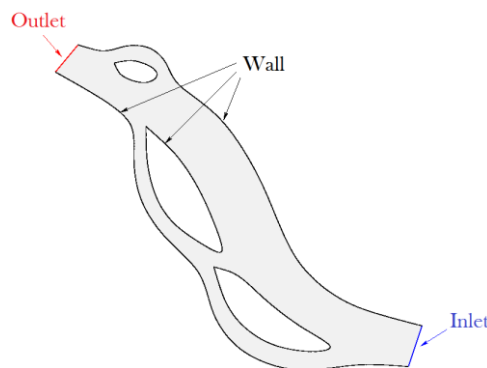


Ilustración 58. Dominio de la simulación y condiciones de contorno

Las coordenadas de las zonas más importantes para la simulación son las de entrada y salida, se tienen dos puntos para la entrada y dos puntos para la salida.

ENTRADA	COORDENADAS	
	X	Y
INLET 1	432018	4194642
INLET 2	431680	4194642

SALIDA	COORDENADAS	
	X	Y
OUTLET 1	431687	4198511
OUTLET 2	431835	4198511

Una vez terminada la malla, se puede ver el número de celdillas que se obtienen, área y perímetro.

Con un área de 2,29 km², perímetro de 9,058 km y un dominio de contorno de 30 puntos. Admite dos tipos de celdas computacionales: triángulos y/o cuadriláteros. En este proyecto se emplean triángulos que representan con mayor precisión los modelos de elevación del terreno. Los triángulos tienen 3 metros de lado, por lo que se obtiene un total de 506883 celdillas, más de medio millón de puntos, es un elevado número de celdillas por lo que la precisión va a ser bastante elevada.

Ahora, se carga el MDE y una vez cargada se procederá a exportarlo en formato .stl. Para ello, se pincha en file > export > export elevation grid format y en el menú desplegable que aparece se elige la opción STL (ASCII Matlab Binary).

El formato .stl es el formato de archivo estándar de prototipado rápido. Utiliza una malla de triángulos sobre las superficies para definir la forma de un objeto.

Cuanto más pequeños sean estos triángulos, mejor la aproximación a la superficie, a costo, naturalmente, de un mayor tamaño del archivo .stl y de mayor tiempo de fabricación del prototipo o en nuestro caso tardará más en realizarse la simulación.

Para leer el archivo .stl en Matlab, se usará un scrip proporcionado por el tutor del proyecto. El nombre del script es stlread.m.

Una vez que se abre el script stlread.m de Matlab, se ejecuta el código. Seleccionamos sólo los puntos que son únicos, por si algo está duplicado.

Creamos una triangulación de Delaunay. La triangulación de Delaunay fue una de las primeras técnicas de discretización triangular utilizadas. La unión de todos estos puntos por pares genera otra discretización del dominio, conocida como triangulación de Delaunay, que posee una característica muy interesante para la generación de mallas: la regularidad de ángulos en los triángulos generados es máxima. A continuación, se eliminan los triángulos con un lado superior a 5.

4.3 Configuración de Dassflow-Shallow

Antes de realizar la simulación, debemos configurar el software Dassflow-Shallow, modificando algunos datos, en bloc de notas, como:

bc.txt: en este documento de texto, indicamos que tipo de condiciones de contorno lleva cada celdilla, siendo tres los tipos de condiciones:

1. Descarga (discharge) lee esta condición de otro fichero
2. (Transm) tipo Neumann
3. (Wall) pared

hydrograph.txt: le damos los puntos en seis instantes de tiempo. Siendo una simulación cuasiestática para que esté del lado de la seguridad. Lo primero, se ha simulado a $300 \text{ m}^3/\text{s}$, un poco más de la inundación de 1962 que fue $255 \text{ m}^3/\text{s}$ para así estar por el lado de la seguridad.

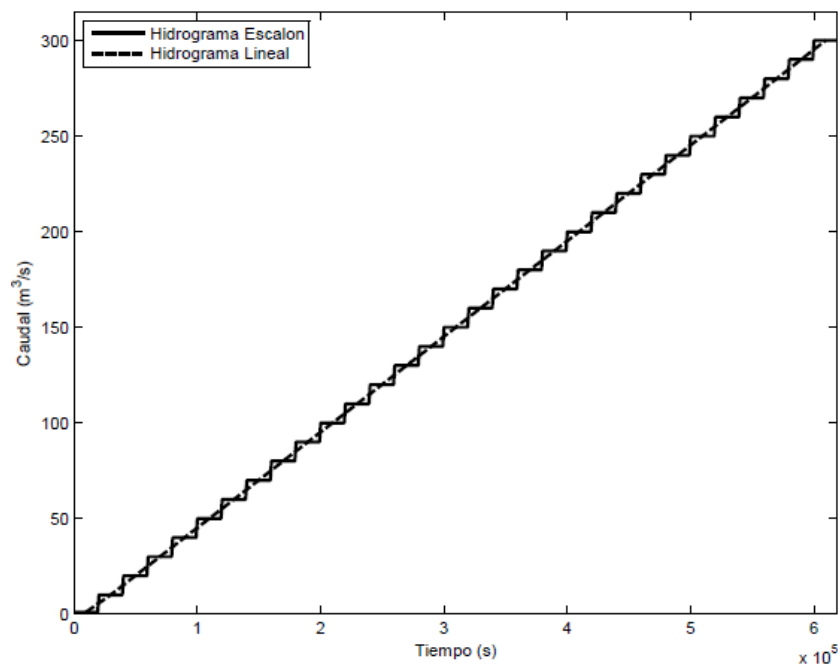


Ilustración 59. Hidrograma

M_user_data.f90: en el que se incluirán condiciones iniciales, por ejemplo, la elevación inicial 287.5 metros.

Input.txt: en este archivo, incluimos tanto el tipo de malla como su nombre, los parámetros de la simulación, así como parámetros numéricos como el paso de tiempo (cfl) tal que el número de Courant sea 0.5. Factor de fricción igual a 1. Se explican más detalladamente en la siguiente tabla:

Mesh type	Mesh type Mesh name	dassflow malla2_3x3.geo
Simulation parameters	Simulation time (ts) Fixed Time Step (dt) Output Result File Time Step (dtw) Interval to generate the hydrograph	930000.d0 1.d-2 3.d4 1.d0
Numerical Parameters	Temporal Scheme (temp_scheme) Spatial_Scheme Adaptative Time Step (adapt_dt) Number in case of Adaptative Time Step Height to stabilize SW Numerical Schemes Friction	euler muscl_b1_b 1 0,5 0 1
Physical Parameters	Gravity	9,81

Y una vez hecho esto, exportamos.

Una vez que hemos configurado estos archivos, ejecutamos Dassflow-Shallow, se empieza la simulación. Para ello, se usarán doce procesadores en paralelo, tardando un día los treinta caudales siendo el tiempo de cálculo más rápido. El equivalente de tiempo físico de simulación, 60.000 segundos son 7 segundos. Tarda un día en simularse. Vamos por encima del tiempo real siendo un sistema de alerta temprana.

4.4 Resultados de la simulación

En este apartado se va a proceder a mostrar los resultados de la simulación, para ello se va a utilizar un programa de código abierto, que será un software de mecánica de fluidos computacional utilizado para ver los resultados del post-procesamiento, es decir, un software de visualización CFD que se va a utilizar para ver los resultados obtenidos de DassFlow Shallow.

Una vez se han obtenido los resultados de la simulación con el programa DassFlow Shallow se van a visualizar a continuación.

Una vez cargado el primer fichero, vamos a visualizar la malla, como se explicó anteriormente, la malla va a ser triangular, como se muestra a continuación.

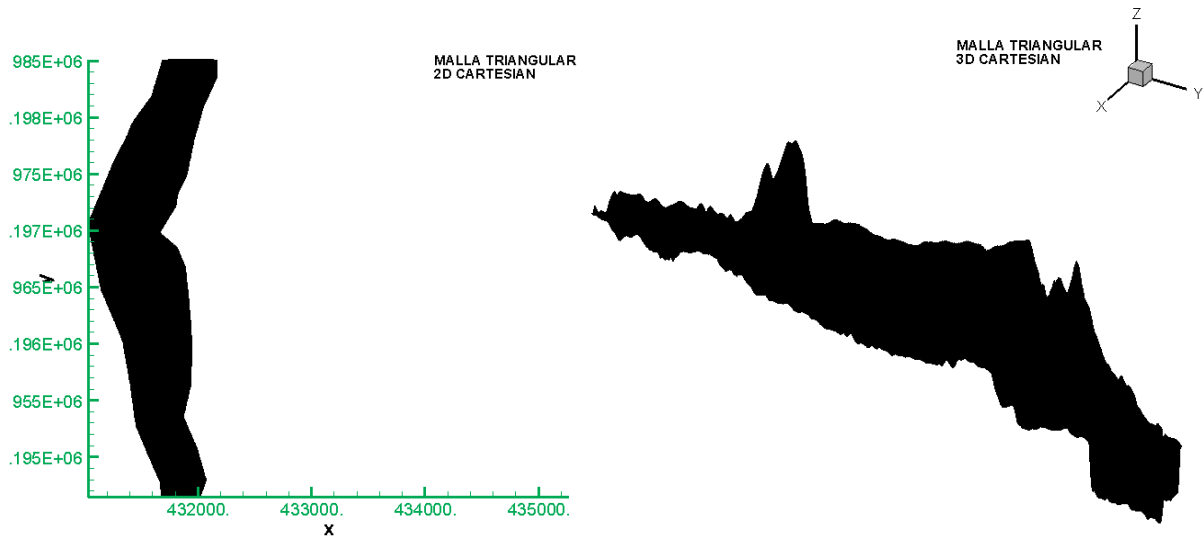


Ilustración 60. Malla 2D y 3D

Como se puede observar, debido al gran número de celdillas que hay es imposible visualizarlos, para ello se hará un zoom en una zona para verlos mejor. Para delimitar la pared, se ha usado el color azul.

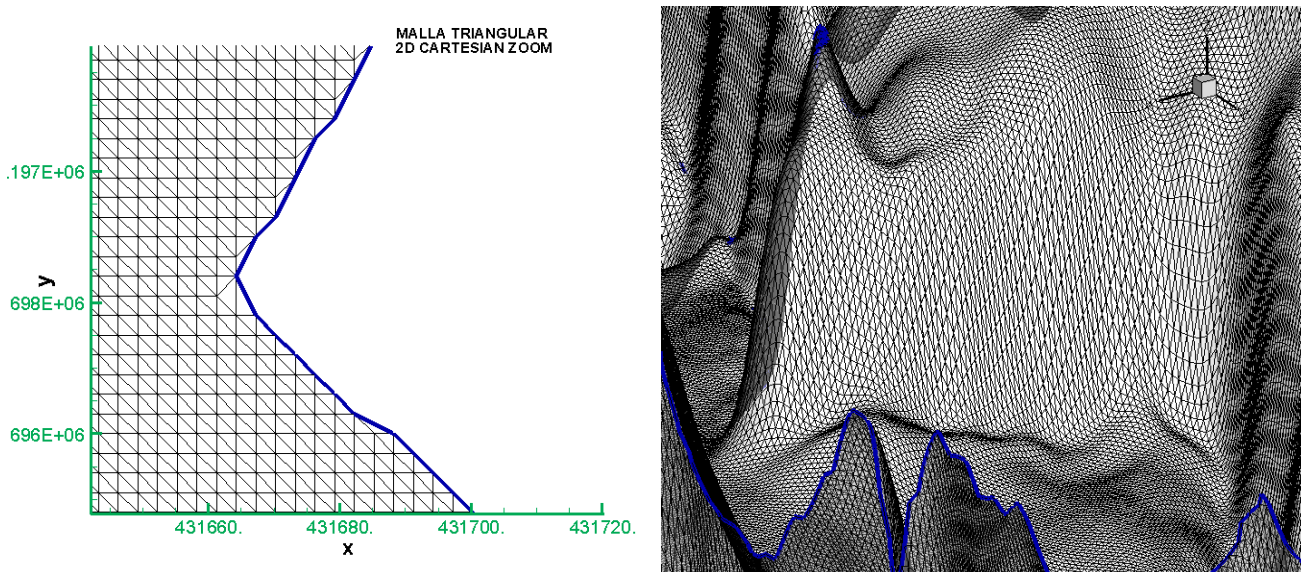


Ilustración 61. Malla 2D y 3D ampliada

Como se puede observar, los triángulos están perfectamente ordenados así como la regularidad de ángulos en los triángulos generados es máxima (Triangulación de Delaunay).

Ahora, una vez definido esto, se van a presentar los contornos de los distintos espacios de tiempo, asimismo, se verá cómo va aumentando el nivel del río.

Para ello vamos a tener representada en la leyenda la altura, se pueden elegir varios tipos de leyenda, como por ejemplo h (altura), bathy (batimetría) o z_s (batimetría + h). Para situarse, el fluido viene por la zona de color verde, que se encuentra a una altura mayor que la zona de Las Infantas (zona azul). Como se puede observar, a medida que va aumentando el caudal el nivel del río va a ir subiendo paulatinamente. Esto se aprecia no solo viendo que aumenta el nivel de agua, sino en el nivel del río que va siendo cada vez mayor según se puede observar en la leyenda.

Como se puede observar en las siguientes fotografías, existe una diferencia bastante notable entre los distintos regímenes que encontramos, por ejemplo, el primer régimen se ve que sólo unas pocas zonas son inundadas, debido a que el nivel de altura de éstas es igual o inferior al nivel del río. En cambio, al ir aumentando gradualmente el caudal, se puede observar cómo se van viendo más zonas anegadas.

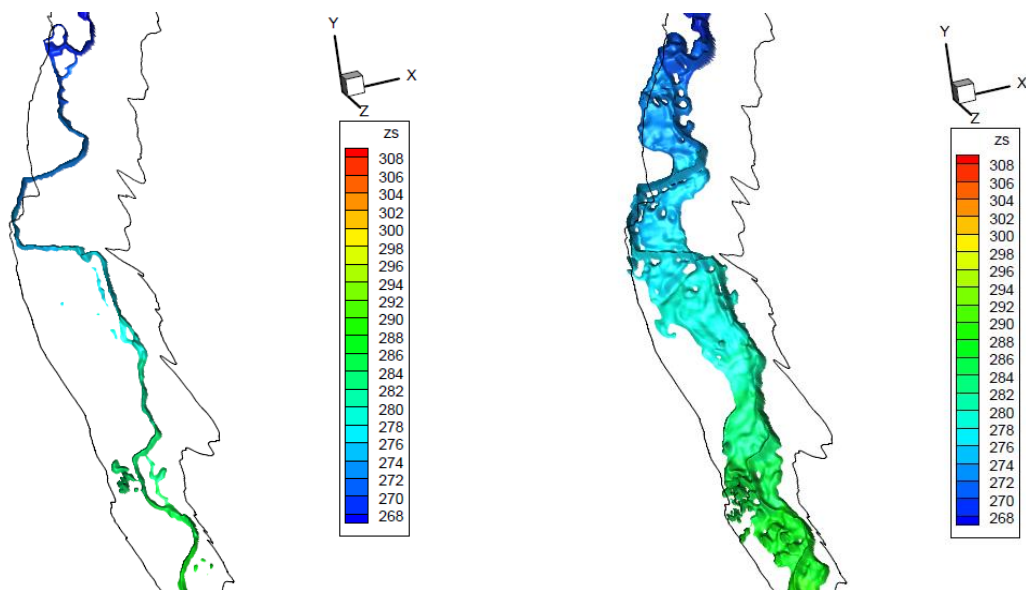


Ilustración 62. Zona inundada

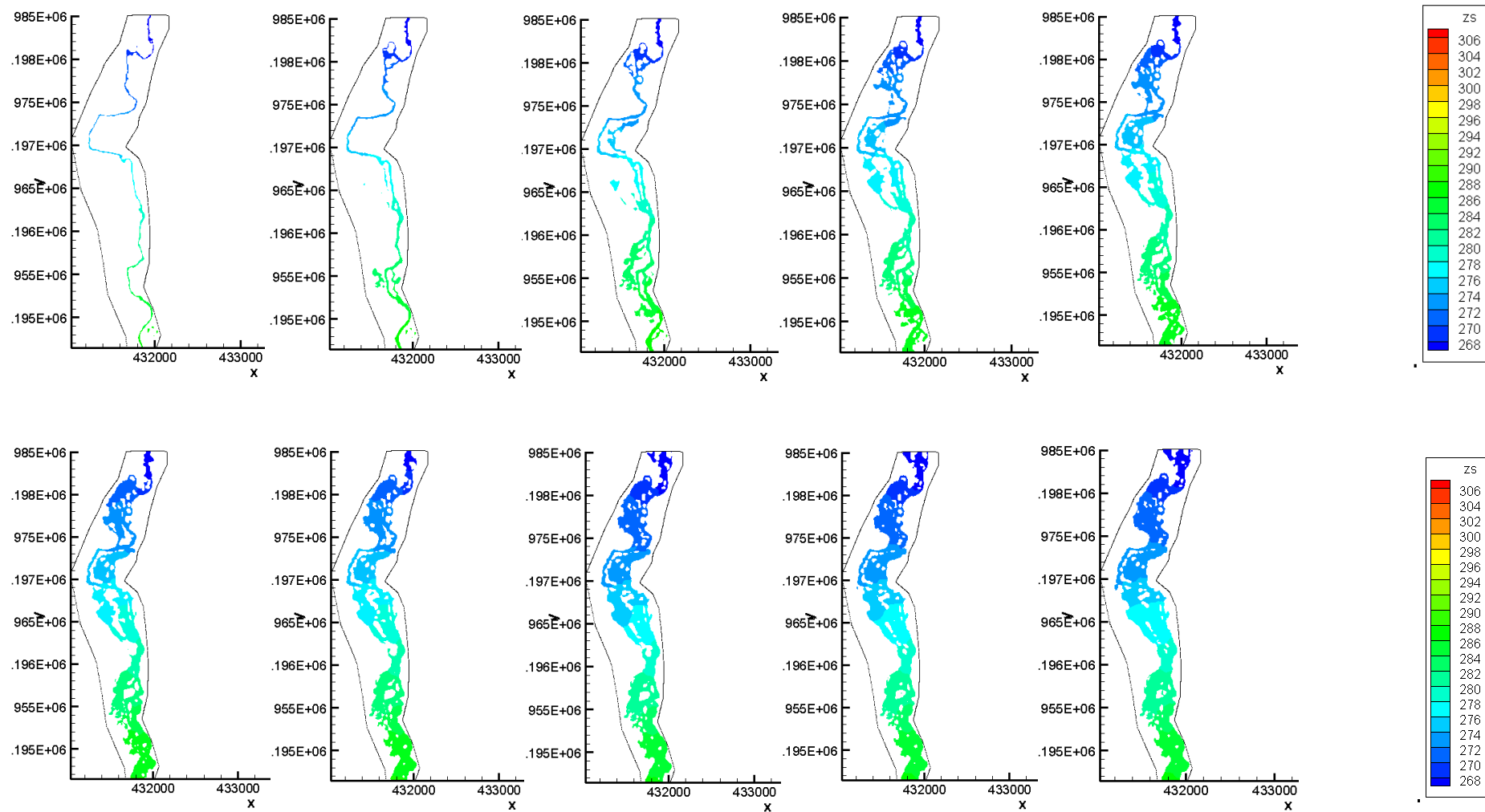


Ilustración 62. Aumento del nivel del río según el caudal

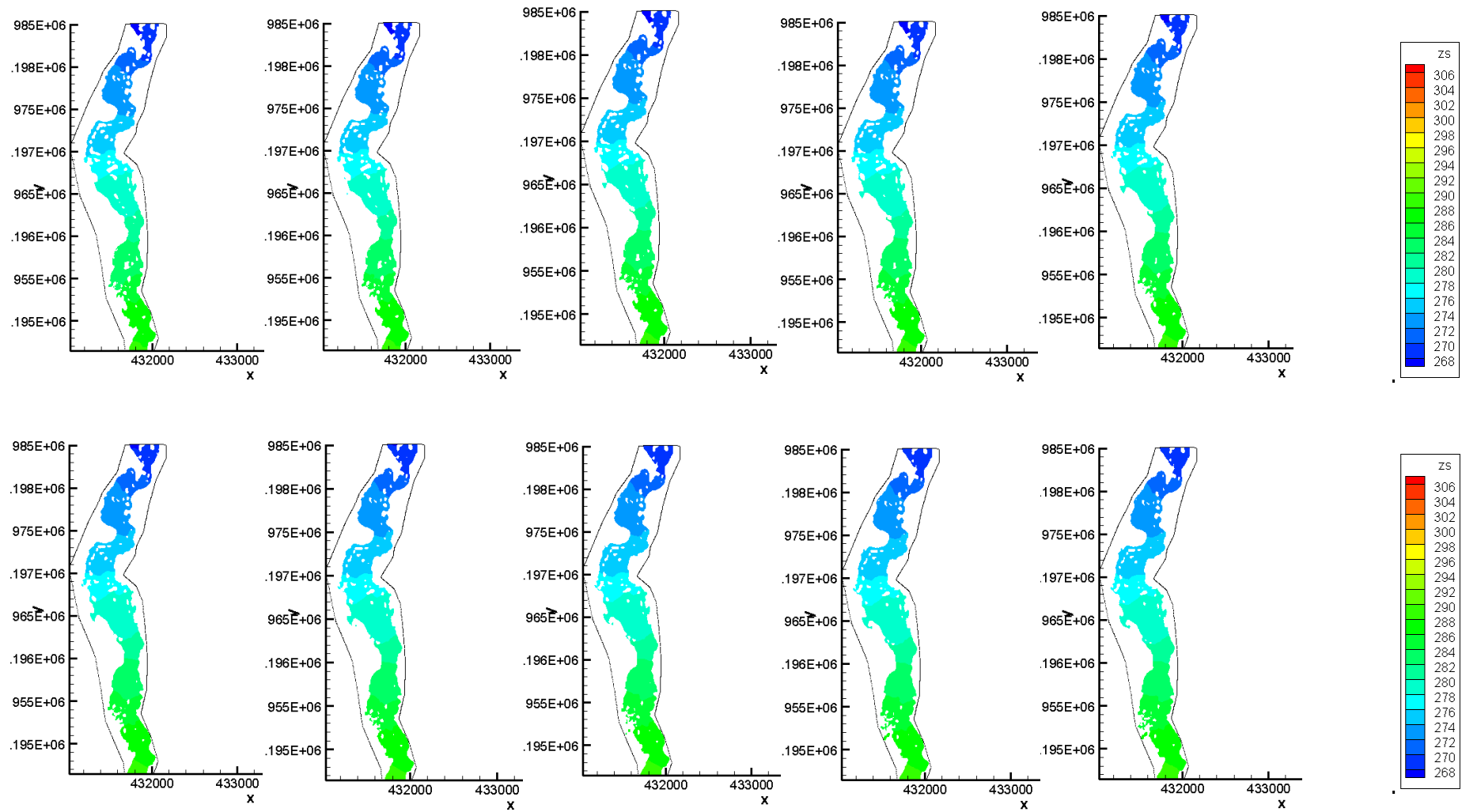


Ilustración 63. Aumento del nivel del río según el caudal

Se aprecia cómo va aumentando lentamente el nivel del agua, anegando zonas cercanas. Muchas de ellas son zonas de cultivo o zonas en las que hay actividad humana (naves industriales, cortijos, etc.)

A continuación, se aprecia la vista en 3D, la zona inundada y la zona delimitada por el río.

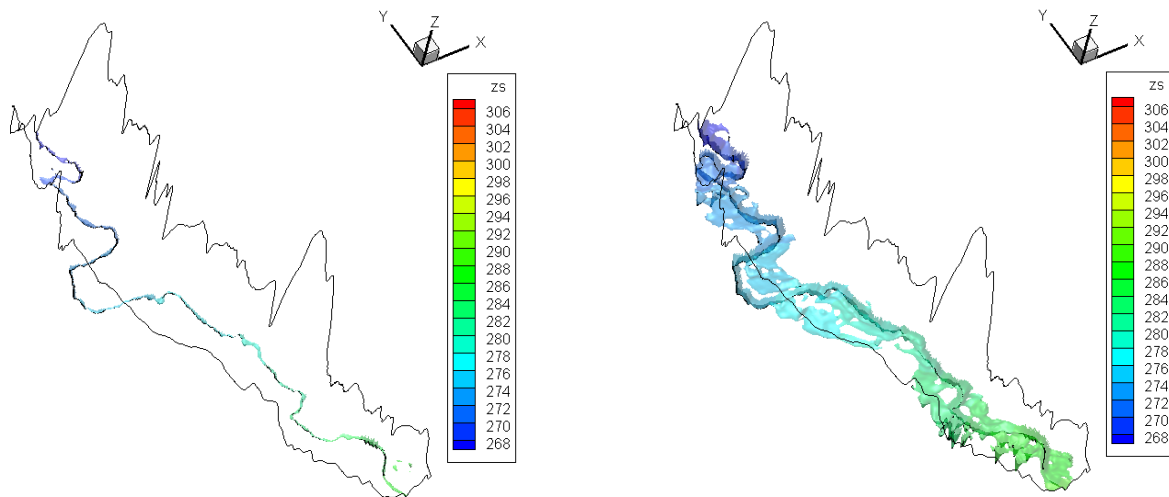


Ilustración 64. Aumento del nivel del río en 3D

Por lo tanto, gracias a la simulación, se puede ver que zonas se inundan y cuáles no, asimismo, para futuros trabajos, se puede apreciar por donde van a dirigirse los ríos y que zonas van a anegar, obviamente, van a desplazarse para llegar a su estado natural.

Capítulo 5

Conclusiones

En el último capítulo de este Trabajo Fin de Grado, se van a exponer las conclusiones obtenidas a raíz de los resultados conseguidos en la simulación. Asimismo, se expondrán los motivos por los cuales, se cree que este proyecto permitirá de estrategias de restauración fluvial y mejoras del ciclo agua/sedimento en trabajos futuros.

Durante la redacción de este Trabajo Fin de Grado, se han tratado temas bastante diversos pero que guardan relación entre sí. Empezando por la recogida de datos de caudal obtenidos en las estaciones de aforo, que han sido muy útiles para prever de qué tamaño sería el caudal que pasaría por dicho río en un futuro, así mismo, gracias a la gráfica del período de retorno se puede observar claramente que existen períodos repetitivos de lluvias, significando que próximamente se repetirá un evento parecido al de hace años.

Además, se usaron tanto ortofotos como los modelos digitales de elevaciones (MDE) para prever y mostrar cómo ha ido modificándose el terreno debido a la acción de las inundaciones y a la disminución de la capa vegetal. Está claro que al llover y no ser absorbida el agua de la lluvia por los árboles o vegetación, ésta corre y arrastra la tierra y piedras que llegarán al cauce del río, aumentando su caudal y provocando inundaciones en los alrededores del mismo. Además aumentaría la erosión, al no ser absorbida el agua de la lluvia se arrastra la capa vegetal de la tierra donde germinan las semillas y crecen las plantas.

Por lo tanto, la restauración de la capa vegetal de los ríos, así como de los espacios verdes, constituyen una de las principales estrategias para reducir las alteraciones del ciclo del agua y con ello disminuir las inundaciones en zonas rurales y urbanas.

Una propuesta importante de éste proyecto es la última noticia de la que se tiene constancia, en la cual, el mapa de riesgos de inundaciones sitúa alrededor de mil viviendas dentro del período de retorno de cien años. Dichas viviendas están en los tramos de los ríos Quiebrajano, Guadalbullón y Eliche, abarcando unos 44 km.

Este Trabajo Fin de Grado es además un estudio serio y pionero en la provincia de Jaén. Como se ha visto en los datos sobre inundaciones analizados anteriormente, las más antiguas son de ciudades importantes como Sevilla o Córdoba, pero en la provincia de Jaén no se han encontrado registros de este tipo. Obviamente cabe pensar que esto es debido a una falta de información y estudios científicos sobre paleoinundaciones ya que no existen registros documentales. Quizá por la falta de inversión que hubo en estos temas o puede ser por el lento desarrollo de la provincia.

Por lo tanto es un estudio bastante importante pues la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir solo ha hecho estudios de este tipo para ríos grandes en Andalucía, en cambio para los pequeños no.

Los resultados obtenidos de la simulación son muy fiables como se puede observar. Gracias a dichos datos se pueden observar las zonas que quedarán anegadas y las que no. Esto permitirá la propuesta de estrategias de restauración fluvial y mejoras del ciclo agua/sedimento en trabajos futuros.

Algunos de los objetivos a llevar a cabo de las propuestas de dichas estrategias serían:

- Recuperar los procesos dinámicos y de funcionamiento del curso fluvial más próximos al estado natural
- Lograr que el río aumente su capacidad de adaptación frente a las perturbaciones naturales
- Fomentar la creación de un ecosistema fluvial sostenible y compatible con los usos del territorio y el aprovechamiento de los recursos fluviales

Bibliografía

[1] Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 2007/60/CE, de 23 de octubre, Parlamento Europeo y del Consejo. Evaluación y gestión de los riesgos de inundación, 23 de octubre de 2007, núm. 0275, p. 34163-34176.

[2] Magrama. *Directiva 2007/60 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación*. <
http://www.magrama.gob.es/es/agua/legislacion/gri_egr_inundacion.aspx> [Consulta: 02 de junio de 2015]

[3] Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, 15 de julio de 2010, núm. 171, p. 61954-61967.

[4] Evaluación preliminar del riesgo de inundación de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <
http://www.chguadalquivir.es/export/sites/default/portalchg/laDemarcacion/guadalquivir/laGestionAgua/gestionRiesgosInundacion/planesEvaluacionPreliminar/ficheros/DHG/MEMORIA/Memoria_Guadalquivir.pdf> [Consulta: 05 de abril de 2015]

[5] Evaluación preliminar del riesgo de inundación de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <
http://www.chguadalquivir.es/export/sites/default/portalchg/laDemarcacion/guadalquivir/laGestionAgua/gestionRiesgosInundacion/planesEvaluacionPreliminar/ficheros/DHG/MEMORIA/Memoria_Guadalquivir.pdf> [Consulta: 07 de abril de 2015]

[6] Evaluación preliminar del riesgo de inundaciones en Andalucía. Consejería de medio ambiente. Junta de Andalucía. <
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/agencia_andaluza_del_agua/nueva_organizacion_gestion_integral_agua/gestion_riesgos/plan_prevencion_inundaciones/epria_documentos_definitivos/evaluacion_preliminar_riesgo_inundaciones_andalucia_1.pdf> [Consulta: 12 de abril de 2015]

[7] MARTÍN VIDE, JUAN P. Ingeniería de ríos. Cataluña: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya SL, 2002. ISBN: 978-84-8301-900-9.

[8] http://www.lasexta.com/noticias/hemeroteca/cortes-inundaciones-desalajos_2010022300178.html [Consulta: 15 de abril de 2015]

[9] http://elpais.com/elpais/2010/02/23/actualidad/1266916621_850215.html [Consulta: 18 de abril de 2015].

- [10] <http://andaluciainformacion.es/jaen/111156/las-infantas-recupera-la-normalidad-tras-la-riada/> [Consulta: 20 de abril de 2015]
- [11] <http://www.ideal.es/jaen/20101207/local/jaen/afectados-inundaciones-infantas-nunca-201012071326.html> [Consulta: 24 de abril de 2015]
- [12] "Estima de precipitaciones máximas por el método de Gumbell". Ibañez Asensio, S. Moreno Ramón, H. Gisbert Blanquer, J.M. Universidad Politécnica de Valencia.
- [13] "Las gotas frías /DANAS ideas y conceptos básicos" Martín León, F. (2003). Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción, Instituto Nacional de Meteorología.
- [14] "Sección de Aforo" < http://es.wikipedia.org/wiki/Secci%C3%B3n_de_aforo>
- [15] Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca del Guadalquivir. <<http://www.chguadalquivir.es/saih/>>
- [16] Sistema de Información del Anuario de Aforos. < <http://sig.magrama.es/>>
- [17] "El Magrama conmemora el centenario de la red que mide el caudal de los principales ríos de España" < <http://www.chguadalquivir.es/opencms/portalchg/elOrganismo/prensaComunicaciones/boletinNoticias/noticias/noticia0210.html>>.
- [18] Fotografías Aéreas de Andalucía. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. <<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/fototeca/>>
- [19] Información Junta Andalucía. Ortofotos <<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.aedc2250f6db83cf8ca78ca731525ea0/?vqnextoid=48f87d087270f210VgnVCM1000001325e50aRCRD>>
- [20] Ferrero Olaya, Víctor. Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. Edición 0.95 <http://andersonmedeiros.com/ebooks/Hidrologia_Computacional_MDT_SIG.pdf>
- [21] Felicísimo, Ángel Manuel. El modelo digital de elevaciones. <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf>
- [22] Shallow-water VF schemes, wet-dry front dynamics, variational sensitivities, flood plain: F. Couderc, J. Monnier, J.-P. Vila, K. Larnier, R. Madec, D. Dartus. Submitted.Consult. Assimilation of a flood plain image into 2D shallow water model: R. Hostache, X. Lai, J. Monnier, C. Puech. J. Hydrology (2010) and X. Lai, J. Monnier J. Hydrology (2009) and M. Honnorat, X. Lai, J. Monnier, FX Le Dimet, Computational Methods for Water Ressources (2006) -Pearl river, unpublished elsewhere-.