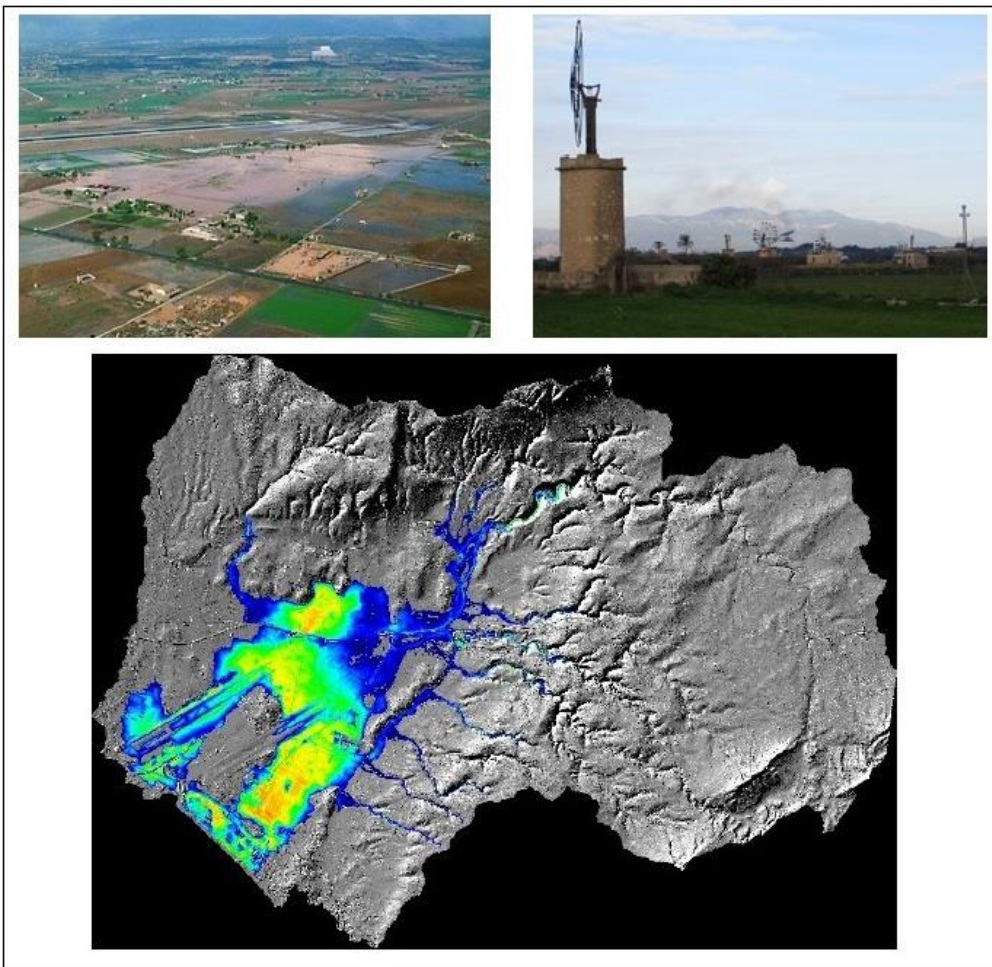




UNIVERSIDAD COMPLUTENSE  
MADRID

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO MEDIANTE TÉCNICAS SIG DE LA  
PELIGROSIDAD POR INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL PLA DE SANT  
JORDI (MALLORCA).



**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (TIG).**

**NOVIEMBRE 2012.**

**ALUMNA:** Virginia Díaz de la Cruz.

**TUTOR UCM:** Nuria de Andrés de Pablo.

**TUTOR IGME:** Manuel Bernat Rebollal.



## **RESUMEN:**

*En el presente trabajo fin de máster se pretende plantear una metodología que permita realizar un análisis de riesgo de inundación por avenidas torrenciales en una zona concreta de la Isla de Mallorca (Islas Baleares), el Pla de Sant Jordi, en el cual se vienen dando problemas de inundación de forma reiterada desde los años 70. Se propone afrontar el problema desde el método de análisis hidrológico-hidráulico con el fin de obtener una cartografía de la zona de estudio donde aparezcan indicadas las áreas susceptibles o peligrosas a ser inundadas. Todo esto se llevará a cabo empleando las herramientas que nos ofrecen las TIG, aprovechando el potencial que tienen estas en la correlación espacial de los elementos del territorio. Sus aplicaciones en el campo de los riesgos naturales son indispensables para obtener unos resultados óptimos, y poder basar en ellos, la toma de decisiones fundamentales por parte de los organismos públicos o privados para proteger a la población de cara a los desastres naturales.*

**PALABRAS CLAVE:** *riesgos naturales, inundación, análisis hidrológico-hidráulico, Pla de Sant Jordi, cartografía áreas inundables, SIG, TIG.*

## **ÍNDICE.**

### **1. INTRODUCCIÓN.**

### **2. OBJETIVOS.**

### **3. ANTECEDENTES.**

### **4. ÁREA DE ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

#### 4.1 Contexto fisiográfico y medio humano.

- **Contexto geológico**
- **Contexto geomorfológico**
- **Contexto climático y medio vegetal**
- **Contexto humano**

#### 4.2 Planteamiento del problema.

### **5. MATERIALES Y DATOS USADOS.**

### **6. METODOLOGÍA.**

#### 6.1 Metodología del análisis hidrológico.

##### *6.1.1 Análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias.*

##### *6.1.2 Análisis de hietogramas de precipitaciones máximas diarias.*

##### *6.1.3 Elaboración de capas con ArcGis.*

- **Capa de pendientes (slope).**
- **Capa de geomorfología.**
- **Capa de texturas del suelo.**
- **Capa de usos del suelo.**

##### *6.1.4 Modelo de cuenca mediante HEC-GeoHMS.*

- **Delimitación de sub-cuencas mediante la extensión HEC-GeoHMS.**
- **Asignación del parámetro número de curva (NC) a cada sub-cuenca.**
- **Asignación del valor de precipitación a cada sub-cuenca mediante el método Kriging.**

##### *6.1.5 Modelo hidrometeorológico mediante software HEC-HMS.*

## 6.2 Metodología del análisis hidráulico.

### 6.2.1 Análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS.

- **Pre-proceso en ArcGis mediante la extensión HEC-GeoRas.**
- **Preparación del modelo hidráulico con HEC-RAS.**
- **Post-procesado en ArcGis. Visualización de resultados.**

### 6.2.2 Análisis hidráulico bidimensional IBER 2D.

- **Crear o importar una geometría (topografía).**
- **Asignación de condiciones de contorno y caudales.**
- **Generar la malla.**
- **Asignación de la rugosidad del terreno (N-manning).**
- **Asignación de las opciones del cálculo (tiempo de cálculo).**
- **Consulta de resultados (módulo post-proceso).**

## 7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.

### 7.1 Resultados del análisis hidrológico.

7.1.1 Resultados del análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias.

7.1.2 Resultados del análisis de hietogramas de precipitaciones.

7.1.3 Resultados de la elaboración de capas con ArcGis.

7.1.4 Resultados del modelo de cuenca mediante HEC-GeoHMS.

7.1.5 Modelo hidrometeorológico mediante software HEC-HMS.

### 7.2 Resultados del análisis hidráulico.

7.2.1 Resultados del análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS.

7.2.2 Resultados del análisis hidráulico bidimensional IBER 2D.

## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

8.1 Discusión de los resultados del análisis hidrológico.

8.2 Discusión de los resultados del análisis hidráulico.

## 9. CONCLUSIONES.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

Históricamente, las inundaciones han sido uno de los fenómenos naturales más destructivos a los que la humanidad se ha enfrentado desde siempre. Casi todas las grandes civilizaciones han crecido asentándose en zonas potencialmente inundables, ya que la cercanía a un gran río las dotaba de grandes ventajas. La principal, obviamente, era tener un abastecimiento de agua asegurado, algo que fue clave para el desarrollo de la agricultura y la ganadería tal como la conocemos en la actualidad. La segunda gran ventaja, fue el uso de los ríos como vías de comunicación lo que permitió el desarrollo de los intercambios comerciales entre diferentes culturas. Fueron todos esos factores los que hicieron que la humanidad aprendiera a convivir con este tipo de fenómenos naturales.

Poco a poco y con el avance de la ciencia, se fueron implementando métodos de prevención y gestión de las inundaciones, con el fin de evitar al máximo no solo la pérdida de vidas humanas, sino también pérdidas económicas en bienes materiales.

Según la *Directiva (2007/60/EC) del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*, define inundación como “el anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua” y como riesgo de inundación “ la combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el patrimonio cultural y la actividad económica” (artículo 2.1).

Esta misma *Directiva Europea de Inundaciones 2007/60/EC* resalta, que el impacto en la sociedad de este tipo de fenómeno natural se ha visto elevado gracias al gran desarrollo de las actividades humanas en zonas potencialmente inundables (márgenes de los ríos o sus llanuras de inundación), ya que en muchos casos la capacidad retentiva natural del suelo se ha visto alterada, con lo que la infiltración es menor dando lugar a más escorrentía superficial. Por ese motivo se aprobó, que todos los países europeos debían tener algún tipo de cartografía de áreas inundables (mapas de riesgo) para fomentar la práctica de acciones de ordenación del territorio con el fin de reducir el riesgo que traen las inundaciones.

Si miramos la historia más reciente, podemos ver como en los últimos 50 años han sido catalogadas multitud de inundaciones en partes muy diferentes del mundo, lo que hace pensar a los científicos que este tipo de fenómenos se están viendo aumentados más rápidamente que ningún otro desastre natural no solo por el factor del desarrollo humano (colonizando cada vez más zonas inundables), sino por un inminente cambio climático a escala global que podría cambiar el régimen de precipitaciones severamente, causando desastres aún mayores con el paso de los años.

Ya en el ámbito nacional, en España, las inundaciones y avenidas se consideran uno de los primeros riesgos naturales a tener en cuenta, esto es debido a que se dan ciertos factores determinantes:

- Nuestro país no tiene alto riesgo de otro tipo de fenómenos naturales, como pueden ser eventos volcánicos importantes (exceptuando los volcanes de las Islas Canarias) o zonas susceptibles a grandes terremotos (España se encuentra situada en una zona

tectónicamente estable, el máximo riesgo se encuentra en la zona sur o sur-este, regiones de Murcia, Almería o en la zona del estrecho con el Mar de Alborán).

- Si tiene grandes ríos que cruzan buena parte del territorio nacional e importantes ciudades, como son el Ebro, el Tajo o el Guadalquivir lo que da lugar a la formación de grandes cuencas fluviales.
- El clima variado de la península debido a su posición latitudinal, en el norte predomina el clima frío con frecuentes lluvias, en la vertiente mediterránea son más comunes las tormentas fuertes que dejan grandes caudales y en el sur predomina un clima más árido con pocas precipitaciones.
- El relieve tan diverso de la península, con grandes cordilleras como la Cantábrica, los Pirineos, la Ibérica, las Béticas y el Sistema Central que son capaces de dividir a España en regiones climáticas.

Tanto por las pérdidas económicas que originan como por el número de víctimas mortales que causan, la historia reciente de España está salpicada de sucesos relacionados con las inundaciones. Una de las que más destacan son las sufridas por el Levante en el año 1982.

Ocurrió en la madrugada del 20 de octubre, ese día se formó una célula convectiva de gran tamaño (CCM) que se instaló en la zona del levante (sobre todo en la Comunidad Valenciana y Región de Murcia) descargando grandes cantidades de lluvia. Estas precipitaciones afectaron a la cuenca del río Júcar (llegando a superar los 100mm en la mayor parte de la cuenca) e inundaron gran parte de la comarca de La Ribera, para terminar produciendo la rotura de la presa de Tous, que arrasó varios pueblos causando más de 30 víctimas mortales y daños materiales por valor de 1.800 millones de euros.



**Figura 1:** inundaciones en Alzira (izquierda) y Benegida (derecha) en octubre de 1982. (J.P Cerro Bermejo, Octubre 2006).

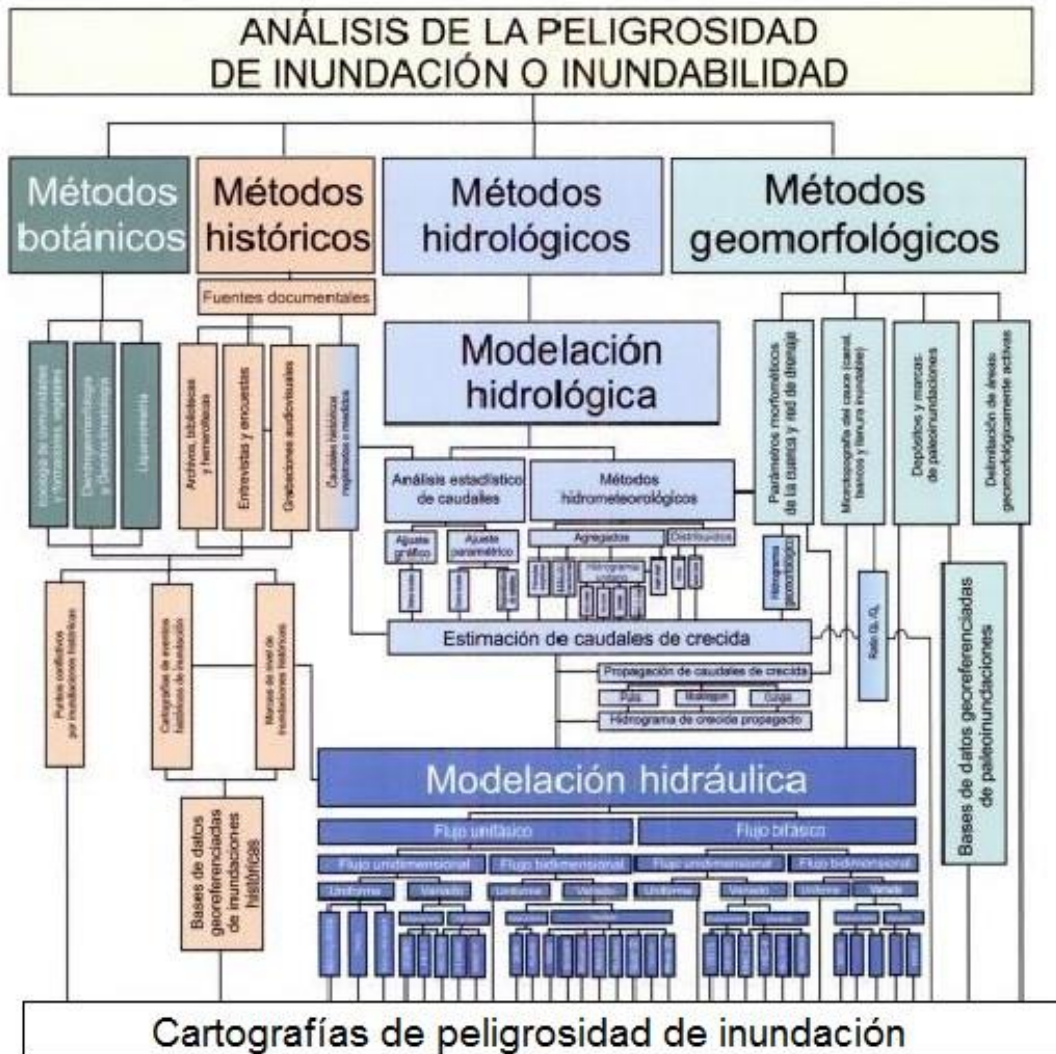
Para generar los mapas de riesgo de inundación que propone la *Directiva Europea 2007/60/EC* se deben manejar tres variables, el concepto es el siguiente:

## RIESGO = PELIGROSIDAD x VULNERABILIDAD x EXPOSICIÓN

La peligrosidad es la variable principal que nos ocupa este trabajo, y se realiza combinando diferentes métodos que se pueden agrupar en:

- **Métodos botánicos:** observando las comunidades o formaciones vegetales en zonas susceptibles a inundación se intenta reconstruir inundaciones pasadas, para poder predecir así avenidas futuras. Los métodos más usados son la dendrogeomorfología y la liquenometría, observando la morfología de los anillos de los árboles o sus troncos y como están desarrollados los líquenes, se pretende saber por dónde circulo el agua y que altura pudo alcanzar.
- **Métodos históricos:** trata de reunir la máxima información posible sobre posibles inundaciones pasadas en la zona de estudio, mediante por ejemplo la búsqueda de documentación que refleje menciones a inundaciones (en bibliotecas, hemerotecas, archivos), encuestas o entrevistas a la población del lugar u observando marcas de agua o placas en fachadas de edificios, puentes etc.
- **Métodos geomorfológicos:** se basan en el análisis del terreno que compone el área de estudio, tener en cuenta las formas geomorfológicas y las texturas del suelo es fundamental para predecir cómo se comportaría un flujo de agua en caso de inundación. Por lo tanto es fundamental delimitar bien todos los elementos que pueden componer o influir en el paisaje fluvial (abanicos aluviales, conos de vertientes, rambas, llanuras aluviales, terrazas etc..).
- **Métodos hidrológicos e hidráulicos:** son capaces de generar la estimación de los caudales generados en una cuenca o corriente y el cálculo de las velocidades y calados con los que circularán por un determinado tramo fluvial (*Díez-Herrero, et. al. 2008*).

Para hacer un buen análisis de la peligrosidad de inundación se deben aplicar todos estos métodos de forma integrada. Este trabajo fin de máster, como ya se ha mencionado, se centra sobre todo en los métodos hidrológicos e hidráulicos, aunque también se pretende aplicar métodos geomorfológicos complementarios para conocer el terreno (*Díez-Herrero, A.; Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008): Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración.*)



**Figura 2:** cuadro sinóptico de los principales grupos de métodos para el análisis de la peligrosidad de inundaciones y sus relaciones mutuas (Díez-Herrero 2008c).

Este trabajo fin de máster se enmarca dentro del convenio de prácticas existente entre la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), por tanto todos los materiales y datos de partida usados han sido suministrados por el IGME y sus diferentes sedes.

El proyecto dentro del cual se desarrolla este trabajo fin de máster se conoce con el nombre oficial de **“ESTUDIO CIENTÍFICO-TÉCNICO DE LAS INUNDACIONES EN EL PLÁ DE SANT JORDI (PALMA DE MALLORCA, ISLAS BALEARES, ESPAÑA)”**, como nombre extraoficial y a nivel de trabajo se le conoce como **“PROYECTO POSEIDÓN”**. Surge del convenio establecido entre el IGME y la Empresa Municipal de Aigües i Clavegueram S.A (EMAYA), que tiene las competencias de la captación, suministro, tratamiento y depuración del agua en el término municipal de Palma de Mallorca. De la colaboración de ambas partes se pretende obtener un estudio científico-técnico dirigido a la valoración de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi.

## **2. OBJETIVOS.**

El **objetivo general** de este trabajo fin de máster es hacer un estudio hidrológico e hidráulico de la zona de el Pla de Sant Jordi (Mallorca), para obtener una evaluación preliminar de aquellas zonas del territorio que tengan riesgo potencial de inundación o bien que la materialización de ese riesgo sea probable dentro de los términos indicados en la *Directiva Europea de Inundaciones 2007/60/EC*.

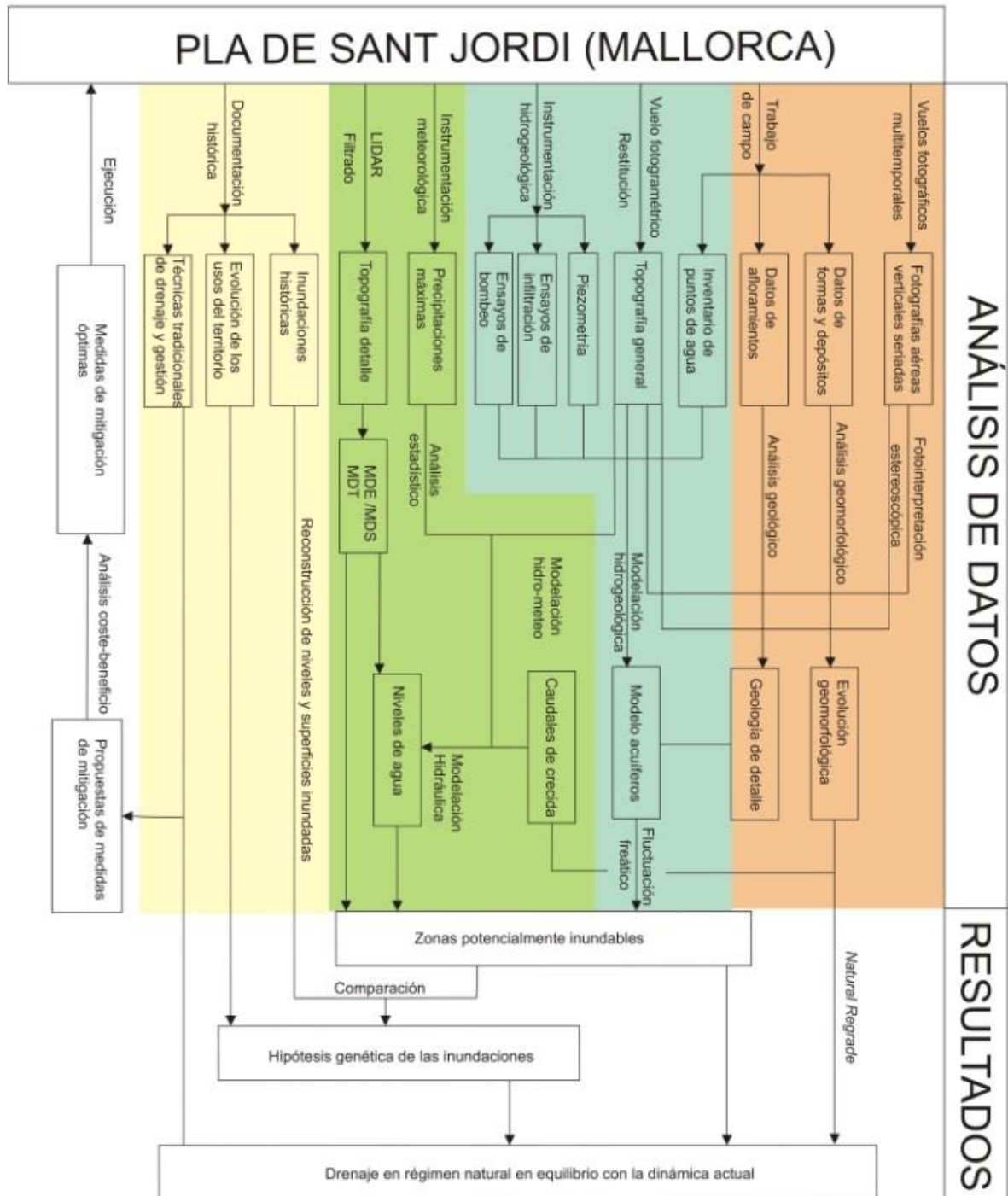
Mediante el uso de paquetes informáticos especializados en hidrología de superficie, se analizarán series de datos temporales de precipitaciones con el fin de obtener los caudales de la zona de interés. Una vez que tengamos los caudales, con tecnología *SIG* se implementaran todos los datos de la cuenca (caudal, pendiente, usos del suelo, geomorfología etc...) en capas, que después se usarán para ser introducidas en los softwares especiales de análisis hidráulico que finalmente nos darán simulaciones que muestren el comportamiento de la lámina de agua para diferentes periodos de retorno, pudiendo así identificar zonas potencialmente inundables.

Una vez presentado el objetivo general del estudio, los **objetivos específicos** del mismo son:

- Análisis estadístico de series de precipitaciones máximas diarias para nueve estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del Pla de Sant Jordi (los datos de estas series han sido proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET).
- Distribución en hietogramas tipo de las precipitaciones pertenecientes a eventos excepcionales significativos, producidos en los últimos 50 años para la zona del Pla de Sant Jordi.
- Obtención mediante tecnología *SIG* de las capas base “*geomorfología, pendiente y usos del suelo*”, para su posterior uso en los paquetes informáticos especializados en hidrología de superficie.
- Delimitación de sub-cuencas y puntos de drenaje que componen toda la cuenca del Pla de Sant Jordi mediante el software *HEC-GeoHMS*.
- Transformación de las precipitaciones de cada subcuenca en caudales base, mediante el método del hidrograma unitario (precipitación – escorrentía), usando el software *HEC-HMS*.
- Modelización de zonas inundables por el método del análisis unidimensional de cuencas, usando tecnología *SIG* y los softwares especializados *HEC-GeoRas* y *HEC-RAS*.
- Modelización de zonas inundables por el método del análisis bidimensional de cuencas, usando el programa de simulación hidráulica *IBER 2D*.

En el siguiente cuadro resumen podemos ver todas las fases del proyecto al completo, las cuales están clasificadas según cuatro colores. En este TFM nos centramos sobretudo en la

fase señalada con color verde “instrumentación meteorológica y filtrado LIDAR”, aunque también participa en la primera fase del proyecto, la que aparece señalada en naranja, ya que se han realizado trabajos iniciales de “fotointerpretación estereoscópica y análisis geológico y geomorfológico” (todo el trabajo se ha realizado en gabinete con imágenes y datos, no se ha podido viajar a la zona de estudio para realizar trabajo de campo).



**Figura 3:** cuadro resumen donde podemos ver todas las fases del proyecto al completo. Imagen cedida por el IGME procedente del plan de trabajo del Proyecto POSEIDÓN.

### **3. ANTECEDENTES.**

Durante el Cuaternario, la cuenca donde se sitúa el Pla de Sant Jordi sufrió varios movimientos tectónicos que la llevaron a tener su configuración actual. Analizando las series estratigráficas, se dedujo, que la línea de costa no siempre estuvo en la posición actual, si no que un brazo de mar entraba hacia dentro de la bahía (hay incluso escritos de marineros que relatan cómo desembarcaron bahía adentro). Posiblemente el zócalo de la isla estuviera más bajo, y debido a movimientos tectónicos se levantó dejando emergidas esas áreas y haciendo que la línea de costa retrocediera hasta la posición actual.

Después de esos movimientos, la zona paso a ser un humedal o marisma ya que aparte de los aportes de escorrentía superficial que le proporcionaban los torrentes, el mayor aporte provenía de aguas subterráneas. En la zona había bastantes acuíferos favorecidos por el origen calcáreo de las rocas (formaban karst y el agua se infiltraba fácilmente) y el nivel freático subió hasta aflorar en superficie y formar el humedal (Roselló I Verger, V. M. (1959): *El Prat de Sant Jordi y su desecación*).

Según fue aumentando la población, fueron aumentando los problemas, ya que el humedal era fuente de insalubridad y aún más cuando se dieron los primeros casos de malaria y paludismo. En 1814 se produjo una gran inundación que causo varias víctimas mortales y grandes pérdidas, fue entonces cuando se formó la *Comissió del Prat*, que impulso varias propuestas para desecar el Pla o al menos construir acequias que canalizaran el agua y reducir así la exposición y vulnerabilidad de la zona. Algunas de esas propuestas se recogen en comunicados oficiales como se puede observar en estos extractos del comunicado que hizo la *Comissió del Prat al Ayuntamiento (Rosello, 1959)*.

*«activar la formación de planes para desecar y poner en labor los terrenos fangosos e incultos del Prat del  
Término de esta Capital cuya utilidad es tan conocida, tanto por el aumento de la agricultura como para la conservación de la salud pública.. .»*

*«proyecto presentado por los propietarios de los terrenos del sitio llamado el Prat de San Jordi en la isla de Mallorca, proponiendo medios para llevar a ejecución el desagüe, desecación y cultivo de aquel término que se halla inundado de aguas estancadas, cuya corrupción produce gravísimas enfermedades a sus habitantes».*

**Texto:** extracto del comunicado que hizo la *Comissió del Prat al ayuntamiento (Rossello, 1959)*.

El proyecto final de desecación del Pla fue realizado y ejecutado por el ingeniero holandés Paul Bouvij, entre los años 1845 y 1849. Como solución a la falta de drenaje de la zona, Paul propuso un método por el cual mediante una serie de molinos de viento situados estratégicamente en zonas potencialmente inundables se extraía el agua que después era vertida a una red de canales y acequias previamente diseñadas. Todas estas canalizaciones eran dirigidas a la zona más baja del Pla, es decir, el punto de drenaje de la cuenca, que se situaba en la playa de *El Arenal*. Con esta actuación se pretendía desecar el Pla en su mayor parte y poder así aprovechar esa zona fértil para la planta de cultivos, cereales en su mayor parte.



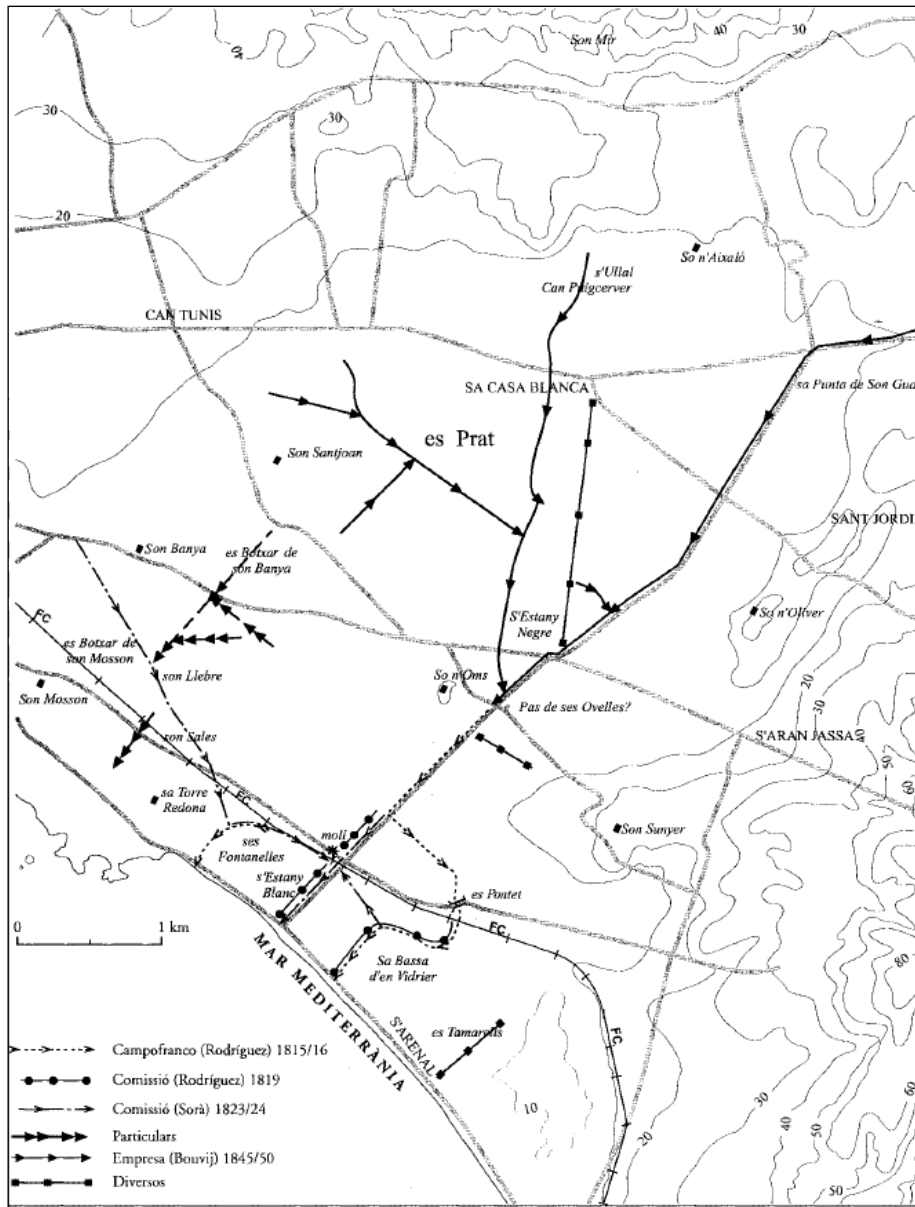
**Figura 4:** antiguos molinos de viento en el Pla, diseñados por el ingeniero Paul Bouvij. Imagen cedida por el IGME.

Como se ha dicho en el párrafo anterior, muchos de los canales y acequias a los cuales se vertían las aguas bombeadas ya estaban antes del proyecto de Paul Bouvij, ya que las diferentes *comisiones del Prat* llevaban años construyéndolos. El ingeniero holandés los rediseñó e incluyó muchas nuevas acequias, que permitieron una evacuación del agua más eficiente. La acequia maestra era capaz de desaguar caudales de hasta 3,5 m<sup>3</sup>/seg.

El proyecto de Paul Bouvij era el único viable, ya que las especiales condiciones de los terrenos del Pla (su topografía especialmente) no dejaban casi opción a otras alternativas. En los primeros momentos de su puesta en funcionamiento, los molinos de viento funcionando como bombas hidráulicas y las acequias, desgüaban bastante bien la zona. El proyecto parecía ser un éxito. Pero con el paso del tiempo su eficacia fue disminuyendo debida principalmente al abandono y poco mantenimiento de las acequias (Roselló I Verger, V. M. (1959): *El Prat de Sant Jordi y su desecación*).

En los bordes crecían hierbas y arbustos que no eran controlados por nadie, y esto atraía al ganado de la zona, los rebaños comían esas hierbas que crecían en las zonas cercanas a las canalizaciones, causando destrozos en estas, ya que las atravesaban haciendo desmoronarse a los taludes y removiendo el fondo. Los rebaños de ganado no eran el principal problema, el gran obstáculo se daba en la acequia principal (la que más agua llevaba) ya que cerca de su desembocadura se formaba una barra de arenas que reducía mucho el potencial de desagüe. Esa zona debía drenarse de arenas periódicamente, pero la mala ejecución del mantenimiento de las acequias impedían un funcionamiento satisfactorio de estas, provocando algunas inundaciones en zonas cercanas a ese punto.

Poco a poco todas esas acequias fueron revestidas (antes muchas de ellas estaba simplemente excavadas en la tierra) y se prestó más atención a su limpieza y mantenimiento. Finalmente, el nivel freático de los acuíferos que afloraban en superficie fue bajando, y la zona dejó de ser pantanosa para pasar a ser una zona fértil de cultivos.



**Figura 5:** fases de construcción de las acequias del Pla de Sant Jordi (Rosselló y Verguer, 1959).

Cuando la zona estuvo lo suficientemente seca como para poder cultivar, los molinos siguieron bombeando el agua ya que ahora era necesaria para regar esos nuevos campos de cultivos. Esta actividad local de regadío permite el control del nivel freático del acuífero, lo que a su vez permite la construcción de nuevas infraestructuras en la zona. Las acequias desaguaban el sobrante de aguas de regadío y la escorrentía que se producía cuando había tormentas.

Esta extracción masiva y sin control de aguas subterráneas iba a tener una consecuencia a largo plazo, debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos del acuífero se produce una intrusión marina. A medida que bajaba el nivel freático del acuífero, el mar fue ganando terreno hacia tierra y las aguas dulces del acuífero fueron contaminadas con agua salada marina.

En la década de los 90, se produce un cambio importante en el uso de los recursos hídricos de la zona, ya que el ayuntamiento de Palma y la empresa de aguas de Palma EMAYA empiezan a “regalar” (no tienen ningún coste) aguas residuales depuradas a los agricultores de la zona, que las usan para regadío de sus cultivos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales son EDAR-Palma I y EDAR-Palma II, las cuales son capaces de depurar entre 80.000-90.000 m<sup>3</sup>/día. Las aguas usas los agricultores se almacenan en una gran balsa situada en la zona NO del Pla.



**Figura 6:** imágenes de la central depuradora EDAR – Palma I y II afectadas por inundaciones. Se puede ver la balsa donde se acumulan las aguas que usan los agricultores para regar sus cultivos. Imágenes cedidas por el IGME.

La consecuencia directa de la reducción del bombeo de aguas del acuífero, es lógicamente la subida del nivel freático de éste y por lo tanto empiezan a proliferar las zonas inundables en el Pla.

Se han realizado numerosos estudios sobre la situación de la zona, los antecedentes técnicos más destacados son:

- EMAYA (Empresa Municipal d’Aigües i Clavegueram) 2012. **Estudio hidrológico de la cuenca del Pla del Sant Jordi.** Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio. Servicio Hidráulico. 1987. **Hidrogeología de la Isla de Mallorca.**
- *Vicenç M. Roselló i Verguer, 1959.* Boletín de la cámara de comercio, industria y navegación de Palma de Mallorca. ***El Prat de Sant Jordi i la seva dessecació.***

Como propuestas de solución a la problemática de inundaciones existente destacan:

- **Estudio de soluciones para el drenaje del tramo final del Torrent de Sa Siquia en la playa de Palma.** Septiembre 2007. ESTIU (Estudio de ingeniería y urbanismo).
- **Drenaje del Pla de Sant Jordi (Palma de Mallorca).** Septiembre 1996. Andrés de la O i Ignacio Gil. Ministerio de Agricultura i Conselleria d’Agricultura.

#### **4. ÁREA DE ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Las Islas Baleares se encuentran situadas en el extremo occidental del Mar Mediterráneo, muy cercanas a las costas levantinas de la península ibérica. Se trata de un archipiélago formado por cinco islas principales y numerosos islotes, estas son: Mallorca, Menorca, La Cabrera, Ibiza y Formentera. La superficie de la isla de Mallorca es de unos 3630 km<sup>2</sup>.

El archipiélago Balear se sitúa geográficamente entre los paralelos 38 y 41 al norte del Ecuador y los meridianos 1 y 5 de Greenwich. Sus coordenadas geográficas son:

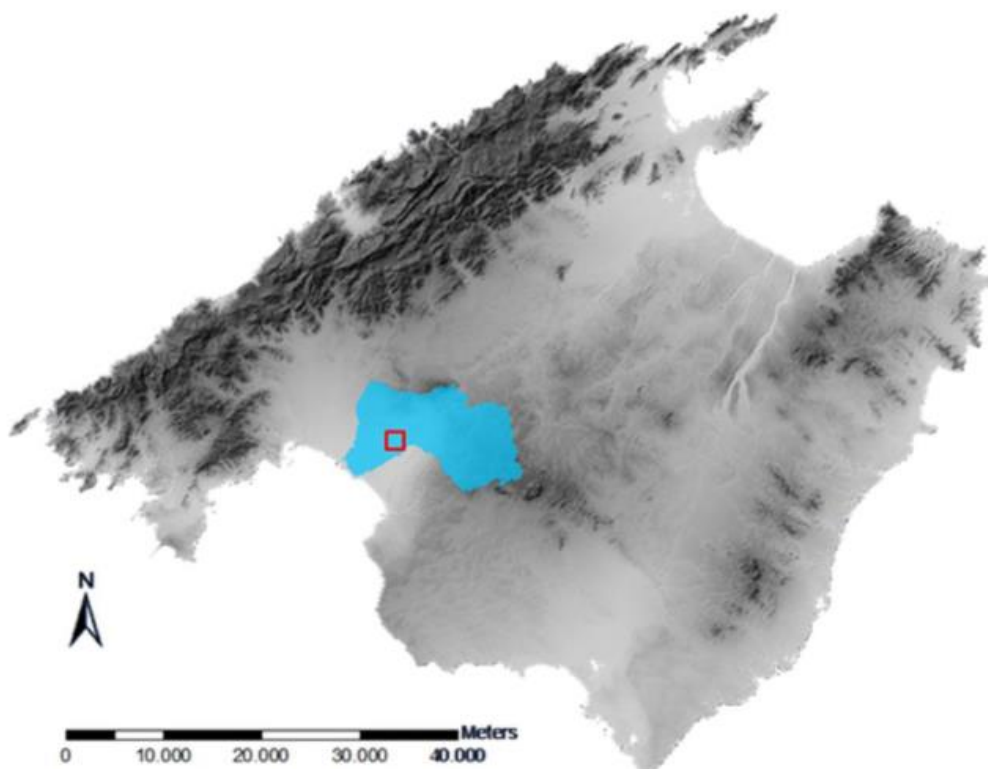
$$(39^{\circ} 15'N \text{ y } 40^{\circ} 00'N) - (2^{\circ} 15'E \text{ y } 3^{\circ} 30'E)$$



**Figura 7:** imagen de satélite de la Isla de Mallorca. La zona de estudio Pla de Sant Jordi aparece encuadrada en rojo. Imágenes obtenidas por google earth y google maps.

Nuestro estudio se centra en la parte SO de la Isla de Mallorca, donde se encuentra una zona conocida como el Pla de Sant Jordi. Se trata de una zona endorreica y muy llana (la topografía apenas supera los 8-10 m s.n.m.), de unos 350 km<sup>2</sup> de superficie (aunque nuestro estudio solo se centrará en unos 40 km<sup>2</sup> ya que son los que suelen presentar fenómenos de inundación). El drenaje natural de toda la cuenca se produce a través del Torrent Gros al mar Mediterráneo (en el límite occidental), mientras que la mitad oriental drena por una acequia artificial, Sa Siquia.

La zona se sitúa muy cerca de la ciudad de Palma y está circundada por una línea de colinas en el N y NE, la línea de costa en el sur y antiguos cordones litorales de dunas. Tiene una especial importancia debido a que en ella se sitúan el principal aeropuerto de la isla (Son Sant Joan), la mayor zona de cultivos de la isla y grandes complejos turísticos.



**Figura 8:** imagen de satélite de la Isla de Mallorca. La zona azul indica la cuenca hidrológica completa del Pla de Sant Jordi, mientras que el recuadro rojo señala la zona donde se producen los mayores problemas de inundaciones (zonas cercanas al aeropuerto de Son Sant Joan).

*Imagen propia.*

#### 4.1 Contexto fisiográfico y medio humano.

En este sub-apartado se describen los principales componentes fisiográficos y humanos de la zona. En la parte dedicada a la fisiografía, se prestará especial atención al contexto geológico y geomorfológico del área de estudio, aunque también se incluyen breves descripciones del clima y la vegetación, ya que son dos condicionantes muy relevantes para el análisis de inundaciones. La parte dedicada al medio humano, se centra en la evolución que han sufrido los usos del suelo en el Pla de Sant Jordi.

##### ➤ **Contexto geológico:**

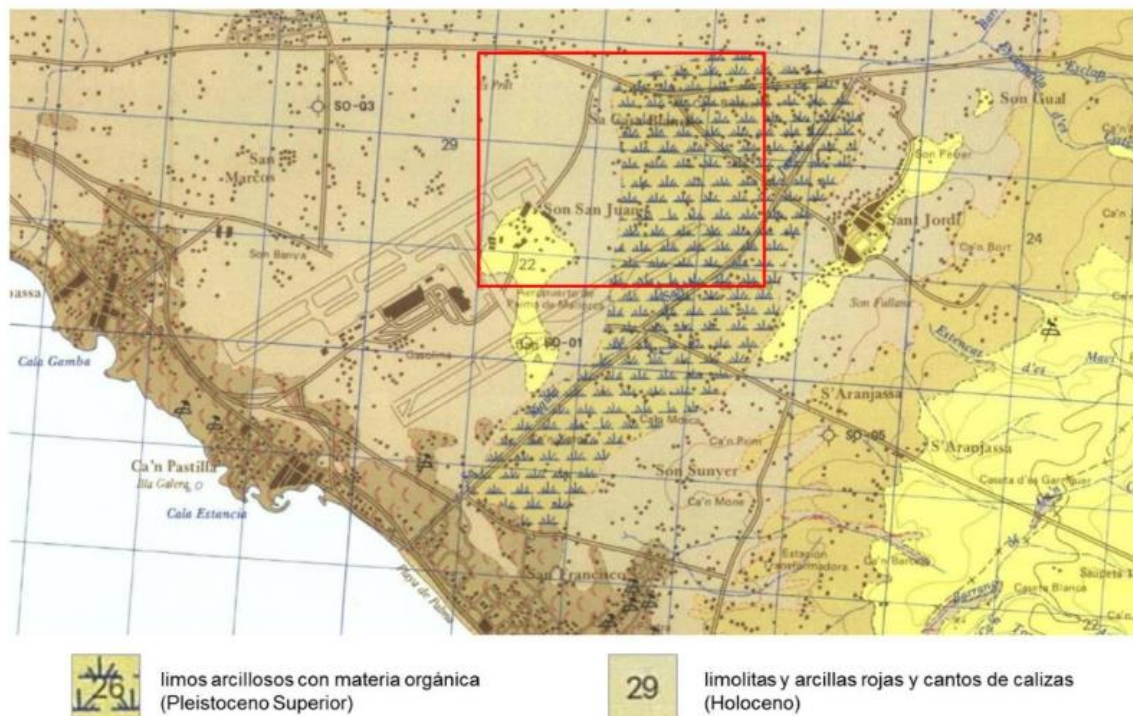
Estructuralmente, el archipiélago Balear se formó por la orogenia Alpina, donde se da el choque entre la placa Africana y la Euroasiática produciendo el plegamiento de materiales que dan lugar a la Béticas. Las islas constituyen la prolongación hacia el NE de la cordillera Bética, algo fácil de intuir ya que el archipiélago Balear coincide en dirección y buzamiento en la mayoría de sus plegamientos o cabalgamientos con las Béticas y ambos están formados por materiales de la misma edad y composición parecida.

En la Isla de Mallorca afloran materiales que tienen una serie estratigráfica compleja, que van desde el paleozoico hasta el cuaternario. En el Paleozoico predominan materiales detríticos, pasando a un Mesozoico fundamentalmente arenoso-arcilloso (Trías) que va cambiando a ser

más calco-dolomítico (Jurásico) para finalizar siendo margo-arcilloso en el (Cretácico). El Terciario y el Cuaternario presentan series más complejas con bastante variabilidad de facies de borde a centro de la cuenca, pero por lo general dominan materiales arenoso-arcillosos.

Si nos centramos en la zona de estudio, el Pla de Sant Jordi (también conocido como Llano de Palma) podemos ver que se trata de una cubeta de subsidencia (graben) bien delimitada por fracturas y rellenada por materiales post-orogénicos que van desde el Serravaliense hasta la actualidad, con espesores que pueden alcanzar los 450 metros. Las litologías que se encuentran son todas de origen sedimentario y de variadas texturas: conglomerados, gravas, arenas, limos, arcillas, margas, calizas y dolomías, calcarenitas etc. (*Instituto Geológico y Minero de España., (1991), Memoria mapa Palma (I. del Toro y Cap de cala Figuera), Escala 1:50000*).

En el siguiente mapa geológico podemos ver las litologías que componen la zona donde se dan los mayores problemas de inundación (cerca de las pistas del aeropuerto). En su mayoría son limos arcillosos con materia orgánica y limolitas, arcillas rojas y cantos de caliza

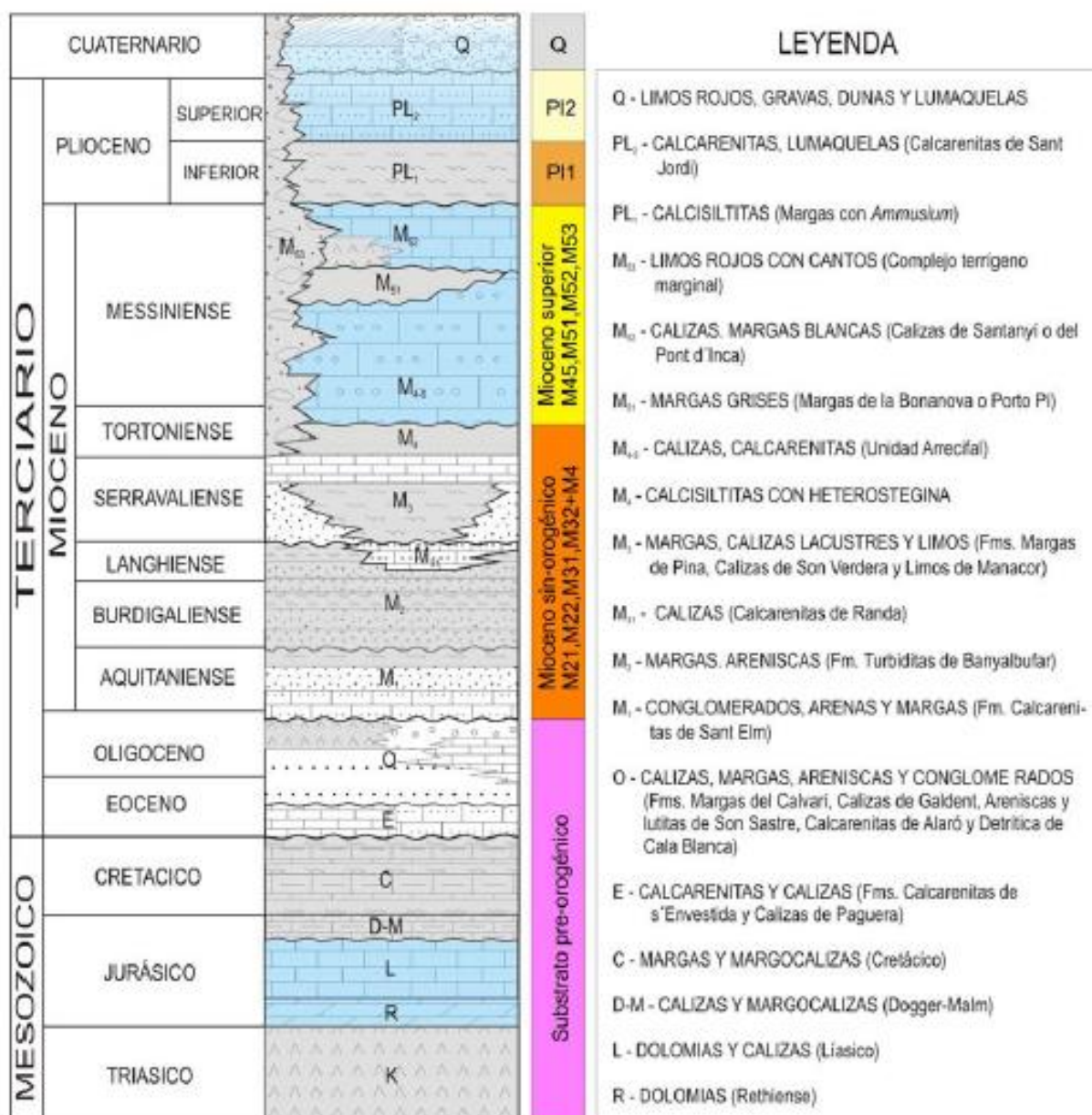


**Figura 9:** extracto del mapa geológico de España, hoja 698 Palma. Escala 1:50000. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

En el siguiente mapa se muestra la geología de la zona con los materiales clasificados por su edad en vez de por su litología. También se delimita la zona donde se encuentran las aguas subterráneas o acuíferos y se sitúan los números sondeos y cortes geológicos realizados.



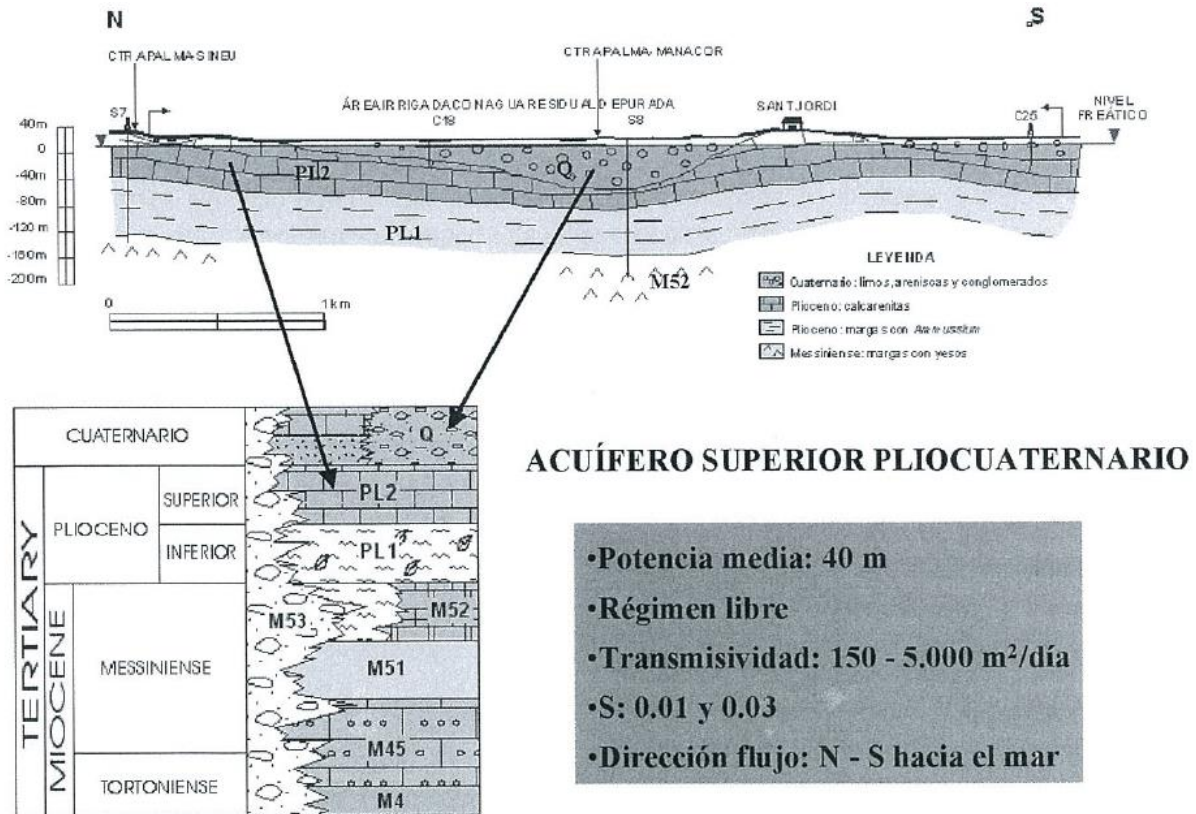
## SERIE ESTRATIGRAFICA TIPO DEL LLANO DE PALMA



**Figura 11:** Columna estratigráfica correspondiente a las unidades del Llano del Palma (López-García, 2003).

En la figura superior podemos ver toda la serie estratigráfica que compone el Llano de Palma o Pla de Sant Jordi. Vemos el sustrato pre-orogénico y el relleno post-orogénico. En azul aparecen las principales unidades que funcionan como acuíferos y en gris las unidades impermeables, que siempre aparecen sellando dichos acuíferos.

Como se ha adelantado en el párrafo anterior, la característica geológica más importante de la unidad del Llano de Palma es que tiene dos acuíferos identificados. Uno superficial formado por materiales de edad Pliocuaternaria y otro más profundo, de edad aproximada Mioceno superior. Únicamente se explota el acuífero superior, constituido por materiales calcareníticos del Plioceno, limos, arenas eólicas y gravas cuaternarias. El acuífero inferior no se explota debido a que los materiales miocenos que lo componen tienen varios cambios de facies laterales a materiales de margas y yesos (López-García, 2003, pág.86).



**Figura 12:** corte hidrogeológico de los acuíferos del Pla de Sant Jordi (Llano de Palma) y columna estratigráfica (López-García, 2003).

➤ **Contexto geomorfológico:**

Las formas geomorfológicas que más destacan en el Pla son aquellas que corresponden a materiales sedimentados recientes (con recientes nos referimos desde principios del Cuaternario hasta hoy en día).

Los torrentes son formas típicas del paisaje insular. Se debe destacar que Mallorca no tiene una red hidrográfica constante (no tiene apenas ríos que lleven agua permanentemente) debido fundamentalmente a dos factores: el tipo de litología predominante calcárea que favorece la infiltración impidiendo la circulación de escorrentía superficial y la distribución irregular de sus precipitaciones por toda la isla. Esto hace que se preste especial atención a los torrentes, ya que su estado puede determinar si una zona se inunda o no.

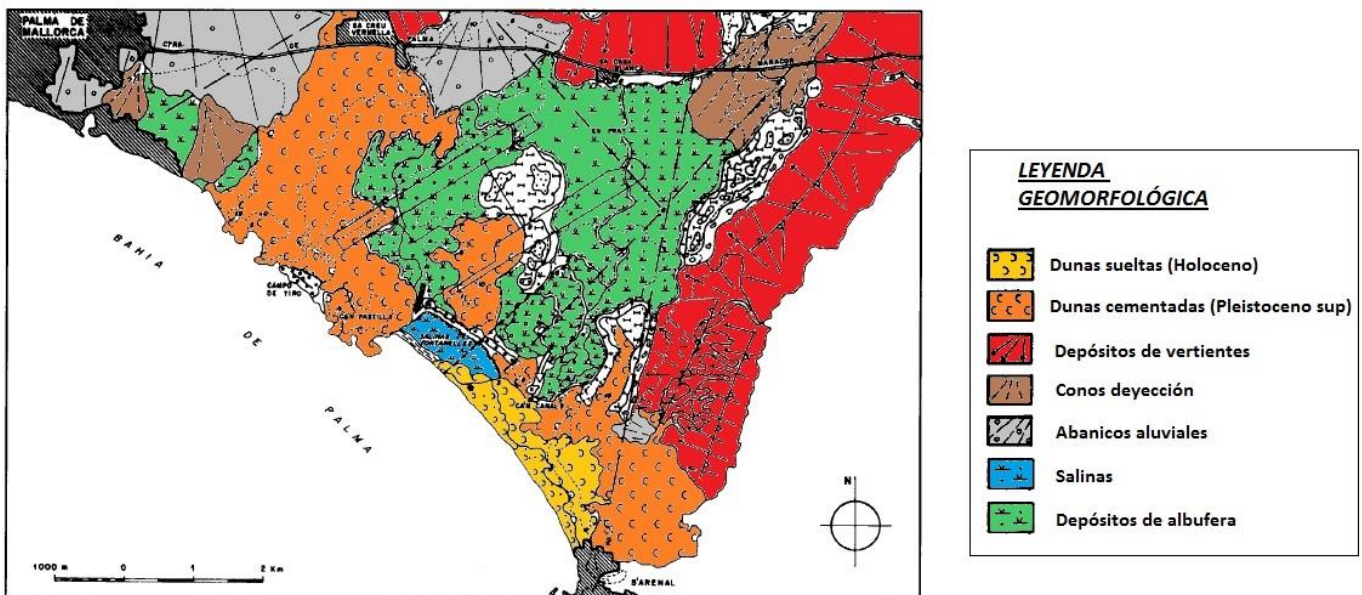
Los depósitos más actuales son por tanto, todos los sedimentos que pueden ser arrastrados por los flujos de aguas ligados a lluvias torrenciales, capaces de desbordar el cauce del torrente o riachuelo por donde circulan y dejando sedimentados como un manto compuesto por texturas que van de finos a gruesos

(dependiendo la intensidad de la corriente): arcillas, margas, limos, arenas, gravas, cantos rodados y bolos etc...

Cuando estos depósitos se producen al pie de una ladera, dan formas como pueden ser los depósitos de vertientes, conos de deyección o abanicos aluviales si llega mucho aporte de material de los torrentes. En general todos ellos están formados por materiales heterogéneos siempre ligados a la naturaleza de la roca madre aguas arriba, y de tamaños variables.

Otra forma geomorfológica bastante típica del llano son las dunas. Se encuentran principalmente en la zona de la playa de El Arenal, son depósitos de dunas eólicas algunas ya bastante consolidadas y otras aún en proceso de cementación, no tienen gran espesor y están bastante mezcladas con el Cuaternario. Su composición es básicamente arenas bien seleccionadas (Goy et. al., 1997).

El resto de formas corresponden a depósitos lagunares que han rellenado depresiones dando lugar a albuferas y zonas más pantanosas, llegando a formar incluso zonas salinas. La única salina activa que queda actualmente se sitúa cercana a la playa de El Arenal, entre los cordones de dunas, son las Salinas de Fontanielles. En el siguiente mapa podemos ver coloreadas las principales formas de la zona:



**Figura 13:** Mapa geomorfológico de la zona de Pla de Sant Jordi (Goy et. al., 1997) modificación propia.

#### ➤ **Contexto climático y medio vegetal:**

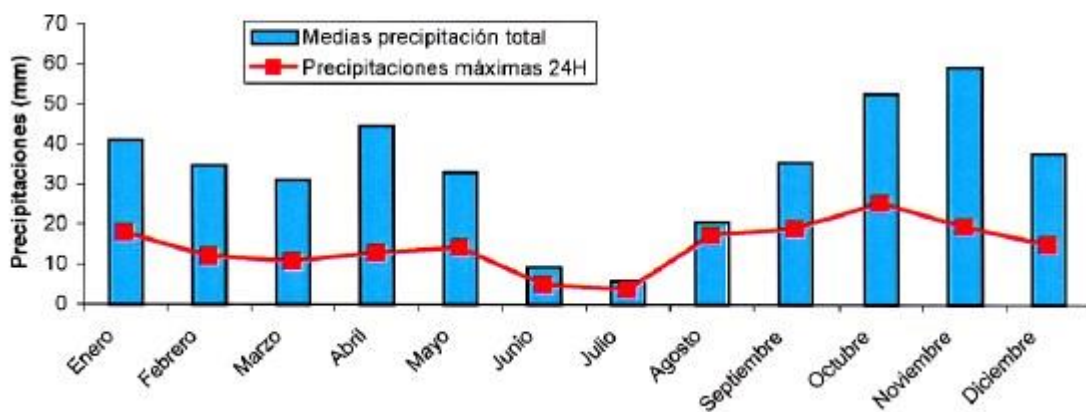
El clima predominante en toda la isla de Mallorca es el mediterráneo, al igual que en toda la vertiente levantina de la península Ibérica. Se trata de un clima templado, donde los inviernos no alcanzan valores extremos de frío y suelen ser lluviosos, mientras que los veranos son bastante calurosos y secos (por encima de los 30°C).

En el caso de Mallorca, las precipitaciones se suelen dar en forma líquida (aunque a veces nieve) y sus valores máximos se suelen registrar en los meses de otoño (octubre-noviembre) pudiéndose recoger casi el 40% del total anual, y los mínimos en los meses de verano (julio y agosto). Estas precipitaciones difieren

según el lugar de la isla donde caen, ya que presentan variabilidad estacional y territorial. Esta última característica es muy marcada en Mallorca, ya que existe un incremento de la aridez de norte a sur. En la zona NO de la isla, por ejemplo, se sitúa la Sierra de Tramontana donde se pueden llegar a registrar valores de 1500mm de precipitación. Los valores normales para todo el territorio están entre los 450mm y 650mm anuales. El régimen de precipitaciones se caracteriza por su irregularidad, siendo muy típicas las tormentas o aguaceros intensos y de corta duración que dejan grandes cantidades de lluvia, lo que puede llegar a causar avenidas o inundaciones (BOE núm. 221 de 14 de Septiembre de 2001., Plan Director del Aeropuerto de Mallorca).

En el siguiente gráfico se muestran los valores medios de precipitación para Palma en un periodo de 30 años, aunque el periodo de tiempo esta desactualizado, el grafico sirve para hacerse una idea de la tendencia general que registran las precipitaciones en la isla. Podemos ver el pico de precipitaciones en los meses de octubre-noviembre y los mínimos en los meses de verano.

**Valores medios de precipitación en Palma (1980 - 2010).**

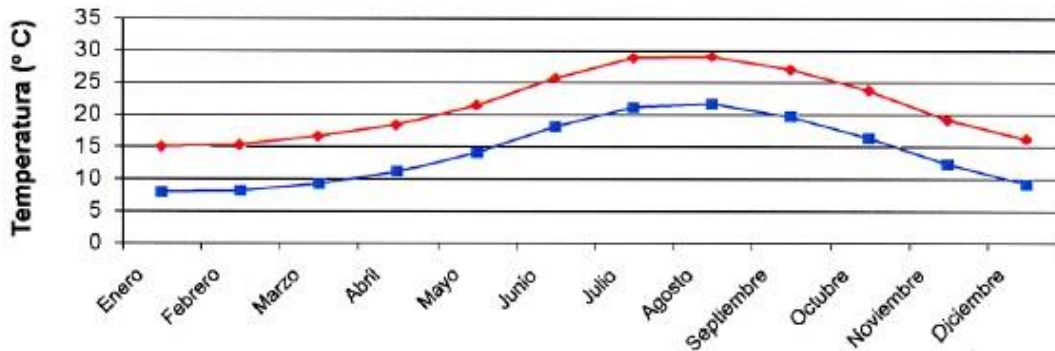


**Figura 14:** gráfico representativo de los valores medios de precipitación en Palma. (Plan Director del aeropuerto de Palma de Mallorca, 2001).

Las temperaturas medias anuales están entre los 16º-18ºC, menos en las zonas de alta montaña que suelen ser menores. Estas temperaturas están influenciadas por la proximidad al mar, que ejerce de regulador natural, de ahí que otras zonas del interior del continente con igual latitud no gocen de un clima templado como en Mallorca.

De nuevo en la temperatura se nota un carácter estacional, las diferencias entre veranos e inviernos están bien marcadas. En el siguiente gráfico podemos ver un resumen de las temperaturas medias mensuales máximas y mínimas, dando el pico en los meses de verano julio y agosto y el mínimo en invierno (BOE núm. 221 de 14 de Septiembre de 2001., Plan Director del Aeropuerto de Mallorca).

**Temperaturas medias mensuales máximas y mínimas  
(periodo 1980 - 2010).**



**Figura 15:** gráfico representativo de los valores medios de temperaturas en Palma. (Plan Director del aeropuerto de Palma de Mallorca, 2001).

La vegetación de la isla de nuevo es típicamente mediterránea, condicionada por el clima templado y periodos de bastante aridez en verano, y a la vez la insularidad que genera endemismos (algo muy típico en todas las islas).

Predominan especies mediterráneas: pinos, encinas y matorrales de monte bajo. Según el nivel de humedad del terreno y la temperatura, las podemos encontrar en:

- **Pinares:** se extienden por toda la isla (es la especie más abundante), se concentran más en los lugares secos o colonizando antiguos encinares deforestados por el hombre.
- **Encinas:** son capaces de formar grandes bosques, se concentran en zonas más bien húmedas y frescas sobretodo en la zona de la Sierra de Tramontana.
- **Matorral de monte bajo:** hay muchas especies de matorral (acebuche, jara, lavanda, carrizo, lentisco etc..) y se encuentran más en zonas secas y bajas.

La característica más destacable que tienen todas las comunidades vegetales de la isla es la capacidad de aprovechar al máximo el agua, han desarrollado mecanismos de retención o almacenamiento de agua como raíces profundas por ejemplo, para los periodos de verano donde se pueden dar condiciones de extrema aridez.

➤ **Contexto humano:**

La isla de Mallorca es la más grande de todo el archipiélago balear y también una de las más grandes del Mediterráneo (las más grandes son: Cerdeña, Sicilia, Chipre y Córcega). Es por tanto la que mayor población tiene, según los últimos censos se estima que hay casi 1 millón de habitantes que residen en ella de forma "estable", aunque durante el año puede llegar a recibir casi 12 millones de turistas que pasan periodos vacaciones, sobre todo en los meses de verano.

La industria nunca ha sido el sector económico de primer orden, la muestra es que históricamente la población de la isla paso de ser una población basada en una economía rural (fundamentada en el cultivo de tierras de regadío) a ser una sociedad de servicios, que vive acosta del turismo.

Durante los últimos 50 años, casi todo el crecimiento económico de Mallorca se ha basado en el turismo y en lo que este conlleva, el boom de la construcción ha sido muy acentuado creándose grandes complejos hoteleros y de ocio que han ido alterando y degradando el paisaje natural, comiendo terreno a la agricultura y ganadería tradicional. Esta disminución de la producción agrícola y alimentaria ha hecho que casi toda la población de la isla dependa ahora de los aportes exteriores, mercancías que son transportadas por vía marítima y cuya mayoría recibe el puerto de Palma.

Este aumento de las actividades turísticas afectan directamente al uso del suelo, en las zonas donde a principio de siglo había campos de cultivo ahora emergen complejos hoteleros (en los años 50 la producción agrícola llegó a suponer casi un 35% del PIB de Mallorca, ahora no alcanza el 4%). En definitiva, todo esto se traduce en un cambio drástico del uso del suelo, con un aumento de la cubierta artificial muy notable que afecta directamente al problema de las inundaciones. En el caso del Pla de Sant Jordi, se puede decir que en él se concentran hoy en día las últimas zonas de cultivo agrícola que quedan en la isla, siendo en su mayor parte cultivos de regadío (alfalfa y cereales) o pequeñas explotaciones familiares de frutales.

La desertización se ha convertido en un grave problema consecuencia de la pérdida de suelo fértil y algunas acciones del hombre están contribuyendo a que este fenómeno se acelere, como son: terrenos abandonados, escombreras, incendios forestales provocados por descuidos, pastoreo intensivo etc. Todos esos factores han colocado a la isla y al archipiélago en general como la tercera comunidad autónoma con mayor riesgo de erosión extrema ([www.pocapoc.org](http://www.pocapoc.org), (2008), *Mallorca despierta 2015*).

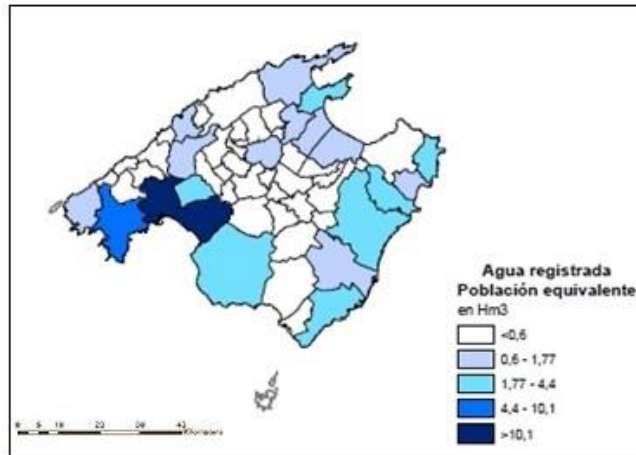
El uso de los recursos hídricos también ha llegado a ser un problema en la isla. Como se ha mencionado anteriormente, Mallorca no cuenta con ríos permanentes, por tanto los recursos hídricos que usa la población provienen en su mayoría de acuíferos de aguas subterráneas o embalses.

Según la *Dirección General de Recursos Hídricos de Mallorca*, el sector agrario (agricultura y ganadería) es el mayor demandante de agua con 59% del total. El uso urbano demanda un 40% del total y por último está el sector industrial con una demanda del 1%. Si estos valores los representamos en hectómetros cúbicos, tenemos que la isla de Mallorca consume unos 205 hm<sup>3</sup>/año y sus usos:

USOS	Hm <sup>3</sup>
<b>Usos urbanos</b>	83
<b>Industria</b>	2.5
<b>Agricultura</b>	85.1
<b>Ganadería</b>	5.3
<b>Agro jardinería</b>	29
<b>TOTAL</b>	<b>205</b>

**Figura 16:** Tabla de usos del agua por hm<sup>3</sup>/año en la Isla de Mallorca (*Dirección General de Recursos Hídricos de Mallorca*, (2012), *Plan de Gestión del Agua en las Islas Baleares*).

En el siguiente mapa se muestra la distribución territorial del agua para usos urbanos (población equivalente) para la isla de Mallorca.



**Figura 17:** Distribución territorial del agua. (Plan Director del aeropuerto de Palma de Mallorca, 2001).

Como se puede ver, el mayor gasto de agua corresponde a la zona de la bahía de Palma donde se concentra la mayor parte de la población estable y la zona de cultivos de regadío del Pla de Sant Jordi.

#### 4.2 Planteamiento del problema:

El Pla de Sant Jordi está sometido a episodios de inundaciones periódicas por dos causas principales; una es la subida del nivel freático de los acuíferos al dejar de ser explotados para los cultivos de regadío, y otra son los episodios de lluvias torrenciales que se dan en la isla, ya que el Pla esta circundado por vertientes con numerosos torrentes que desaguan en el Pla.

Dependiendo del año, estas inundaciones son más o menos acusadas, pero en todo caso siempre son un problema para la población de la zona que tiene que convivir con ellas.

**Las inundaciones de los campos de cultivo del Pla** es la principal causa de queja por parte de los agricultores de la zona, ya que las pérdidas económicas que producen son cuantiosas. El anegamiento de sus campos de cultivo una y otra vez hace casi imposible la práctica de la agricultura y el sector reclama indemnizaciones y soluciones al gobierno de Mallorca continuamente. El problema viene de largo, ya que en el siglo XIX toda esta zona fue desecada y ganada al mar para aumentar la superficie de cultivos de la isla (este proceso de desecación fue ejecutado por el ingeniero holandés Paul Bouvij), su potencial fue tal, que llegó a conocerse como “la despensa de Palma”.



**Figura 18:** Campos de cultivos del Pla inundados. Imagen cedida por el IGME.

No solo la pérdida de cultivos preocupa a la población del Pla, de las inundaciones derivan cuestiones de salubridad que afectan directamente a la vida diaria de los vecinos. Cada primavera, se producen **importantes plagas de mosquitos** debido a las aguas estancadas y cada año están siendo más acentuadas. De nuevo, este problema, no pilla de sorpresa a los habitantes de la zona, ya que el proyecto de desecación del Pla del siglo XIX, también perseguía acabar con las aguas estancadas y los mosquitos que extendían las epidemias de malaria.

Son frecuentes las protestas, denuncias y concentraciones por parte de las asociaciones de vecinos exigiendo al ayuntamiento y al gobierno de Mallorca soluciones definitivas a este problema de salud pública que pone en peligro no solo a la población, sino también al ganado, ya que estas plagas suelen ser foco de enfermedades que se ceban él (en especial el ganado equino que predomina en la isla).



*Figura 19: concentración por parte de los vecinos del distrito de San Jordi contra las plagas de mosquitos y el estancamiento de aguas en la zona (UH Noticias Local, 2010).*

Las inundaciones no afectan solo a los campos de cultivos y a los habitantes del Pla, también están empezando a afectar al turismo que viene o reside en la isla, ya que **muchas de las áreas urbanizadas cercanas al Pla se inundan frecuentemente.**

El Pla está abierto al mar por su vertiente sur, donde se encuentra la Playa de Palma o El Arenal de Palma. La playa se sitúa dentro de la localidad de Can Pastilla (una barriada de Palma que comenzó a formarse sobre los años 20). Se trata de una de las playas más grandes de toda la isla y su proximidad a la ciudad de Palma hizo que el sector turístico se desarrollara mucho en la segunda mitad del siglo XX.

Este desarrollo trajo consigo la construcción de grandes complejos hoteleros y la proliferación de segundas residencias en la zona, que justamente fueron edificadas sobre el antiguo cordón de dunas que separaba el mar de la antigua albufera o marisma. La consecuencia directa de esto fue que se cambiaron los drenajes naturales del suelo, se impermeabilizaron zonas al ser asfaltadas y por lo tanto el terreno ya no tenía la misma capacidad de infiltración, aumentando así la escorrentía superficial.

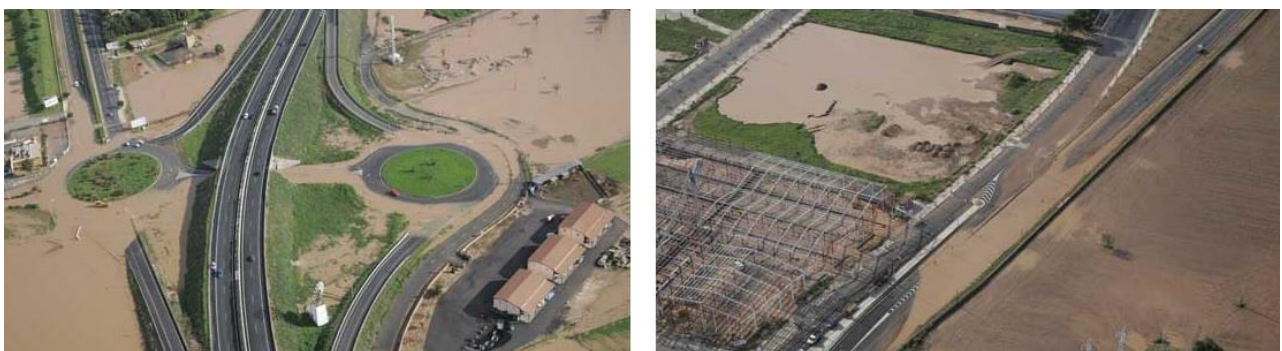


**Figura 20:** Fotos de la zona de Can Pastilla, el antes y el después del boom turístico. Imágenes cedidas por el IGME.

**Las infraestructuras lineales que cruzan el Pla y el aeropuerto** son dos zonas afectadas por las inundaciones que preocupan especialmente al gobierno balear, ya que en estos dos casos, se está poniendo en peligro directo la vida de muchas personas.

Las localidades del Pla estaban comunicadas tradicionalmente con la ciudad de Palma por múltiples carreteras, dos de ellas, la Ma-15 o Carretera de Manacor (antigua C-715) y la PMV-3011 o Carretera Vella de Sineu, dividían el Pla al atravesarlo por completo de este a oeste. Estas carreteras ya interferían en el drenaje natural de la zona y los problemas se agravaron cuando debido al aumento del turismo en la isla (y por tanto la afluencia de tráfico) se planteó la construcción de una autopista para desahogar su tránsito. En 1969 se inauguró **la nueva Autovía del Levante Ma-19**, que seguía la misma línea que las otras dos carreteras (de nuevo cruzaba el Pla transversalmente) pero con el inconveniente añadido de que se situaba mucho más cerca de la zona de desagüe natural del Pla, justo a la espalda del cordón de dunas.

Aunque la obra se planificó con numerosos drenajes artificiales que transcurrían transversalmente a la vía, los episodios de inundación han sido frecuentes desde entonces, lo cual deja claro que son insuficientes para los caudales que puede llegar a generar el Pla. Las zonas de vía anegadas por el agua son un peligro para la conducción y en algunas ocasiones la autovía ha tenido que ser cortada al tráfico en alguno de sus tramos.



**Figura 21:** Tramos de la Autovía del Levante Ma-19 anegados por el agua. Imágenes cedidas por el IGME.

**El aeropuerto de Son Sant Joan** es otra de las grandes infraestructuras afectadas por los episodios de inundación. En un principio no funcionaba como aeropuerto de tránsito comercial y turístico, sino que era una base militar, pero debido a su posición estratégica (a solo 8 km de la ciudad de Palma), a la

imposibilidad de ampliar el aeropuerto de Son Bonet (que se ocupaba hasta entonces del tráfico comercial) y sobretodo, de nuevo, a la proliferación del turismo en la zona cercana de la playa de El Arenal, hicieron que en 1959 la Junta Nacional de Aeropuerto aprobara la ampliación de la base militar, y en 1960 abrió sus puertas el nuevo Aeropuerto de Son Sant Joan, clasificado de primera categoría.

El aeropuerto consta de dos pistas paralelas entre sí y una tercera pista que comunica a ambas. El terreno sobre el que está construido presenta una topografía bastante plana, y el nivel freático se sitúa muy cerca de la superficie. El problema fue que al encontrarse en una zona extremadamente plana sus largas pistas de aterrizaje asfaltadas de nuevo impedían el drenaje natural de la zona.

Aunque se ha intentado corregir el problema con numerosos pozos y bombas que drenan el agua, es frecuente ver zonas cercanas a las pistas anegadas por el agua. Estas zonas de aguas estancadas son un problema para los pilotos, que se quejan de reflejos en el agua que dificultan el aterrizaje y el aumento de aves en la zona, atraídas por los mosquitos que proliferan gracias al agua acumulada.



**Figura 22:** imágenes de zonas inundadas cercanas a las pistas del aeropuerto de Son San Joan. Imágenes cedidas por el IGME.

## **5. MATERIALES Y DATOS USADOS.**

La recopilación de la información disponible sobre nuestra zona de estudio es siempre el primer paso que debemos dar a la hora de plantear un proyecto. Podemos obtenerla de diferentes formas: bibliografía, instituciones públicas o privadas, la red etc., pero siempre debemos asegurarnos de su procedencia y veracidad ya que normalmente todos nuestros cálculos e hipótesis de partida se basan en dicha información.

El IGME es un organismo público de investigación adscrito al Ministerio de Economía y Competitividad a través de la Secretaría de Estado de Investigación Desarrollo e Innovación, según lo dispone el *Real Decreto 1953/2000, de 1 de diciembre*, que aprueba su estatuto. Como organismo público que es, tiene diversas funciones, una de las más importantes es la de informar, dar asistencia técnico-científica y asesorar al resto de Administraciones Públicas, agentes económicos y a la sociedad en general en cuestiones de geología, hidrogeología, recursos geológicos y mineros. Todas estas funciones las lleva a cabo mediante la ejecución de proyectos.

Los materiales y datos de los cuales partimos son:

<b>TIPO DE DATO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Modelo digital del terreno (MDT).</b>	Paso de malla 2x2 y 4x4, con la misma distribución de hojas que el MTN50. Como sistema de referencia se ha usado el ETRS89 y proyección UTM en el uso 31 (uso correspondiente a las Islas Baleares).
<b>Mapa topográfico en formato vectorial.</b>	Hoja 698 Palma. Escala 1:50000. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
<b>Fotografías aéreas de la zona de estudio.</b>	Zona H.723/698, serie B, rollo 152, negativo 14031. Fecha: 21/07/1956. Escala 1:32500. <i>Ejército del Aire (Centro Cartográfico y Fotográfico)</i> .
<b>Mapa geológico de España.</b>	Hoja 698 Palma. Escala 1:50000. Serie MAGNA, Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
<b>Mapa geológico en formato vectorial.</b>	Proyecto GEODE, cartografía geológica continúa del IGME a escala 1:50000.
<b>Mapa de usos del suelo en formato vectorial (SIOSE).</b>	Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE), escala 1:25000, última actualización año 2011.
<b>Series de datos de precipitaciones.</b>	Series de precipitaciones para diferentes estaciones meteorológicas situadas en el Pla de Sant Jordi. Estos datos han sido cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) a través de la oficina del IGME en Palma de Mallorca.
<b>Estereoscopio</b>	Fotointerpretación manual de fotografías aéreas de la zona de estudio.



**Figura 23:** estereoscopio convencional utilizado en el IGME para realizar la fotointerpretación de las fotografías aéreas de la cuenca del Pla de Sant Jordi.

## **6. METODOLOGÍA.**

En este apartado se explicarán los diferentes procedimientos usados para alcanzar los objetivos específicos definidos anteriormente. El método elegido para obtener un análisis de la peligrosidad de inundación de la zona de estudio ha sido el “*método hidrológico-hidráulico*”, y para explicar con claridad todos sus pasos se opta por hacer dos sub-apartados.

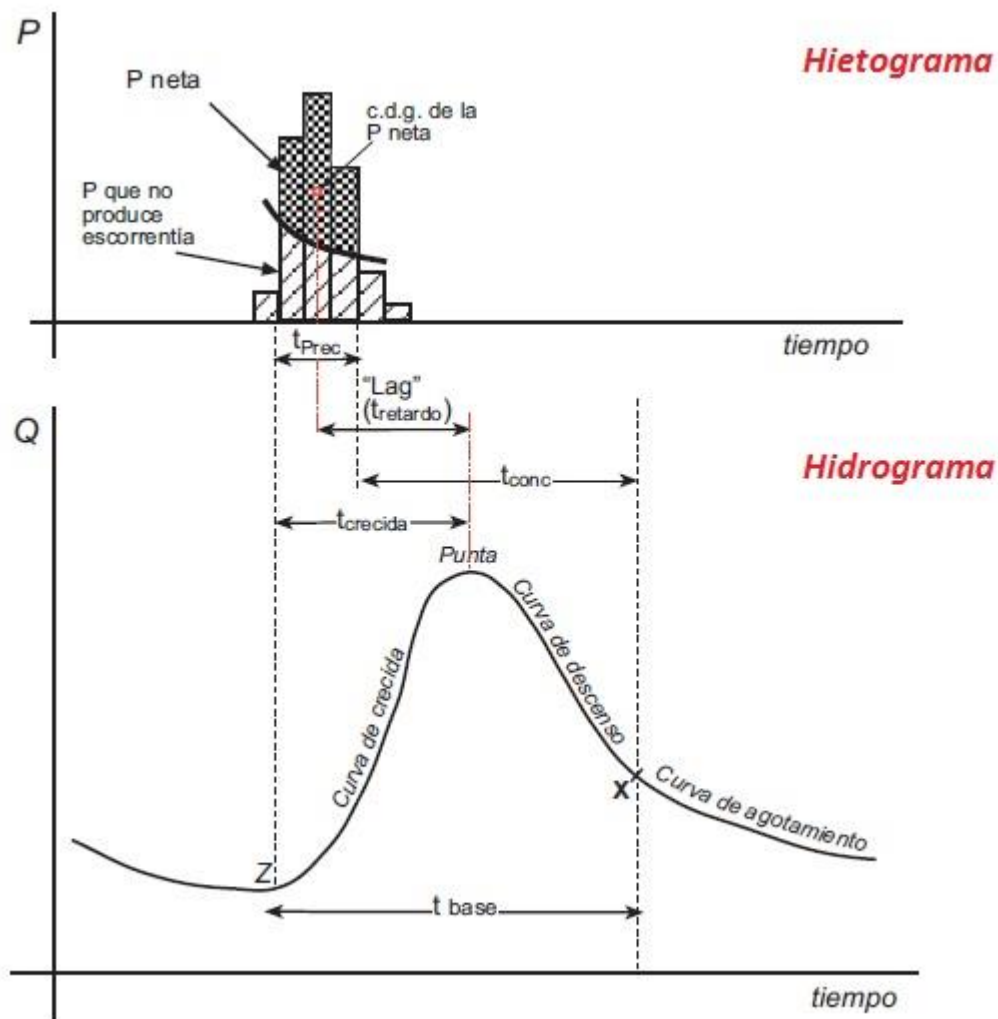
Antes de comenzar la descripción en detalle de la metodología seguida, es conveniente tener claros algunos conceptos básicos de hidrología, ello nos facilitará la comprensión de los procesos descritos en los apartados posteriores.

- **Periodo de retorno:** en hidrología, el concepto periodo de retorno se refiere al tiempo medio (o esperado) que se da entre dos avenidas con caudales similares o superiores a uno determinado. Se trata de un concepto estadístico que se calcula mediante series de valores extremos registradas para periodos de tiempo similares, en hidrología se suelen tomar para el estudio las precipitaciones máximas recogidas en 24 horas para un año, cuanto más registro de años consecutivos tenga la serie, más fiable será la probabilidad que resulte.

Para la elaboración de cartografía de zonas inundables, el periodo de retorno es uno de los parámetros más importantes y cualquier obra civil debería planearse acorde a sus resultados. En el estudio del Pla de Sant Jordi, los periodos de retorno elegidos para elaborar posteriormente la cartografía han sido de 50, 100 y 500 años. Por ejemplo, para el periodo de retorno de 500 años, la cantidad de lluvia caída en un solo día (24 horas) se igualará o superará al menos una vez cada 500 años (siempre estadísticamente hablando, lo que no quiere decir que pueda superarse antes, recordemos que solo es una probabilidad).

- **Hietograma:** se trata de un gráfico de barras que muestra cómo evoluciona la precipitación a lo largo de una tormenta, es decir, puede ser que la tormenta descargue toda el agua de forma uniforme en el tiempo, o por el contrario descargue más agua al principio o al final de la tormenta. Realizar un hietograma que se ajuste bien a la realidad es muy importante, ya que a partir de él se obtendrá el *hidrograma*.
- **Hidrograma:** nuevo gráfico de dos ejes, que representa las variaciones del caudal con respecto al tiempo en orden cronológico para un lugar dado de la corriente. Sirven para comparar los tiempos de descarga y caudales pico de varias cuencas hidrográficas, pudiendo modelizar así la respuesta de la cuenca ante una tormenta con el fin de prever todo tipo de daños (*Díez-Herrero, A.; Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M., 2008*)

Estos gráficos tienen 4 fases diferenciadas, la primera es *la curva de concentración*, corresponde a la parte en la cual la curva del hidrograma asciende. La segunda, *pico del hidrograma*, muestra la zona donde se alcanza el caudal máximo para ese evento y la tercera es *la curva de descenso* la cual indica la zona donde se produce una disminución progresiva del caudal. La última fase es la más compleja e importante, se trata de *la curva de agotamiento*, indica el momento en que toda la escorrentía directa provocada por esas precipitaciones ya ha pasado y el agua aforada a partir de ahí pasará a ser escorrentía básica. Si la cuenca no tiene poder de almacenamiento superficial (lagos, embalses...) pasará a ser escorrentía subterránea.



**Figura 24:** gráficos ejemplo de hietograma e hidrograma mostrando la relación entre ellos y las diferentes fases que los componen. (Sánchez San Román, 2013).

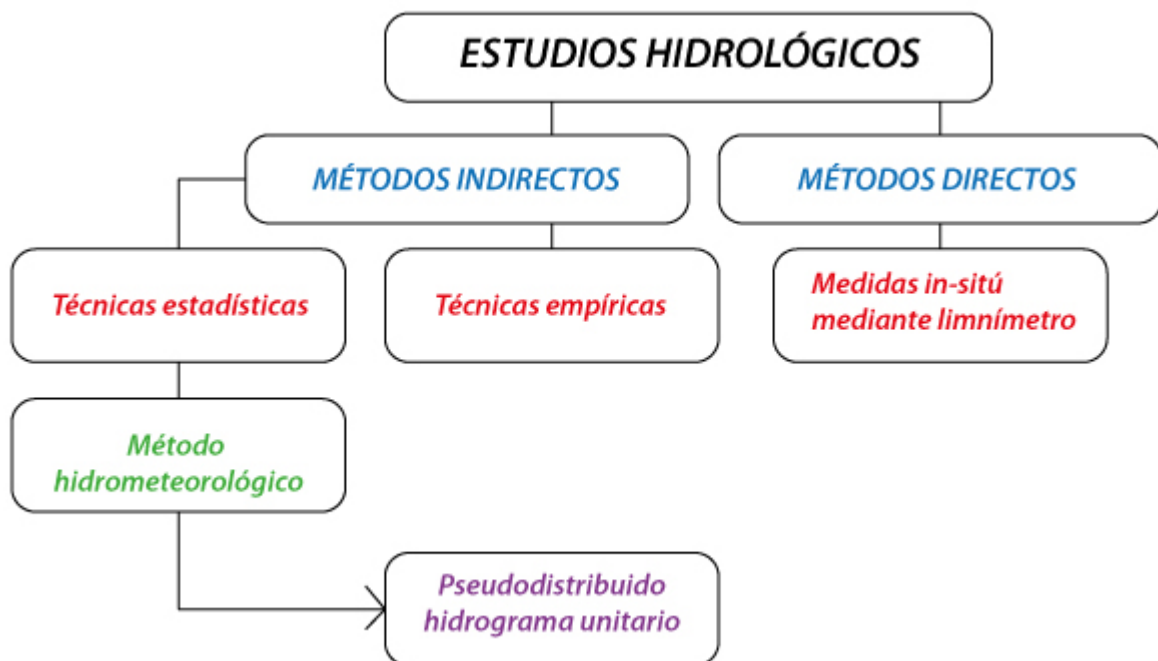
### 6.1 Metodología del análisis hidrológico.

Este tipo de método parte de la premisa de que en nuestra zona de estudio se produzca un evento que genere caudales anormalmente altos, lo cual genere una crecida o avenida fluvial. Una vez que ese hecho se dé, la caracterización temporal de esos caudales y su posterior análisis será fundamental para definir el hietograma y el posterior hidrograma para poder asignar así una probabilidad de ocurrencia al evento.

El estudio hidrológico de las crecidas se puede abordar desde dos métodos diferentes, directos o indirectos. **Directos**, en principio son los ideales ya que parten de datos recogidos *in situ*, generan un hidrograma de crecida con datos recogidos en una estación de aforo por medio de un limnómetro. Y los **indirectos**, usan datos recogidos en el pasado para modelizar el comportamiento actual y futuro del área de estudio frente a un evento, todo ello en base a leyes físicas y matemáticas.

Dentro de los métodos indirectos, encontramos **las técnicas empíricas o deterministas**, que concretamente pasan a relacionar los caudales punta de la crecida con el área de la cuenca en estudio mediante fórmulas empíricas (fórmulas de *Zapata, Fuller y Heras 1970*). Y por otro lado, **las técnicas estadísticas o estocásticas** que tratan datos locales o regionales utilizando referencias históricas. El principal problema de estas técnicas es que para ser aplicadas se requiere la existencia de caudales punta o de un hidrograma (esto no siempre es posible y en muchas ocasiones los datos de caudales punta están incompletos por ejemplo, y se deben estimar a partir de caudales medios diarios lo que genera incertidumbre en los datos de partida).

Mediante las técnicas estadísticas llegamos al que finalmente será el método usado para nuestro TFM, el **método hidrometeorológico**. Su función es convertir las variables meteorológicas en escorrentía superficial, en nuestro caso convertimos precipitaciones en forma de lluvia en caudales (también conocido como **método precipitación-escorrentía**) pero funcionaría igual con nieve o hielo. Como consideramos nuestra cuenca de estudio una zona homogénea (con respuesta hidrológica homogénea), el modelo tendrá carácter **pseudodistribuido** y se usará la fórmula del **hidrograma unitario** (*Sherman, 1932*).



**Figura 25:** diagrama explicativo de los métodos que componen los estudios hidrológicos. Elaboración propia.

### 6.1.1 Análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el método elegido para hacer nuestro estudio hidrológico será el hidrometeorológico, por tanto una vez delimitada nuestra cuenca de estudio, debemos localizar las estaciones meteorológicas que se encuentran en ella y realizar un análisis estadístico de los datos pluviométricos disponibles. Se han elegido un total de 9 estaciones meteorológicas que se encuentran espacialmente bien distribuidas por toda la cuenca cubriendo así la mayor parte del área de esta.

Los datos de series de precipitaciones han sido facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) a través de la oficina del IGME de Palma de Mallorca.

<b>NOMBRE</b>	<b>CÓDIGO ID</b>	<b>UTM: X</b>	<b>UTM: Y</b>	<b>REGISTRO SERIE</b>
<b>Son San Juan</b>	B278	477377,814	4377966,893	1972 - 2013
<b>Porciuncula</b>	B279	478680,832	4374482,66	1973 - 2012
<b>Xorrigo</b>	B282	483803,032	4380512,605	1914 - 2012
<b>Marratxi Son Bonet</b>	B275B	474961,326	4383464,944	1989 - 2013
<b>Marratxi La Cabaneta</b>	B273	478509	4384674	1960 - 2014
<b>Algaida</b>	B670A	490708	4378949	1951 - 2014
<b>Algaida Farmacia</b>	B670	490657	4378739	1934 - 2014
<b>Algaida Pina</b>	B671	490710	4378897	1985 - 2014
<b>Llucmajor II</b>	B334	490684	4371254	1953 - 2013

**Figura 26:** cuadro resumen de las estaciones meteorológicas usadas.

El objetivo es hacer un estudio pluviométrico para ver no solo la cantidad de precipitación total diaria, sino también como es su distribución temporal y su valor areal sobre la cuenca de estudio. Se opta por seguir el modelo estadístico con métodos paramétricos, el cual usa modelos de series anuales donde solo se considera el mayor valor de precipitación de cada uno de los años (el día que más llueve de todo el año). Viene definido por la combinación de tres factores (Cunnane, 1987):

- elección del tipo de distribución requerida
- método de estimación de parámetros y cuantiles
- esquema de uso combinado de datos locales y regionales.

Para realizar el análisis se opta por usar el **software informático CHAC** (*Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas*), se trata de un programa informático diseñado por el *Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX* con fines específicos aplicados a hidrología de superficie. Se pretende ceñir esas series temporales de precipitaciones (en nuestro caso son series anuales) a diferentes funciones de ajuste de distribución de frecuencias, y para ello CHAC tiene programadas las fórmulas matemáticas de las funciones de distribución más usadas a nivel internacional en la actualidad (WMO, 1989; Ferrer, 1992).

El programa funciona con ficheros de datos en formato LEMA (ficheros ASCII con extensión .txt) en los que se ordenan las series temporales con las coordenadas del punto de medida (estación meteorológica) y estas series pueden referirse a diferentes tipos de variables como pueden ser humedad, precipitaciones totales mensuales, precipitación total máxima diaria de cada mes, caudales medios mensuales, mínimos instantáneos, etc. El dato de la última columna es el más importante ya que corresponde al valor anual que será diferente en función del tipo de variable que se esté considerando.



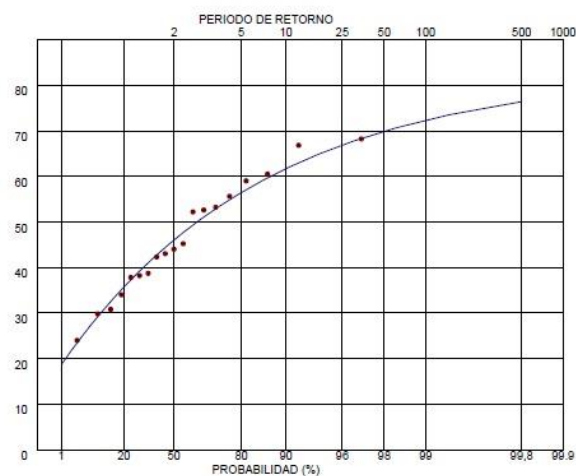
distribución de frecuencias (GEV, LP3, TCEV, GUMBEL y SQRT) y sus métodos de estimación/ajuste de parámetros(PWM,MOM y ML).

A continuación se muestra un ejemplo de resultado gráfico y numérico que genera CHAC, en este caso la combinación elegida es la **GEV + ML**, pero podría ponerse cualquier otra función de distribución como ejemplo ya que el programa nos ha dado todas las combinaciones posibles. El ajuste lo da para las series temporales de precipitaciones obtenidas de la **estación meteorológica de Son San Joan**, la estación del aeropuerto de Palma de Mallorca.

Proyecto: Sant Jordi  
Estación: 01010-U

Ley: GEV

Método: Máxima verosimilitud (ML)



Proyecto: Sant Jordi  
Estación: 01010-U

Numero de datos= 19			ESTIMAS MAXIMA VEROSIMILITUD FUNCION GEV		
DATOS	ORDENADO	PROBABILIDAD	X0=	ALFA=	BETA=
59.	1	.0293	41.83	12.03	.291
44.	2	.0816			
56.	3	.1339			
34.	4	.1862			
38.	5	.2385			
43.	6	.2908			
52.	7	.3431			
61.	8	.3954			
30.	9	.4477			
42.	10	.5000			
67.	11	.5523			
68.	12	.6046			
45.	13	.6569			
38.	14	.7092			
53.	15	.7615			
53.	16	.8138			
24.	17	.8661			
31.	18	.9184			
39.	19	.9707			

PERIODO RETORNO	PROBABILIDAD NO EXCEDENCIA	VALOR RESULTANTE
2.	.50000	46.
5.	.80000	56.
10.	.90000	62.
25.	.96000	67.
50.	.98000	70.
100.	.99000	72.
200.	.99500	74.
500.	.99800	76.
1000.	.99900	78.
2000.	.99950	79.
5000.	.99980	80.
10000.	.99990	80.
20000.	.99995	81.

ESTIMAS MAXIMA VEROSIMILITUD FUNCION GEV  
X0= 41.83 ALFA= 12.03 BETA= .291

**Figura 29:** resultados gráficos y numéricos del ajuste a la función de distribución de frecuencias GEV + ML.

Una vez que se tienen los diferentes datos para cada función de distribución, pasamos a comprobar la validez de esos ajustes dados por CHAC y para ello debemos realizar lo que se conoce como **test de bondad**. Hay varios tipos de test de bondad aplicables a este tipo de datos, los más comunes son:

- Test de Kolmogrov-Smirnov: es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución y su nivel de significación es muy pequeño, por lo tanto no es adecuado en este caso.
- Test de la  $X^2$ : son necesarios seis estratos, con sus frecuencias relativas que sean mayores o iguales al 10%; este test requiere muestras grandes ( $N \geq 60$ ), por lo que no se puede utilizar en el trabajo.
- Test de Errores cuadráticos mínimos: calcula para cada función su error cuadrático.

Para este trabajo vamos a elegir este último, el **test de errores cuadráticos mínimos** (Martínez y Navarro, 1991). Se calcula el error cuadrático de cada función de distribución ajustada por CHAC, para ello se crea una hoja Excel con las fórmulas matemáticas de las funciones de distribución programadas (las mismas que usa CHAC) y el resultado que menor cifra de error obtenga, se seleccionará como el mejor ajuste del test de bondad.

X0	ALFA	BETA				
41.83	12.03	0.291				
<u>GEV ML</u>						
					Probabilidad	xcí
-0.431299252	1.431299252	3.42891063	-3.42891063	0.032422241	0.0293	9.74839E-06
-0.286162095	1.286162095	2.374578979	-2.374578979	0.093053659	0.0816	0.000131186
-0.261972569	1.261972569	2.224593	-2.224593	0.108111411	0.1339	0.000665051
-0.18940399	1.18940399	1.814946747	-1.814946747	0.16284658	0.1862	0.000545382
-0.092645885	1.092645885	1.355912717	-1.355912717	0.257711969	0.2385	0.0003691
-0.092645885	1.092645885	1.355912717	-1.355912717	0.257711969	0.2908	0.001094818
-0.068456359	1.068456359	1.255511162	-1.255511162	0.284930166	0.3431	0.00338373
0.004112219	0.995887781	0.985939314	-0.985939314	0.373088615	0.3954	0.000497798
0.028301746	0.971698254	0.906051022	-0.906051022	0.404116926	0.4477	0.001899484
0.052491272	0.947508728	0.83086404	-0.83086404	0.435672685	0.5	0.004138003
0.076680798	0.923319202	0.760211181	-0.760211181	0.467567675	0.5523	0.007179567
0.246007481	0.753992519	0.378949102	-0.378949102	0.684580456	0.6046	0.006396873
0.270197007	0.729802993	0.338778849	-0.338778849	0.712640033	0.6569	0.003106951
0.270197007	0.729802993	0.338778849	-0.338778849	0.712640033	0.7092	1.18338E-05
0.342765586	0.657234414	0.236379203	-0.236379203	0.789481244	0.7615	0.00078295
0.415334165	0.584665835	0.158123198	-0.158123198	0.853744595	0.8138	0.001595571
0.463713217	0.536286783	0.117514946	-0.117514946	0.889127223	0.8661	0.000530253
0.608850374	0.391149626	0.039729817	-0.039729817	0.961049064	0.9184	0.001818943
0.6330399	0.3669601	0.031903977	-0.031903977	0.968599585	0.9707	4.41174E-06
					<b>E</b>	<b>0.034161654</b>

**Figura 30:** extracto de la hoja Excel programada con el test de bondad de errores cuadráticos mínimos, para la función GEV+ML y datos de la estación meteorológica de Son San Juan.

Como se puede ver, todos los datos usados en la tabla para empezar a operar han sido obtenidos de los resultados numéricos dados por CHAC. Hay un valor de probabilidad para cada uno de los 19 datos, y los valores de  $X_0$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son variables estimadas de máxima verosimilitud de la función GEV.

### 6.1.2 Análisis de los hietogramas de precipitaciones máximas diarias:

En la bibliografía existen numerosos parámetros que conforman los análisis hidrológicos, dos de los más importantes son las precipitaciones y el caudal de la cuenca. Como ya se ha explicado brevemente al principio del epígrafe 5 (metodología), los **hietogramas** son un tipo de gráfico del cual se obtiene las primeras estimaciones sobre la distribución temporal de las precipitaciones en la cuenca. Una vez que tengamos esos datos bien definidos, podremos hacer, por ejemplo, una evaluación de la crecida, comparar entre sí varias crecidas para una misma cuenca o contrastar avenidas de cuencas diferentes.

La situación geográfica de la cuenca de estudio es muy importante ya que define el clima predominante en esta, y por lo tanto cómo será su régimen de precipitaciones. En nuestro caso de estudio, las Islas Baleares (más concretamente la isla de Palma de Mallorca), se sitúan en la vertiente mediterránea de la península Ibérica. La característica pluviométrica principal de esta franja mediterránea es el carácter torrencial de las lluvias (que normalmente se dan en otoño), concentrando su intensidad máxima en intervalos temporales cortos a causa de la estructura de las células convectivas (*García Bartual, 1989*). Los efectos que pueden llegar a causar en forma de avenidas o inundaciones pueden ser devastadores para la población, por lo tanto evaluar las intensidades en el núcleo de la tormenta y el desplazamiento dinámico de los núcleos tormentosos es fundamental, y el primer paso para conseguirlo es la elaboración de un hietograma.

La AEMET nos proporcionó datos pluviométricos de los eventos excepcionales más significativos que se han producido en los últimos 30 años para la zona del Pla de Sant Jordi. De entre todos los eventos se ha elegido un total de 4 (cuatro días diferentes), ya que eran los únicos que tenían datos completos hora a hora (las 24h del día) y que además encajaban con la serie anual de precipitaciones máximas diarias. Se han analizado la duración y distribución horaria de cada evento.

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>	<b>Precipitación/día (mm)</b>	<b>Precipitación/hora (mm)</b>
1991	Enero	25	27.4	1.141
2001	Septiembre	6	41.9	1.745
2008	Mayo	9	34.6	1.441
2010	Mayo	3	106.3	4.429

**Figura 31:** cuadro resumen de los cuatro eventos excepcionales estudiados.

Para realizar los cálculos y **obtener el hietograma** en forma de gráfico de barras donde se ve cómo se distribuye la intensidad de las precipitaciones en mm/h durante un periodo de tiempo determinado (horas o días), se ha programado una hoja de cálculo en Excel con las fórmulas requeridas. Como se puede ver a continuación, generamos 4 tablas con los datos de cada evento:

- La primera columna enumera las 24 horas del día (PH1, PH2, PH3...etc).
- Se puede ver que además del día en cuestión, también se incluyen el día anterior y posterior con el fin de comparar los tres días y no analizar uno solo aislado.
- El día central del evento, se considera el más importante, y se dan las precipitaciones en milímetros y en tanto por ciento cada hora (lo que le corresponde a cada hora según los mm caídos en esa hora).

A continuación se muestran las tablas creadas como hojas de cálculo en Excel.

		<b>Año</b>			
		<b>1991</b>			
<b>Mes</b>	<b>Día</b>				
<b>Enero</b>	<b>24</b>	<b>25</b>			<b>26</b>
		<b>dcm</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	
PH1	9	5	0.5	1.825	30
PH2	12	15	1.5	5.474	12
PH3	43	36	3.6	13.139	46
PH4	12	15	1.5	5.474	19
PH5	28	15	1.5	5.474	170
PH6	2	0	0	0	13
PH7	1	0	0	0	3
PH8	0	0	0	0	22
PH9	0	0	0	0	23
PH10	6	0	0	0	53
PH11	18	2	0.2	0.730	47
PH12	0	10	1	3.650	17
PH13	0	31	3.1	11.314	8
PH14	0	30	3	10.949	8
PH15	0	7	0.7	2.555	5
PH16	6	5	0.5	1.825	0
PH17	3	13	1.3	4.745	3
PH18	0	4	0.4	1.460	0
PH19	0	22	2.2	8.029	0
PH20	0	4	0.4	1.460	0
PH21	0	3	0.3	1.095	3
PH22	0	37	3.7	13.504	0
PH23	0	14	1.4	5.109	0
PH24	0	6	0.6	2.190	0
			<b>27.4</b>	<b>100</b>	

		<b>Año</b>			
		<b>2001</b>			
<b>Mes</b>	<b>Día</b>				
<b>Septiembre</b>	<b>5</b>	<b>6</b>			<b>7</b>
		<b>dcm</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	
PH1	0	0	0	0	0
PH2	0	1	0.1	0.239	64
PH3	0	2	0.2	0.477	42
PH4	0	0	0	0	23
PH5	0	0	0	0	7
PH6	0	0	0	0	4
PH7	0	0	0	0	
PH8	0	0	0	0	0
PH9		0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0
PH11	0	0	0	0	0
PH12	0	0	0	0	0
PH13	0	0	0	0	0
PH14	0	0	0	0	0
PH15	0	0	0	0	0
PH16	0	0	0	0	0
PH17	0	0	0	0	0
PH18	0	0	0	0	0
PH19	0	0	0	0	0
PH20	0	7	0.7	1.671	0
PH21	0	18	1.8	4.296	0
PH22	0	90	9	21.480	0
PH23	0	288	28.8	68.735	0
PH24	0	13	1.3	3.103	0
			<b>41.9</b>	<b>100</b>	

		Año 2008		
Mes Mayo	Día			
	8	9		10
		mm	%	
PH1	0	0	0	3.8
PH2	0	0.8	2.312	20.3
PH3	0	1	2.890	11.7
PH4	0	0.1	0.289	0.7
PH5	0	0	0	0
PH6	0	0	0	0
PH7	0	0	0	0
PH8	0	0	0	0
PH9	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0.7
PH11	0	1	2.890	0
PH12	0	2.2	6.358	0
PH13	0	4.6	13.295	0
PH14	0	6.6	19.075	0
PH15	0	4.1	11.850	0
PH16	0	2.5	7.225	0
PH17	0	3.8	10.983	0
PH18	0	0.6	1.734	0
PH19	0	0.1	0.289	0
PH20	0	0	0	0.4
PH21	0	0.2	0.578	0.8
PH22	0	2.5	7.225	0
PH23	0.3	2.7	7.803	0
PH24	0.2	1.8	5.202	0
		34.6	100	

		Año 2010		
Mes Mayo	Día			
	2	3		4
		mm	%	
PH1	0	0	0	0
PH2	0	0	0	0
PH3	0	0	0	0
PH4	0	0	0	0
PH5	0	0	0	0.1
PH6	0	0	0	0
PH7	0	0	0	0.5
PH8	0	0	0	0.4
PH9	0	1.2	1.129	0.1
PH10	0	0.3	0.282	0
PH11	0	12	11.289	0
PH12	0	21.9	20.602	0
PH13	0	8.7	8.184	0
PH14	0	46.8	44.026	0
PH15	0	5.8	5.456	0
PH16	0	0.5	0.470	0
PH17	0	5.4	5.080	0
PH18	0	0.6	0.564	0
PH19	0	1.2	1.129	0
PH20	0	0	0	0
PH21	0	0	0	0
PH22	0	0	0	0
PH23	0	0.4	0.376	0
PH24	0	1.5	1.411	0
		106.3	100	

### 6.1.3 Elaboración de capas con ArcGis:

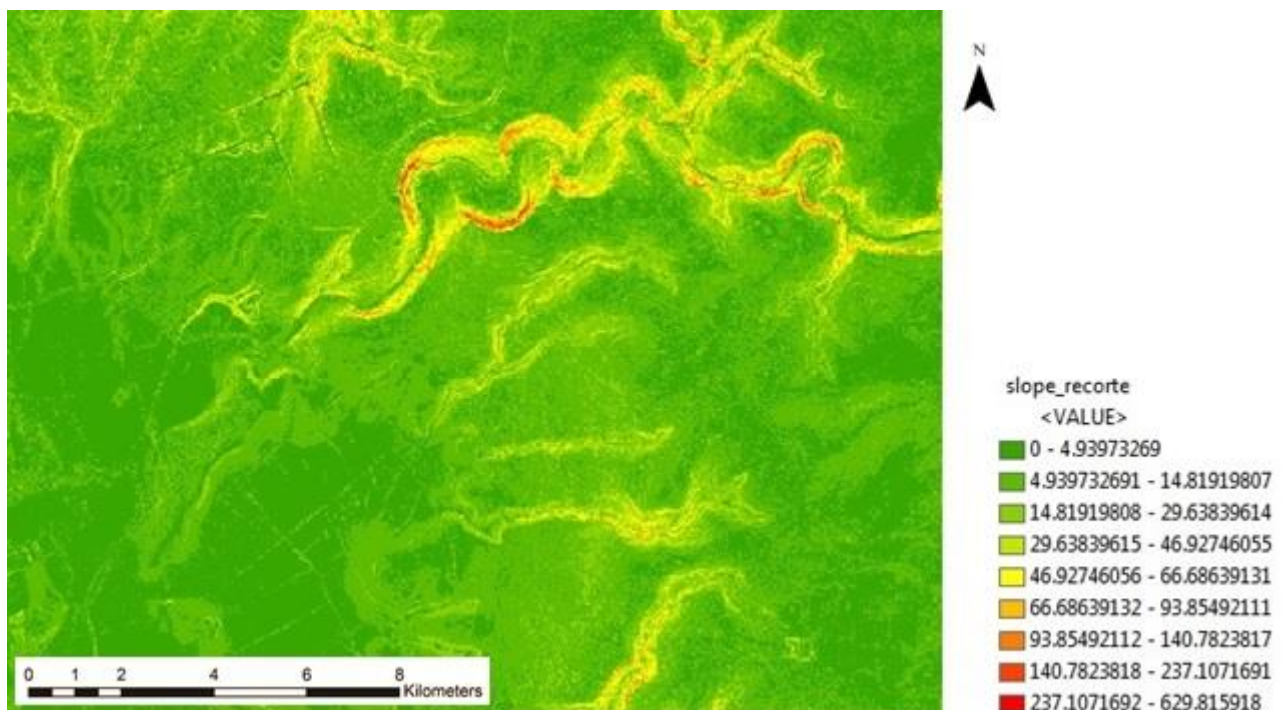
En este sub-apartado se muestran los diferentes procedimientos seguidos para generar las capas que posteriormente serán introducidas en los softwares específicos de modelización hidrológica-hidráulica, que nos darán como resultado el análisis de las zonas inundables para nuestra zona de estudio. El software usado para ello es ArcGis 10.2, una plataforma de información geográfica que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelo o mapas, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según las necesidades de la organización.

Se parte de un modelo digital del terreno (MDT) con un paso de malla 2x2, con la misma distribución de hojas que el MTN50. Como sistema de referencia se ha usado el ETRS89 y proyección UTM en el uso 31 (uso correspondiente a las Islas Baleares).

#### ➤ **Capa de pendientes (slope):**

Se tiene un MDT (2x2) del suroeste de la Isla de Mallorca que debemos recortar ciñéndonos solo a la parte de la cuenca del Pla de Sant Jordi, con este proceso eliminaremos datos innecesarios que demoran bastante el tiempo de cálculo de los procesos en ArcGis.

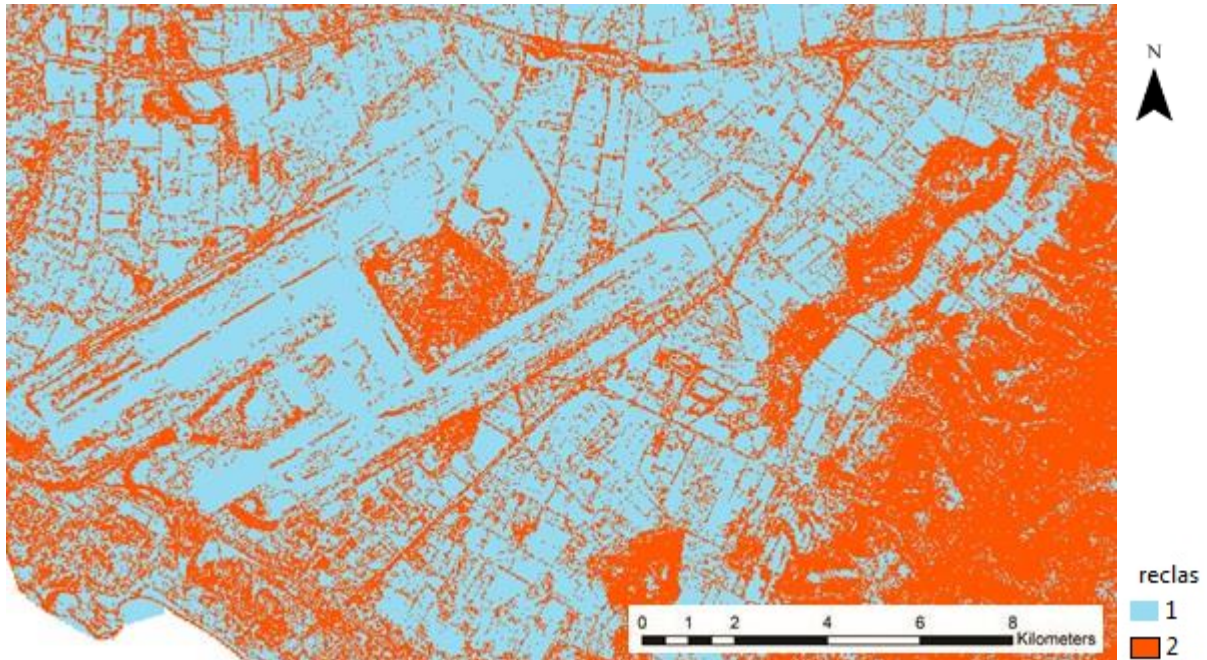
Una vez acotada el área de estudio, sacamos el mapa de pendientes mediante el uso del módulo de análisis espacial de las *ArcToolbox* > *herramienta Slope*.



**Figura 32:** detalle de la capa de pendientes de la zona Pla de Sant Jordi (zona noreste).

La imagen muestra la zona noreste de la cuenca del Pla de Sant Jordi, donde se aprecian algunos fondos de valle en los cuales se encajan los torrentes que anegan el Pla. Se puede ver que quitando esos torrentes, la zona es prácticamente llana.

El siguiente paso es **reclasificar** esa capa de pendientes obtenida **en valores de <3% y >=3%**. La razón por la cual se clasifican los valores de pendiente en esos dos intervalos es porque así lo indica la “*Instrucción de carreteras 5.2-IC. Drenaje superficial*”, aprobada en Orden de 14 de Mayo de 1990 (BOE n.m. 123, de 23 de mayo de 1990).



**Figura 33:** detalle de la capa raster de “pendientes” reclasificada en valores 1 y 2 (<3% y >=3% respectivamente) de la zona del aeropuerto (suroeste).

La imagen muestra la zona suroeste de la cuenca del Pla de Sant Jordi, donde se sitúa el aeropuerto de Palma de Mallorca (también conocido como aeropuerto de Son San Joan). A la derecha de las pistas se encuentra la zona de cultivos que más se ve afectada cuando se producen inundaciones, se clasifica con color azul claro correspondiente a pendientes <3%. Las zonas en color naranja indican zonas con pendientes >=3%, son los bordes de la cuenca donde se dan los materiales más duros y se encajan los torrentes que desembocan en el Pla.

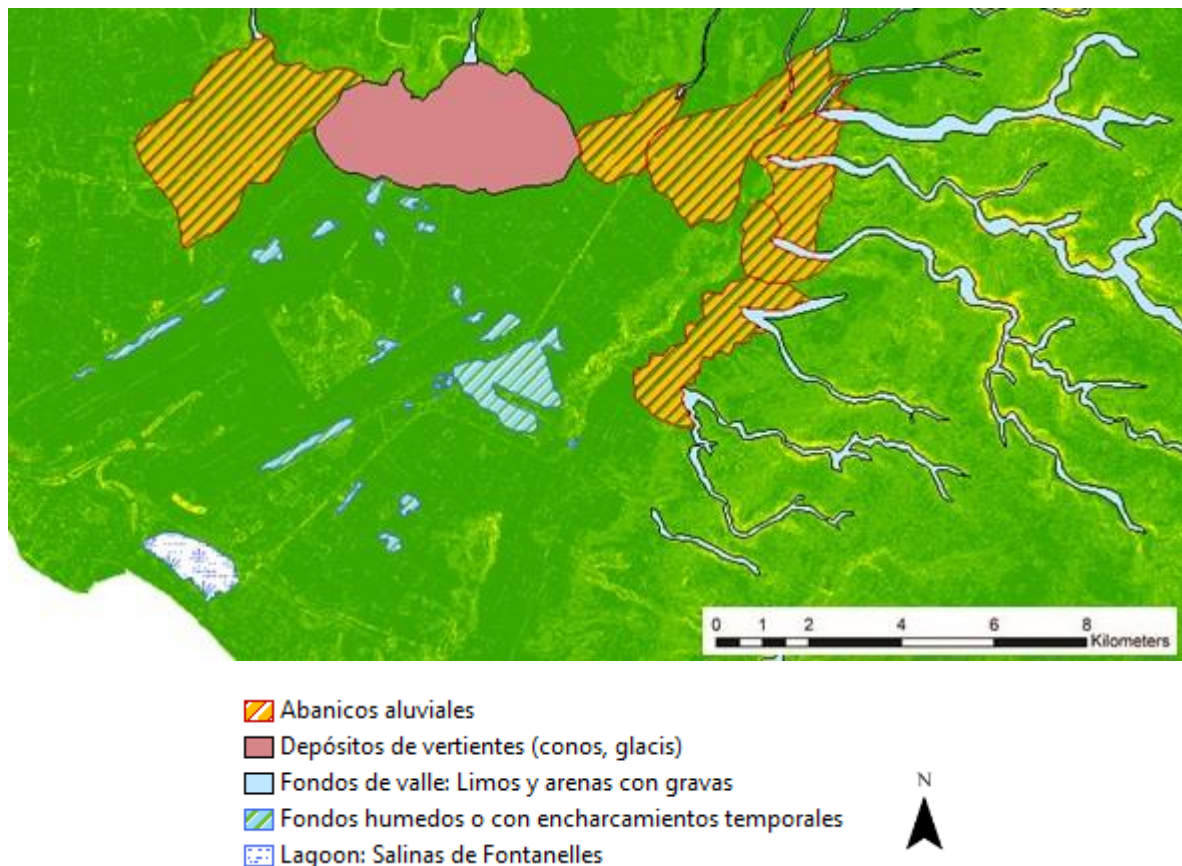
➤ **Capa de geomorfología:**

Mediante técnicas de fotointerpretación, usando fotografías aéreas (pares estereoscópicos) de la zona de estudio a escala 1:32500 y con fecha de vuelo 21/07/1956 cedidas por *Ejército del Aire (Centro Cartográfico y Fotográfico)*, se cartografían las formas del relieve más destacadas del Pla de Sant Jordi. En esta cartografía se han obviado aquellas formaciones superficiales ya cartografiadas con suficiente detalle en el Mapa geológico nacional a escala 1:50.000 (hoja 698) y que serán posteriormente incorporadas y utilizadas en el mapa de texturas del suelo.

Como ya se ha mencionado la cuenca es bastante llana y su geomorfología no es muy variada, se han identificado las siguientes formas principales:

<b>Formas geomorfológicas</b>	<b>Localización y descripción.</b>
<b>Abanicos aluviales</b>	Se encuentran bordeando toda la cuenca del Pla justo a la salida de los torrentes, se forman cuando las corrientes de agua que circulan encajadas por los barrancos llegan a zonas más tendidas y su velocidad disminuye repentinamente, depositando así los sedimentos que llevan en suspensión en formas de abanico.
<b>Fondos húmedos</b>	Zonas encharcadas de forma semi-permanente debido a su topografía deprimida.
<b>Depósitos de vertiente</b>	Conos y Glacis: Los primeros similares a los abanicos aluviales pero de menor extensión y situados a la salida de barrancos en zonas de pendiente elevada y con mayor carga de sedimentos gruesos. Los glacis serían superficies poligénicas de escasa pendiente con predominio en su formación de procesos fluviales de arroyada difusa.
<b>Fondos de valle</b>	Llanuras de inundación y fondos de los barrancos que bordean la cuenca por donde circula el agua hasta el Pla.
<b>Salinas o lagoons</b>	Cerca de la playa de El Arenal se encuentran Las Salinas de Fontanelles, una antigua zona de aguas poco profundas separada del mar por cordones de dunas litorales.

Una vez identificadas las formas geológicas se crea en ArcGis un nuevo shapefile de polígonos, y se edita. Se van digitalizando las formas encima de la ortofotografía, se las nombra y se las asigna una trama de color para poder diferenciarlas bien.



**Figura 34:** detalle de la capa vectorial de “geomorfología” con las principales formas identificadas.

En la imagen se puede ver como las zonas con encharcamientos temporales se sitúan en la zona central del Pla y bordeando las pistas del aeropuerto, donde se dan los mayores problemas de inundaciones.

➤ **Capa de texturas del suelo:**

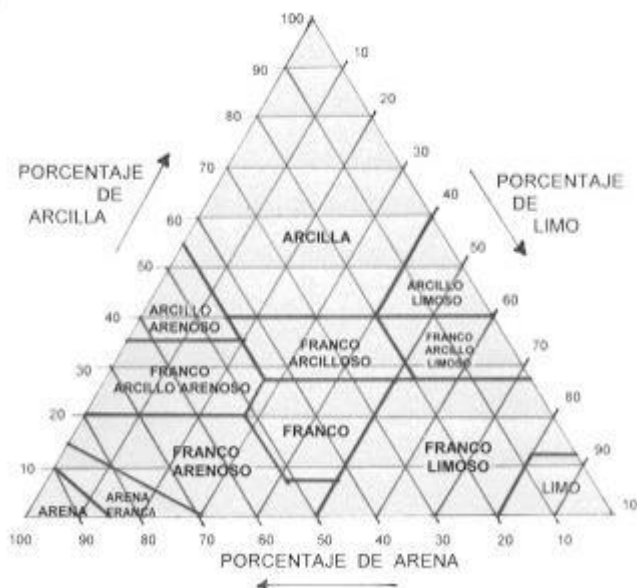
Para su elaboración necesitamos una capa donde aparezcan las litologías que componen la cuenca del Pla, es decir, una capa de la geología general de la zona. La obtenemos mediante el sistema de información cartográfica continua SIGECO, más concretamente del proyecto GEODE, que nos proporciona toda la información geológica en formato vectorial para la Isla de Mallorca a escala 1:50000.

Con la capa de geología general ya tenemos todas las litologías de la cuenca, pero también se quiere incluir en esta capa de texturas la anterior capa de geomorfología creada. Para integrar las dos capas en una utilizamos en ArcGis la **herramienta identity**, que nos permite solapar ambas manteniendo los atributos para la capa de salida.

Ahora en la tabla de atributos de la nueva capa de salida creada tenemos un campo que indica la litología y a partir de ella podemos sacar el grupo y el tipo textural. La textura de un suelo se define como el porcentaje en peso de las partículas menores a 2mm de diámetro (arena, arcilla y limo). Siguiendo la terminología establecida por la *USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América)*, tenemos las siguientes clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro ( $\phi$ ):

<b>Tipo</b>	<b>Tamaño</b>
<b>Arena gruesa</b>	$1 \text{ mm} > \phi > 0.5 \text{ mm}$
<b>Arena media</b>	$0.5 \text{ mm} > \phi > 0.25 \text{ mm}$
<b>Arena fina</b>	$0.25 \text{ mm} > \phi > 0.10 \text{ mm}$
<b>Limo</b>	$0.05 \text{ mm} > \phi > 0.002 \text{ mm}$
<b>Arcilla</b>	$\phi < 0.002 \text{ mm}$

La *USDA* también propone un diagrama triangular para clasificar las clases texturales del suelo en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla que tenga la litología a clasificar, dando lugar a varias clases texturales:



Cada lado del triángulo está dividido en diez partes iguales que indican porcentajes de cada una de las fracciones (arena, limo y arcilla) y en varias zonas que dan diferentes texturas. Cada muestra de suelo será definida por un punto del interior del triángulo que se obtiene al hacer intersectar dos valores de porcentaje de dos fracciones mediante dos rectas (por ejemplo; arcilla y limo).

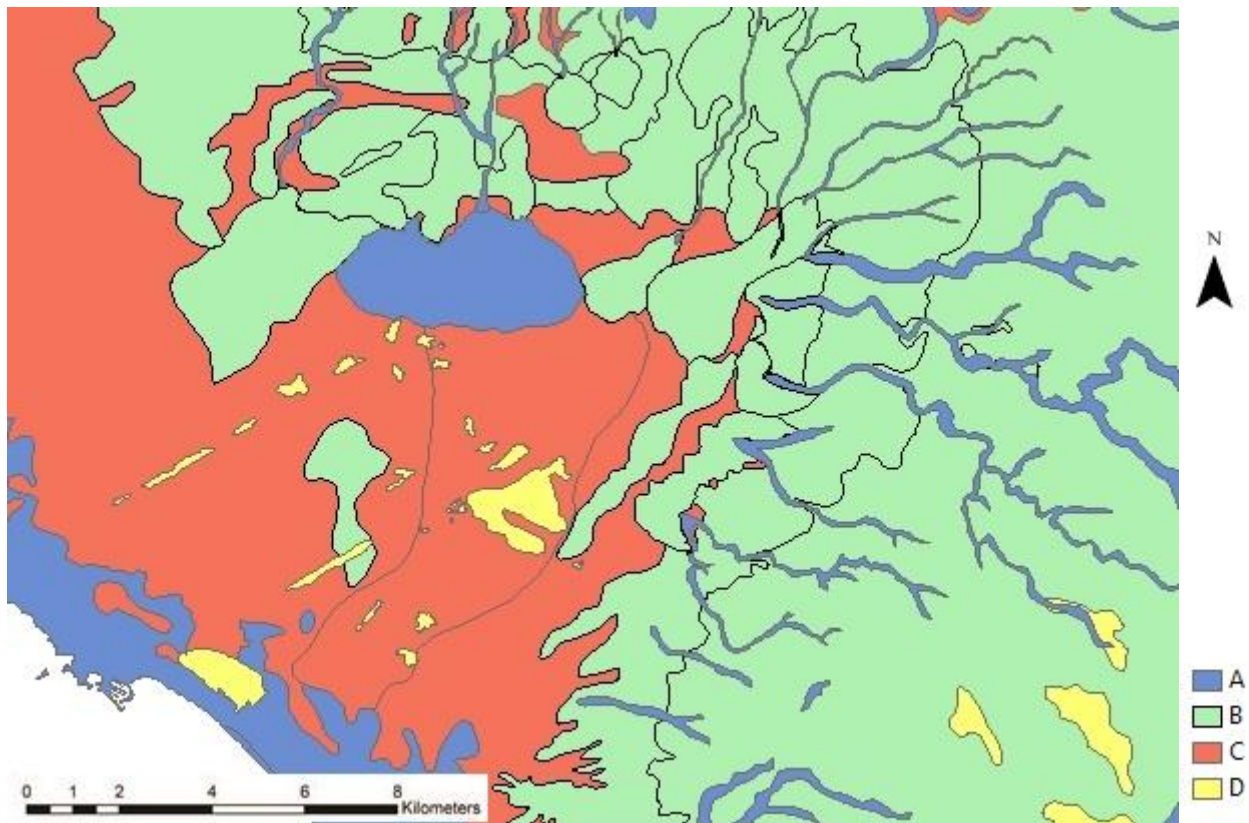
Con esas dos líneas queda definido el punto representativo de la textura, porque la tercera componente es en función de las dos primeras y la suma de todas ellas debe ser 100%. Por ejemplo, si la composición es arcilla (50%) y limo (30%) la textura resultante será **arcillosa**. El triángulo se divide en una serie de áreas que corresponden a las diversas clases texturales, que representan grupos de texturas con aptitudes o propiedades análogas. Las clases suelen asociarse en cuatro grupos principales según exista un componente dominante o una proporción adecuada de todos ellos, Se denominan A, B, C y D.

<b>Grupo</b>	<b>Clases texturales que agrupan y nivel de permeabilidad.</b>
<b>A</b>	Arenosos o areno-limosos. Mucha permeabilidad
<b>B</b>	Franco, franco-arenoso, franco-limoso y franco-arcillo-arenosa. Moderada permeabilidad.
<b>C</b>	Arcillo-arenosa, franco-arcillosa, franco-arcillo-limoso y limosa. Bastante impermeables.
<b>D</b>	Arcillosa y arcillo-limoso. Muy impermeable.

Con todos estos datos, lo único que debemos hacer es clasificar las litologías de la capa en los grupos A, B, C y D.

<b>litología</b>	<b>grupo text</b>	<b>tipo textu</b>
Arcillas rojas (Terra Rossa)	D	Arcilloso
Arcillas rojas (Terra Rossa)	D	Arcilloso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos clacimorfos (aluvial antiguo)	B	Franco arenoso
Arenas de playa (playas actuales)	A	Arenoso
Bloques y clastos rocosos en matriz limo-arcillosa (coluvion)	A	Areno-limoso
Bloques y clastos rocosos en matriz limo-arcillosa (coluvion)	A	Areno-limoso
Bloques y clastos rocosos en matriz limo-arcillosa (coluvion)	A	Areno-limoso
Bloques y clastos rocosos en matriz limo-arcillosa (coluvion)	A	Areno-limoso
Calcarenitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso
Calcarenitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso
Calcarenitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso

**Figura 35:** detalle de la tabla de atributos de la tabla "texturas del suelo". Se puede ver como a cada litología le corresponde un grupo y un tipo textural.



**Figura 36:** detalle de la capa vectorial “texturas del suelo”. Clasificación según la USDA.

➤ **Capa de usos del suelo:**

Esta capa tiene una especial importancia en el estudio ya que la transformación de los usos del suelo de un área puede ser determinante para su comportamiento frente a fenómenos de inundación. El ser humano está cambiando su medio físico y en ocasiones impone usos del suelo no adecuados que pueden llegar a cambiar la dinámica natural de ciertas zonas produciendo eventos que antes no se daban. La capa de usos del suelo es necesaria para después poder atribuir a cada parcela (y después a cada subcuenca) lo que se conoce como “número de curva”.

El modelo del número de curva es un modelo desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS, actualmente *Natural Resources Conservation Service* - NRCS) de Estados Unidos durante los años 50 para su aplicación por todo el país. Su objetivo era estimar la escorrentía en pequeñas cuencas agrícolas con unas condiciones de cobertura y tipo de suelo determinados, y así analizar la influencia de los tratamientos agrícolas y cambios de uso del suelo. Posteriormente se desarrolló su aplicación también para áreas urbanas.

Con el fin de conocer muy bien los usos del suelo catalogados en la actualidad para la zona del Pla de Sant Jordi, se ha optado por usar capas vectoriales procedentes del proyecto **SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España, última actualización año 2011)** en vez de usar capas del proyecto *Corine Land Cover (CLC)*. Se ha elegido el proyecto SIOSE debido a que tiene una mayor precisión y detalle en la división de las parcelas de usos del suelo (el *Corine Land Cover* generaliza más los usos y da parcelas más grandes), esto es debido a que SIOSE trabaja a escala 1:25000 y *Corine* a escala 1:100000.

Es necesario descargarse junto con la capa vectorial, una base de datos asociada donde vienen todos los códigos con los que trabaja SIOSE para clasificar los usos del suelo, que son diferentes a los que usa *Corine Land Cover* (hay más usos). Los códigos se basan en una serie de abreviaturas (en mayúscula y minúsculas) y en tantos por ciento (indican que tanto por ciento hay de ese uso en para una parcela en concreto).

<b>COBERTURAS</b>	<b>CODIGO</b>	<b>COBERTURAS</b>	<b>CODIGO</b>
<b>Asentamiento Agrícola Residencial</b>	AAR	<b>Olivar</b>	LOL
<b>Acantilados Marinos</b>	ACM	<b>Viñedo</b>	LVI
<b>Embalses</b>	AEM	<b>Matorral</b>	MTR
<b>Lagos y Lagunas</b>	ALG	<b>Aeroportuario</b>	NAP
<b>Afloramientos Rocosos y Roquedos</b>	ARR	<b>Conducciones y Canales</b>	NCC
<b>Vial, Aparcamiento o Zona Peatonal</b>	VAP	<b>Depuradoras y Potabilizadoras</b>	NDP
<b>Arroz</b>	CHA	<b>Eléctrica</b>	NEL
<b>Cultivos Herbáceos distintos de Arroz</b>	CHL	<b>Portuario</b>	NPO
<b>Coníferas</b>	CNF	<b>Plantas de Tratamiento</b>	NPT
<b>Administrativo Institucional</b>	EAI	<b>Red Ferroviaria</b>	NRF
<b>Campo de Golf</b>	ECG	<b>Red Viaria</b>	NRV
<b>Cultural</b>	ECL	<b>Telecomunicaciones</b>	NTC
<b>Cementerio</b>	ECM	<b>Vertederos y Escombreras</b>	NVE
<b>Edificación</b>	EDF	<b>Zonas de Extracción o Vertido</b>	ZEV
<b>Deportivo</b>	EDP	<b>Olivar-Viñedo</b>	OVD
<b>Educación</b>	EDU	<b>Agrícola, Ganadero</b>	PAG
<b>Parque Urbano</b>	EPU	<b>Playas, dunas y arenales</b>	PDA
<b>Zona Verde Artificial y Arbolado Urbano</b>	ZAU	<b>Minero Extractivo</b>	PMX
<b>Fronosas Caducifolias</b>	FDC	<b>Prados</b>	PRD
<b>Fronosas Perennifolias</b>	FDP	<b>Pastizal</b>	PST
<b>Marismas</b>	HMA	<b>Ramblas</b>	RMB
<b>Zonas Pantanosas</b>	HPA	<b>Suelo Desnudo</b>	SDN
<b>Salinas Marinas</b>	HSM	<b>Suelo No Edificado</b>	SNE
<b>Industrial Aislada</b>	IAS	<b>Camping</b>	TCG
<b>Polígono Industrial Ordenado</b>	IPO	<b>Complejo Hotelero</b>	TCH
<b>Polígono Industrial sin Ordenar</b>	IPS	<b>Comercial y Oficinas</b>	TCO
<b>Lámina de Agua Artificial</b>	LAA	<b>Parque Recreativo</b>	TPR
<b>Frutales Cítricos</b>	LFC	<b>Casco</b>	UCS
<b>Frutales No Cítricos</b>	LFN	<b>Discontinuo</b>	UDS
<b>Huerta Familiar</b>	UER	<b>Ensanche</b>	UEN

<b>DESCRIPCION_ATRIBUTOS</b>	<b>CODIGO</b>	<b>DESCRIPCION_ATRIBUTOS</b>	<b>CODIGO</b>
<b>asociación</b>	A	<b>cortas</b>	ct
<b>mosaico regular</b>	R	<b>procedencia de cultivos</b>	pc
<b>mosaico irregular</b>	I	<b>alta montaña</b>	am
<b>edificio aislado</b>	ea	<b>roturados no agrícolas</b>	ra
<b>edificio entre medianeras</b>	em	<b>zonas erosionadas</b>	ze

<b>vivienda unifamiliar aislada</b>	va	<b>cuaternarias</b>	cu
<b>vivienda unifamiliar adosada</b>	vd	<b>regadío no regado</b>	rn
<b>nave</b>	nv	<b>abancalado</b>	ab
<b>en construcción</b>	ec	<b>es forzado</b>	fz
<b>secano</b>	sc	<b>plantación</b>	pl
<b>regadío regado</b>	rr	<b>formación de ribera</b>	fr

**Figura 37:** Tablas de códigos usados por SIOSE para la clasificación de usos del suelo. Se diferencia entre mayúsculas (para definir tipo de cobertura) y minúsculas (para definir atributos).

Un ejemplo de interpretación de código SIOSE para una parcela sería: **A(75MTR\_15FDP\_05CNF\_05EDFva)**, cuyo significado sería: “Asociación de 75% matorral, 15% frondosas perennifolias, 5% coníferas y 5% edificado vivienda unifamiliar aislada”.

Una vez que tenemos los códigos traducidos, debemos hacer una equivalencia entre estos usos del suelo de SIOSE con los usos de *Corine Land Cover*, ya que la bibliografía del parámetro NC (número de curva) suele trabajar con estos últimos. Crearemos en la tabla de atributos un nuevo campo para definirlos.

<b>USO DE SUELO SIOSE</b>	<b>USO DE SUELO CORINE LAND COVER-2000</b>
<b>Recinto portuario</b>	Zonas portuarias
<b>Aeroportuario</b>	Aeropuertos
<b>Afloramientos rocosos y roquedos</b>	Afloramientos rocosos y canchales
<b>Lámina de agua artificial</b>	Almacenamiento de agua
<b>Red viaria</b>	Autopistas, autovías y terrenos asociados
<b>Coníferas</b>	Bosques/zonas de coníferas
<b>Campos de golf</b>	Campos de golf
<b>Cultivos herbáceos distintos de arroz (secano)</b>	Cultivos anuales en secano
<b>Cultivos herbáceos distintos de arroz (regadío)</b>	Cultivos herbáceos de regadío
<b>Cultivos herbáceos distintos de arroz (mixtos)</b>	Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío
<b>Desalinizadora</b>	Equipamientos y servicios
<b>Depuradoras y potabilizadoras</b>	Equipamientos y servicios
<b>Vertederos y escombreras</b>	Escombreras y vertederos
<b>Frondosas perennifolias</b>	Frondosas perennifolias
<b>Frutales cítricos</b>	Frutales cítricos
<b>Frutales no cítricos</b>	Frutales tropicales
<b>Viñedos</b>	Viñedos
<b>Asentamiento agrícola residencial</b>	Granjas agrícolas/ganaderos
<b>Zonas pantanosas</b>	Humedales y zonas pantanosas
<b>Zonas extracción minera y vertidos</b>	Zona de extracción minera
<b>Deportivo</b>	Instalaciones deportivas y recreativas
<b>Parque recreativo</b>	Instalaciones deportivas y recreativas
<b>Matorral</b>	Matorral boscoso de coníferas
<b>Olivar</b>	Olivares
<b>Pastizal</b>	Pastizales, prados o praderas con arbolado

Playas, dunas y arenales	Playas y dunas
Ramblas	Ramblas con algo de vegetación
Acantilados marinos	Rocas desnudas con fuerte pendiente
Edificado, vial o aparcamiento	Tejido urbano continuo
Ensanche	Tejido urbano continuo
Parque urbano	Zonas verdes urbanas
Casco urbano	Tejido urbano continuo
Cultural, educación o sanitario	Tejido urbano continuo
Zona comercial y oficinas	Zonas industriales y comerciales
Suelo no edificado y vivienda unifamiliar	Tejido urbano discontinuo
Edificado y zona verde artificial	Tejido urbano discontinuo
Huerta familiar	Tierras de labor
Complejo hotelero	Urbanizaciones ajardinadas
Suelo no edificado	Zonas en construcción
Polígono industrial ordenado o aislado	Zonas industriales

**Figura 38:** tabla de equivalencias de usos entre la leyenda del mapa de usos de suelo SIOSE y los usos de suelo utilizados por CLC-2000.

Como se puede ver, los usos de CLC-2000 generalizan más, agrupan más usos del suelo bajo una misma clase, aunque también hay usos que no cambian como son los viñedos, olivares o frutales cítricos.

Con los usos definidos para CLC-2000, ya podemos calcular el número de curva *NC* que le corresponde a cada parcela. En España la aplicación del número de curva se ha extendido bajo la variación que se conoce por el parámetro del umbral de escorrentía (*P<sub>0</sub>*), que en términos del SCS se corresponde con la abstracción inicial. De nuevo se trabaja con tablas que relacionan el uso del suelo con su umbral de escorrentía, del cual posteriormente se obtendrá el *NC* mediante la siguiente fórmula:

$$P_0 = 0.2S = 0.2 \left( \frac{25400}{NC} - 254 \right) = \frac{5080}{NC} - 50.8$$

**Figura 39:** fórmula para el cálculo del parámetro *NC* a partir del umbral de escorrentía (*P<sub>0</sub>*), (Ferrer, 2004).

USO DE SUELO CORINE LAND COVER-2000	SLOPE	A_Po	B_Po	C_Po	D_Po	NC_A	NC_B	NC_C	NC_D
Zonas portuarias		1	1	1	1	98	98	98	98
Aeropuertos		2	2	2	2	96	96	96	96
Afloramientos rocosos y canchales		3	3	3	3	94	94	94	94
Almacenamiento de agua		10	10	10	10	84	84	84	84
Autopistas, autovías y terrenos asociados		1	1	1	1	98	98	98	98
Bosques/zonas de coníferas		90	47	31	23	36	52	62	69
Campos de golf		79	32	18	13	39	61	74	80
Cultivos anuales en seco		67	27	16	11	43	65	76	82

Cultivos herbáceos de regadío	>=3%	42	23	14	11	55	69	78	82
Cultivos herbáceos de regadío	<3%	47	25	16	13	52	67	76	80
Mosaico de cultivos mixtos en seco y regadío	>=3%	34	20	13	10	60	72	80	84
Mosaico de cultivos mixtos en seco y regadío	<3%	37	22	14	11	58	70	78	82
Equipamientos y servicios		6	4	3	3	89	93	94	94
Escombreras y vertederos		20	11	8	6	72	82	86	89
Frondosas perennifolias		90	47	31	23	36	52	62	69
Frutales cítricos	<3%	94	42	22	15	35	55	70	77
Frutales cítricos	>=3%	79	34	19	14	39	60	73	78
Frutales tropicales	<3%	94	42	22	15	35	55	70	77
Frutales tropicales	>=3%	79	34	19	14	39	60	73	77
Viñedos	<3%	76	34	19	14	40	60	73	78
Viñedos	>=3%	62	26	15	10	45	66	77	84
Granjas agrícolas/ganaderos		24	14	8	6	68	78	86	89
Humedales y zonas pantanosas		2	2	2	2	96	96	96	96
Zona de extracción minera		16	9	6	5	76	85	89.4	91
Instalaciones deportivas y recreativas		53	23	14	10	49	69	78	84
Matorral boscoso de coníferas		76	34	22	16	40	60	70	76
Olivares	<3%	76	34	19	14	40	60	73	79
Olivares	>=3%	62	26	15	10	45	66	77	84
Pastizales, prados o praderas con arbolado	<3%	79	35	17	10	39	59	75	84
Pastizales, prados o praderas con arbolado	>=3%	53	23	14	9	49	69	78	85
Playas y dunas		15	15	15	15	77	77	77	77
Ramblas con algo de vegetación		15	8	6	4	77	86	89	93
Rocas desnudas con fuerte pendiente		2	2	2	2	96	96	96	96
Tejido urbano continuo		1	1	1	1	98	98	98	98
Zonas verdes urbanas		53	23	14	10	49	69	78	84
Zonas industriales y comerciales		6	4	3	3	89	93	94	94
Tejido urbano discontinuo		24	14	8	6	68	78	86	89
Tierras de labor		34	21	14	12	60	71	78	81
Urbanizaciones ajardinadas		24	14	8	6	68	78	86	89
Zonas en construcción		24	14	8	6	68	78	86	89
Zonas industriales		12	7	5	4	81	88	91	93

**Figura 40:** tabla del parámetro umbral de escorrentía ( $P_o$ ) para los cuatro grupos texturales (A,B,C y D) y sus correspondientes números de curva (NC) calculados mediante la fórmula  $5080/(50.8+P_o)$ , (Ferrer,2004).

\*En la tabla se observa el campo "slope", ya que dependiendo de si la pendiente de la parcela es  $>$  ó  $<$  al 3% el NC puede variar (para todos usos que tengan que ver urbano, el parámetro de la pendiente no influye). También hay usos como "urbanizaciones ajardinadas, zonas en construcción y tejido urbano

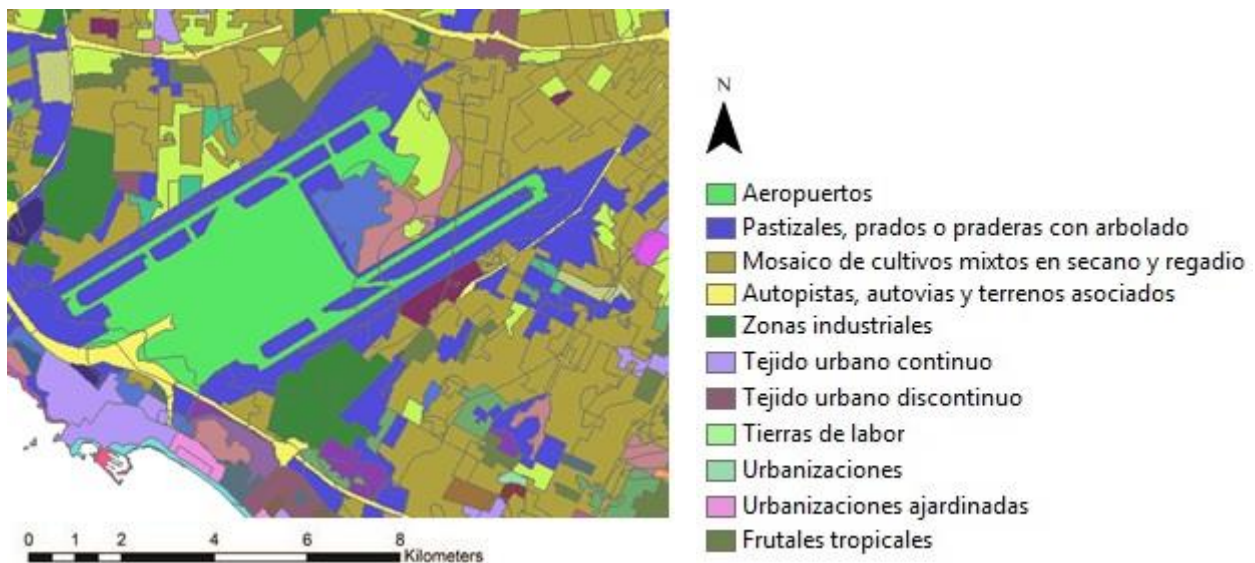
discontinuo” en los que se observa un Po (y por tanto un NC) común debido a que la escorrentía superficial se comporta de la misma manera.

Para el último paso se usará de nuevo la **herramienta identity** entre la capa de “texturas del suelo” creada anteriormente y la capa actual de “usos del suelo” con los NC de cada uso. En la capa de salida resultante vemos que ahora tenemos un nuevo campo donde se indican las texturas del suelo clasificadas en los cuatro grupos texturales (A,B,C y D) junto a los campos de los parámetros umbral de escorrentía (Po) y número de curva (NC). Para saber definitivamente que NC corresponde a cada parcela en función de su grupo textural solo debemos hacer una selección por atributos y poner el resultado final en un nuevo campo llamado “**NC\_final**”.

DESCR 1	USOS SUELO *	A	B	C	D	NC A	NC B	NC C	NC D	grupo text	NC final
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	B	52
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	B	52
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	A	36
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	C	62
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	D	69
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	B	52
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	B	52
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	A	36
Coníferas	Bosques/zonas de coníferas	90	47	31	23	36	52	62	69	A	36

**Figura 41:** detalle de la tabla de atributos de la capa “usos\_del\_suelo” con el NC final para cada parcela.

El “**NC\_final**” varía para un mismo uso dependiendo del grupo textural que tenga la parcela en cuestión. En este ejemplo se observa como del uso “bosques/zonas de coníferas” se tienen parcelas con los cuatro grupos texturales A,B,C y D, y por tanto con los cuatro NC diferentes: 36, 52, 62 y 69.



**Figura 42:** detalle de la capa “usos\_del\_suelo” para la zona del aeropuerto.

#### 6.1.4 Modelo de cuenca mediante HEC-GeoHMS:

El paquete informático seleccionado para llevar a cabo el modelo hidrometeorológico es HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelic System) ya que permite hacer todo tipo de simulaciones de eventos hidrológicos y obtener datos como caudales punta o hidrogramas de salida de la cuenca. HEC-HMS trabaja mediante proyectos que están formados por tres componentes: modelo de cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control.

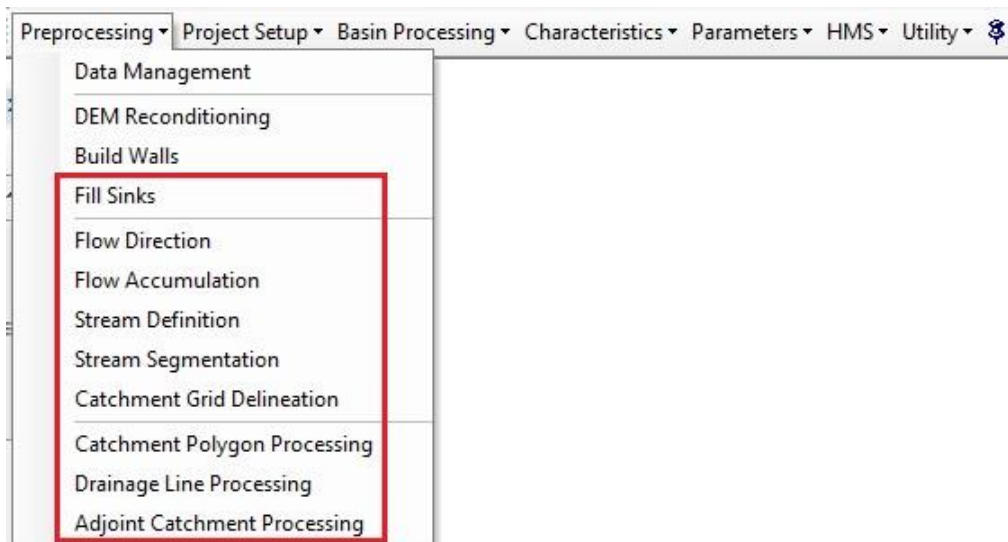
Para introducir los datos correctos en HMS primero se debe realizar un pre-proceso de la información de que dispongamos, es entonces cuando usaremos la extensión HEC-GeoHMS en conjunto con ArcGis para realizar estos trabajos.

➤ **Delimitación de sub-cuencas mediante la extensión HEC-GeoHMS.**

La simulación del proceso de transformación de lluvia en escorrentía en un modelo hidrológico se requiere la delineación previa de las cuencas y red de drenaje. Tradicionalmente esta tarea se ha realizado de forma manual a partir de la información proporcionada por los mapas topográficos, pero el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido automatizar este proceso. Estos sistemas utilizan como información de entrada modelos digitales del terreno (MDT, que almacenan la información en formato raster) en los que los parámetros morfo-métricos de la cuenca se obtienen utilizando algoritmos que dan lugar al pre-procesado del terreno (conocido como ***terrain pre-processing***).

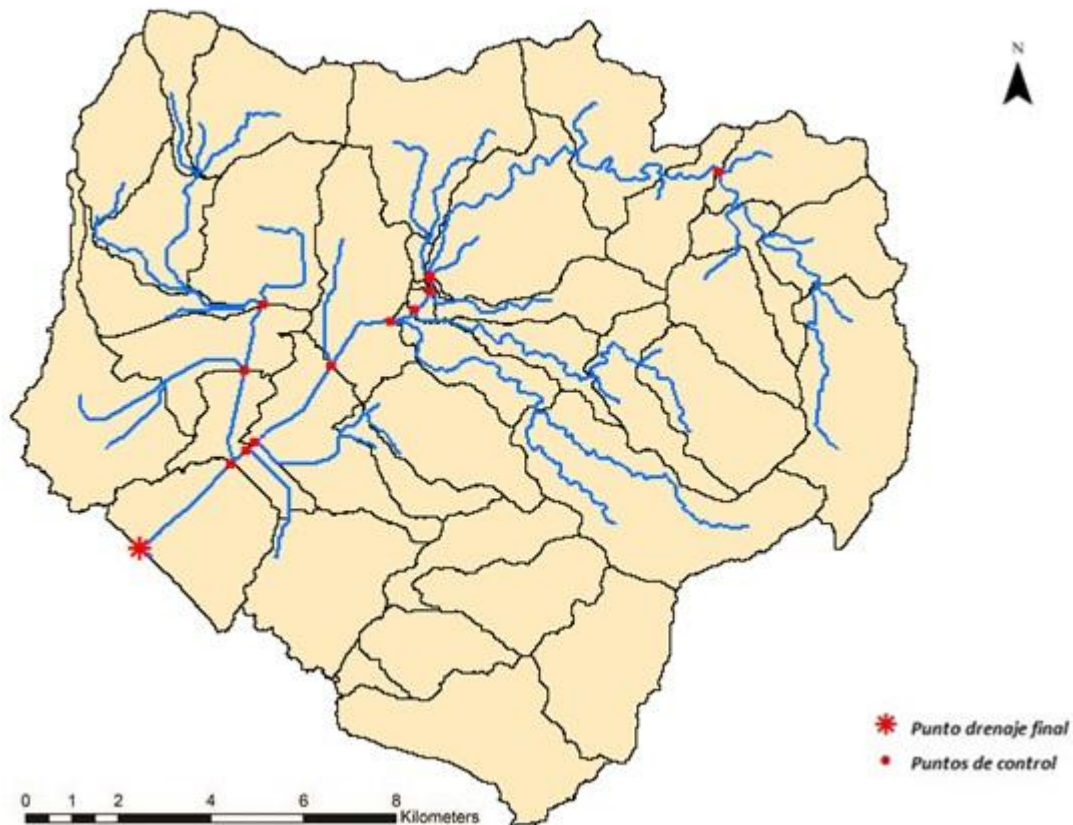
Para llevar a cabo este pre-proceso se debe instalar en ArcGis la **extensión HEC-GeoHMS**, que permite obtener un modelo de cuenca asociado a una red de drenaje y que es exportable al software HEC-HMS para simulación de eventos hidrológicos. Una vez activada la extensión, nos saldrá una nueva barra de herramientas en nuestro espacio de trabajo de ArcMap que contiene varios menús desplegables. El primero en ser empleado será el menú *Pre-processing*.

Las funciones recogidas en el menú (encuadradas en rojo) deben seguirse de forma secuencial en orden descendente que van generando y procesando una serie de capas en formato raster, de esta forma se obtendrá un modelo con las cuencas y la red de drenaje delimitadas a partir del MDT seleccionado.



**Figura 43:** Menú *pre-processing* de la extensión HEC-GeoHMS para ArcGis.

Una vez que tenemos el modelo de la cuenca y la red de drenaje, el siguiente paso es aplicar la herramienta *“Watershed processing”* para delinear el área drenante de cada sub-cuenca a puntos de control (por ejemplo estaciones de aforo) que en nuestro caso simplemente van a ser los puntos donde la red de drenaje cambia de sub-cuenca y el punto de desagüe final. Estos puntos de control tienen una gran utilidad si se trabaja en áreas grandes ya que te permiten comprobar los parámetros de cada sub-cuenca y modificarlos si es preciso.



**Figura 44:** modelo de cuenca y red de drenaje obtenidos mediante las funciones “Terrain Preprocessing” y “Watershed preprocessing” de HEC-GeoHMS.

Una vez tengamos las sub-cuencas definidas, debemos atribuir a cada una de ellas su número de curva (NC) correspondiente. Para ello debemos usar las capas creadas anteriormente (pendientes, texturas del suelo y usos del suelo) ya que contienen toda la información relativa a dicho parámetro.

➤ **Asignación del parámetro número de curva (NC) a cada sub-cuenca.**

Pasamos las tres capas de las que partimos a formato raster (las capas texturas y usos del suelo estaban en vectorial) ya que es mejor operar en ese formato. Una vez que tenemos todas las capas en común, vamos a aplicar la herramienta del *módulo de análisis espacial* > “Aggregate”, con el fin de reducir el tamaño de celda de las capas **de 2x2 a 10x10**. En los siguientes pasos en los que intervienen las tres capas no es necesaria una resolución tan detallada, por ese motivo se opta por reducir la resolución con el fin de aligerar los cálculos del programa.

Con las tres capas en formato raster a resolución de 10x10, usamos la herramienta “combine” y el resultado será una única capa de salida llamada “COMBINADA” con una serie de combinaciones posibles resultantes de las tres capas anteriores. Después debemos añadir 3 campos a la tabla de atributos de la capa de salida e ir indicando a que corresponde cada combinación.

Rowid	VALUE	COUNT	PEND_10X10	TEXTURAS_10	USOS_RASTER10	SLOPE	TIPO_TEXTURA	TIPO_USOS
135	136	30781	1	1	36	<3%	C	Aeropuertos
137	138	2555	2	1	36	>=3%	C	Aeropuertos
201	202	813	1	3	36	<3%	B	Aeropuertos
203	204	56	2	3	36	>=3%	B	Aeropuertos
207	208	13	1	4	36	<3%	D	Aeropuertos
217	218	838	1	2	36	<3%	A	Aeropuertos
218	219	267	2	2	36	>=3%	A	Aeropuertos
200	201	178	1	2	22	<3%	A	Afloramientos rocosos y canchales
202	203	744	2	2	22	>=3%	A	Afloramientos rocosos y canchales
166	167	282	2	3	37	>=3%	B	Almacenamiento de agua

**Figura 45:** tabla de atributos de la capa "COMB\_s\_u\_t" tras aplicar la herramienta "combine".

Como se puede ver en la figura anterior, a las tres capas iniciales se les ha designado un código numérico que se corresponde con sus atributos:

Código	Tipo textura	Código	Pendiente
1	C	1	<3%
2	A	2	>=3%
3	B		
4	D		

Los usos del suelo toman valores numéricos que van desde el 1 hasta el 39, es decir, hay **un total de 39 usos del suelo** para nuestra área de estudio.

Ahora que ya sabemos que pendiente, textura y uso corresponde a cada celda o conjunto de celdas podemos pasar a calcular el parámetro número de curva. Para facilitar esta tarea, vamos a hacer una unión (*join*) entre la tabla anteriormente creada en Excel (*ver figura 40*) y esta última capa "**COMBINADA**", de esta manera incluimos en la tabla de atributos el parámetro NC. Y por último, creamos un nuevo campo llamado "**NC\_final**" donde aparece el número de curva correspondiente a cada grupo de celdas basado en la combinación de los tres parámetros iniciales (pendiente, texturas y usos del suelo).

SLOPE	TIPO_TEXTURA	TIPO_USOS	P_A	PO_B	PO_C	PO_D	NC_A	NC_B	NC_C	NC_D	NC_FINAL
<3%	B	Pastizales, prados o praderas con arbolado	79	35	17	10	39	59	75	84	59
>=3%	A	Pastizales, prados o praderas con arbolado	53	23	14	9	49	69	78	85	49
<3%	A	Pastizales, prados o praderas con arbolado	79	35	17	10	39	59	75	84	39
<3%	D	Pastizales, prados o praderas con arbolado	79	35	17	10	39	59	75	84	84
>=3%	D	Pastizales, prados o praderas con arbolado	53	23	14	9	49	69	78	85	85
>=3%	A	Playas y dunas	15	15	15	15	77	77	77	77	77
<3%	A	Playas y dunas	15	15	15	15	77	77	77	77	77
>=3%	C	Ramblas con algo de vegetacion	15	8	6	4	77	86	89	93	89

**Figura 46:** extracto de la tabla de atributos de la capa "COMBINADA" donde el último campo indica el valor del parámetro número de curva final.

Como podemos ver, para un mismo uso del suelo se dan valores diferentes del umbral de escorrentía dependiendo de la pendiente y del grupo textural. Cada valor final del número de curva viene definido por la combinación de los tres factores, en la tabla de atributos se muestran todas las combinaciones posibles que hacen un total de 240 registros. Un ejemplo de combinaciones sería:

- Para pastizales, prados o praderas con una pendiente <3% y grupo textural predominante tipo B, el valor del número de curva será **59**.
- Para pastizales, prados o praderas con una pendiente <3% y grupo textural predominante tipo A, el valor del número de curva será **39**.

Ya tenemos el valor NC asignado a cada conjunto de celdas, pero nos encontramos con el problema de que 240 registros o combinaciones diferentes es un número muy elevado para trabajar de una forma eficaz, el siguiente paso por tanto será reducir ese número de registros.

Pasamos la última capa obtenida **“COMBINADA”** de formato raster a vectorial y aplicamos la herramienta **“intersect”** entre la capa de sub-cuencas obtenida mediante HEC-GeoHMS y la capa COMBINADA, de esta forma solo nos quedamos con el área que intersectan ambas. Como resultado tenemos que ahora cada sub-cuenca está compuesta por varios polígonos con un NC diferente para cada uno de ellos, hay que unificarlos bajo un NC común.

Para unificar los polígonos correctamente bajo una misma sub-cuenca debemos ponderarlos por su área, ya que no todos tienen el mismo tamaño, de este modo evitamos que el resultado se distorsione por la variable área. Cada sub-cuenca cuenta con un identificador ID, lo único que debemos hacer es seleccionar por atributos todos los polígonos que pertenezcan a un mismo ID y añadir los siguientes campos:

- Campo **“área\_km”**: con la herramienta de campos calculate geometry sacamos el área de cada polígono.
- Campo **“ponderación”**: dividimos el área de cada polígono por la suma total de todas las áreas (la suma de las áreas que componen esa sub-cuenca registrada por un ID).
- Campo **“NC\_medio”**: multiplicamos el resultado del campo ponderación por el valor del número de curva inicial de ese polígono (el calculado en la capa COMBINADA).

GridID	NextDownID	RiverOrder	area_km	pondera	NC_medio	NC_subcuen
16	29	1	0.007335	0.339937	0.203962	71.3
16	29	1	0.110664	5.12874	4.00042	71.3
16	29	1	0.237278	10.9967	6.59802	71.3
17	21	1	0.003497	0.074829	0.044898	59.23
17	21	1	0.000442	0.009468	0.006628	59.23
17	21	1	0.0001	0.00214	0.001177	59.23
17	21	1	0.000137	0.002922	0.002045	59.23
17	21	1	0.005937	0.127047	0.076228	59.23
17	21	1	0.00067	0.014344	0.008606	59.23

Ahora cada sub-cuenca estará compuesta por un número determinado de pequeños polígonos, con áreas diferentes pero similares números de curva, por lo tanto asumimos que ese valor de NC es el valor de toda la sub-cuenca (podemos asumirlo porque previamente hemos ponderado por el área) y de esta forma reducimos el registro de datos de 240 a 39, que son las sub-cuencas que previamente nos delimito HEC-GeoHMS.

De nuevo con el fin de seguir reduciendo el número de datos a tratar y concretar bien las sub-cuencas que conforman la cuenca del Pla Sant Jordi, aplicamos el criterio de **unión de cuencas aguas abajo si la diferencia entre sus números de curva es como máximo de un 10%**. Se trata de un criterio muy usado en hidrología de superficie que sirve para generalizar cuencas con similares comportamientos a la escorrentía superficial, y de este modo simplificar el cálculo en programas como HEC-HMS (nuestro siguiente paso).

El proceso es el mismo que el anterior, como esta unión vuelve a afectar al NC total ya calculado, se debe volver a recalcular, ya que de nuevo el área influye. Ponderamos por las nuevas áreas una vez unidas las sub-cuencas posibles (aquellas cuya diferencia sea como máximo un 10% de sus NC) y obtenemos, ahora sí, el valor final de NC, el cual usaremos para el programa HEC-HMS.

GridID	NextDownID	RiverOrder	area_km	NC_subcuen	ponde	NC_FINAL	Sum_NCfin
25	24	5	3.39675	58.47	0.189276	11.067	58.18
29	50	3	3.81102	67.31	0.165038	11.1087	65.99
30	43	1	4.23312	67.13	0.183317	12.3061	65.99
31	26	2	2.40581	69.77	0.102667	7.16308	72.78
34	49	1	6.87035	63.62	0.297523	18.9284	65.99
35	32	2	4.08923	75.4	0.174507	13.1578	72.78

Si compramos las columnas **NC\_subcuenca** y **Sum\_NCfin** podemos observar como el NC cambia un poco de una a otra, eso es debido a la ponderación areal. Y de nuevo hemos reducido el número de registros de 39 a 12, con lo que nos quedan 12 sub-cuencas para trabajar con ellas en HEC-HMS.

➤ **Asignación del valor de precipitación a cada sub-cuenca mediante el método Kriging.**

En este apartado se pretende calcular la cantidad de precipitaciones que se le va a asignar a cada una de las 12 sub-cuencas, este parámetro es muy importante ya que después debemos introducirlo en HMS para poder crear el modelo meteorológico.

Contamos con datos de series pluviométricas cuyos periodos de registro son bastante largos, por lo tanto usaremos tomamos esos datos como fiables, pero el inconveniente viene dado porque hay cuencas que no tienen estaciones meteorológicas cerca y por tanto no sería exacto asignarle el valor de la más cercana (algunas pueden estar a decenas de km) ya que posiblemente no tengan la misma cantidad de precipitaciones.

Se propone usar el método kriging, un procedimiento geoestadístico que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos mediante su interpolación. Presupone que la distancia entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar las variaciones del fenómeno estudiado.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

**Figura 47:** fórmula general del método kriging, la interpolación se forma como una suma ponderada de los datos. ([www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)).

ArcGis tiene una herramienta que te permite aplicar este método y es la que usaremos en este caso, se encuentra dentro del módulo de análisis espacial > **“Kriging”**. Antes de aplicarla, debemos sacar los centroides de cada sub-cuenca ya que como no disponemos de estaciones suficientes para dar cobertura a toda el área, trabajaremos con ellos. El centroide va a representar el punto promedio de cada polígono de sub-cuenca y hay varias formas de obtenerlos, la más precisa es mediante coordenadas X-Y.

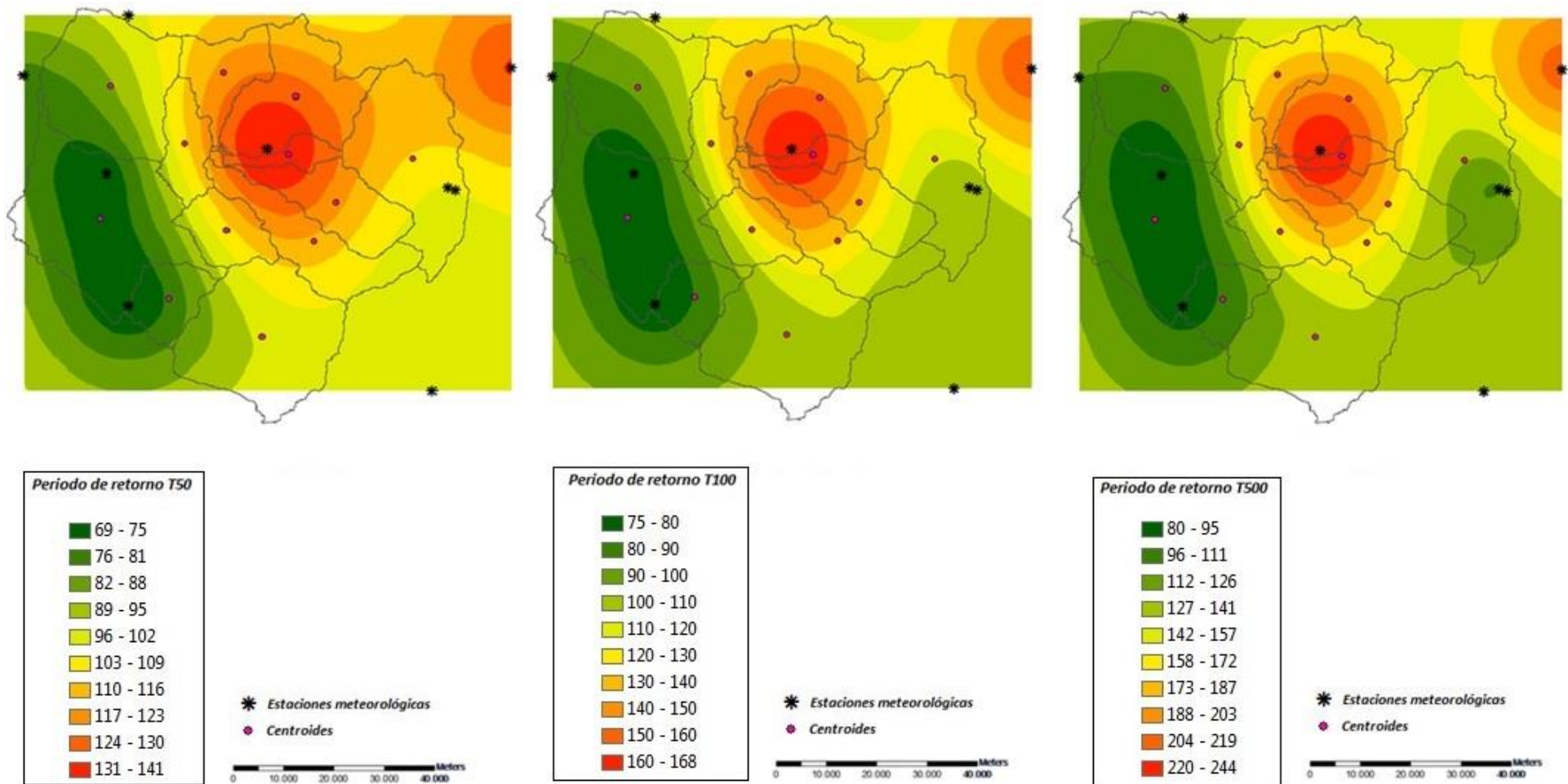
Debemos añadir a la tabla de atributos de la capa de centroides dos campos donde pondremos las coordenadas X-Y, y con la herramienta **“calcular geometry” > property X ó Y coordinate of centroid**, de este modo tendremos las coordenadas basadas en nuestro sistema de proyección. Después exportamos esas coordenadas a una tabla Excel y volvemos a añadirla al entorno de ArcGis como tabla de datos. El último paso es aplicar a esa tabla la opción **“Display XY data”** que proyectará en la capa esas coordenadas en forma de puntos, indicando así los centroides.

El método de interpolación kriging será aplicado tres veces, ya que queremos calcular el periodo de retorno de las precipitaciones para T50, T100 y T500 años. Partimos de los datos de precipitación obtenidos para las 9 estaciones iniciales (los cuantiles) e interpolaremos esos datos al centro de cada sub-cuenca (el centroide) para saber con más precisión las precipitaciones caídas en esos puntos.

FID	Shape *	METEOID	MHUSO	MXUTM	MYUTM	METEOCOTA	METEONOM	MPROVI	T_50	T_100	T_500
0	Point	B273	31	478804	438581	152	MARRATXI LA CABANETA	BALEARE	99	113	128
1	Point	B275B	31	474815	438351	44	MARRATXI 'SON BONET'	BALEARE	79	89	113
2	Point	B278	31	478000	437977	4	PALMA 'AEROPUERTO SON SAN JUAN	BALEARE	70	72	76
3	Point	B279	31	478821	437471	18	PALMA PORCIUNCULA	BALEARE	67	73	86
4	Point	B282	31	484110	438071	62	PALMA XORRIGO	BALEARE	140	164	230
5	Point	B334	31	490421	437142	140	LLUCMAJOR II	BALEARE	96	105	128
6	Point	B670	31	491004	437922	194	ALGAIDA FARMACIA	BALEARE	100	104	111
7	Point	B670A	31	491314	437913	191	ALGAIDA	BALEARE	101	109	127
8	Point	B671	31	493418	438381	155	ALGAIDA 'SON BOU'	BALEARE	129	149	200

**Figura 48:** tabla de atributos de la capa de estaciones meteorológicas con los datos de cuantiles de precipitación para cada periodo de retorno.

\*Recordamos que los datos de cuantiles de precipitación (mm/día) han sido obtenidos mediante el ajuste del test de bondad y los gráficos de CHAC (*apartado 5.1.1, análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias*) y se muestran detallados en el apartado de resultados.

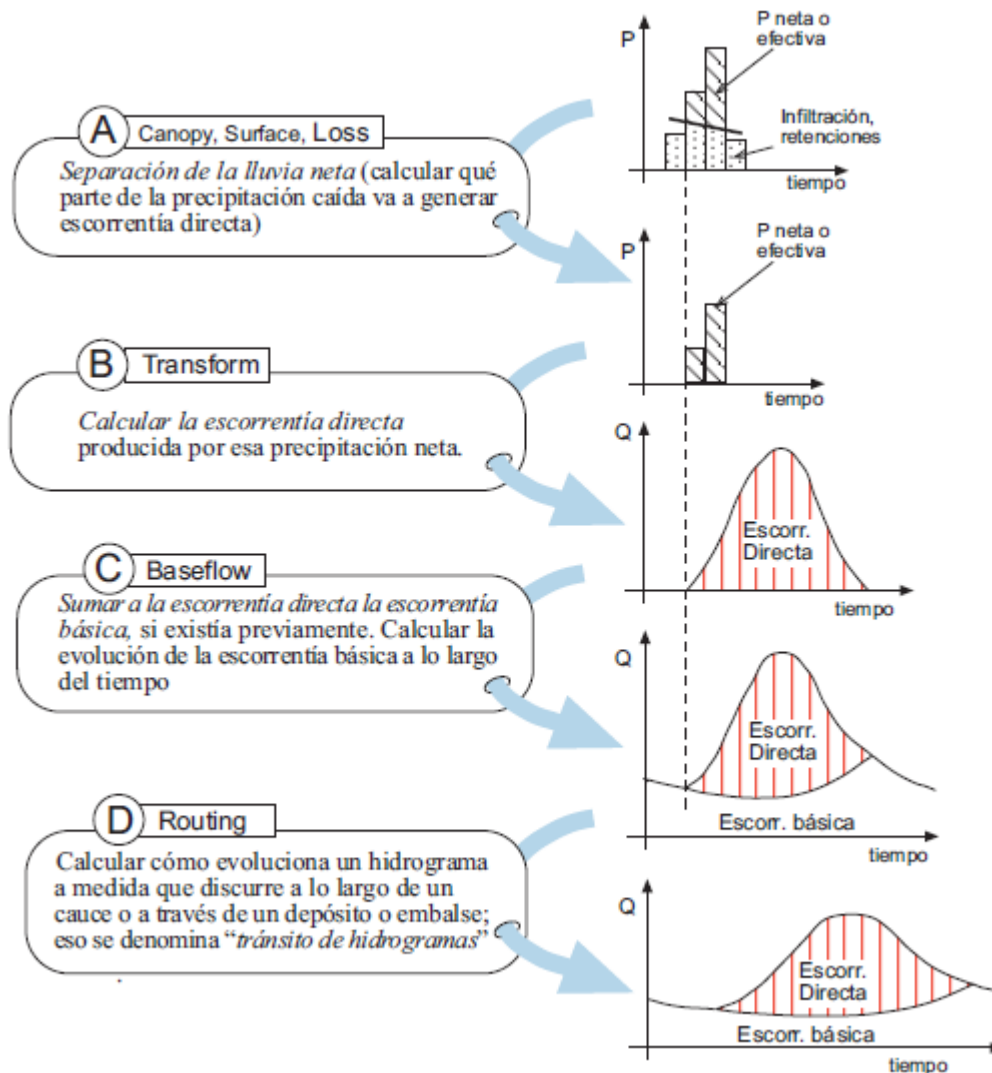


**Figura 49:** mapas kriging para asignar precipitaciones a las subcuencas de los periodos de retorno T50, T100 y T500 años mediante ArcGis.

Una vez tenemos los mapas, debemos ir asignando las precipitaciones a cada centroide, de ese modo ya sabremos cual es la precipitación estimada para cada sub-cuenca. Se puede ver cómo cambian las precipitaciones según el periodo de retorno, el cambio más acusado se da como es lógico entre el periodo de 50 y 500 años.

### 6.1.5 Modelo hidrometeorológico mediante software HEC-HMS:

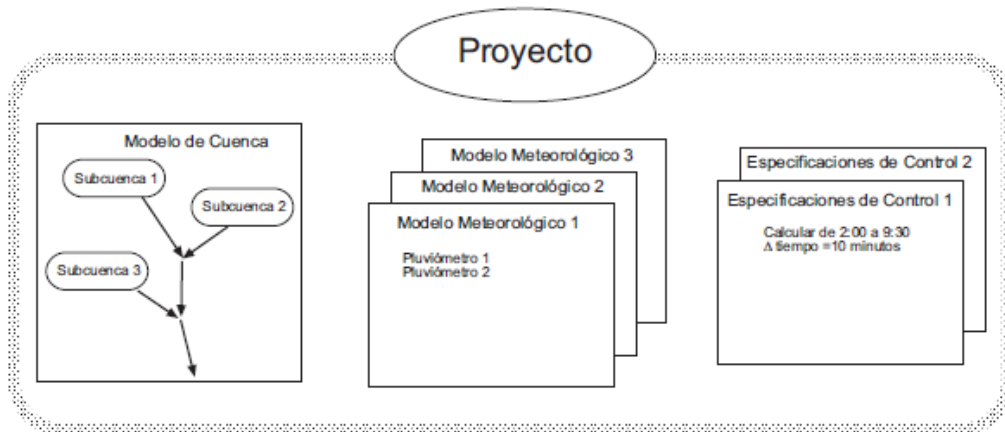
Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, HMS es un programa que pretende calcular el hidrograma producido por una cuenca facilitándole datos físicos y de precipitaciones de esta. El programa consta de varias fases de trabajo:



**Figura 50:** ilustración explicativa de las diferentes fases que sigue HEC-HMS (Sánchez San Román, 2013).

El pre-proceso del programa permite dividir la zona de estudio elegida en varias sub-cuenca (apartado anterior) y después va aplicando para cada una de ellas las fases A, B, C y la última fase D solo para cada tránsito a lo largo de un cauce (la evolución del hidrograma). Al final del proceso, se suman todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido y nos proporciona un hidrograma de salida de la cuenca tanto en forma numérica como gráfica.

HMS funciona por proyectos que se componen de tres fases: **modelo de cuenca**, **modelo meteorológico** y **especificaciones de control**.



El **modelo de cuenca** ya lo hemos obtenido y tratado en el apartado anterior, así que solo debemos vincular ese archivo a HMS (se pueden vincular archivos generados en ArcGis sin ningún problema) para que trabaje con esas sub-cuencas y sus características. HMS trabaja con una serie de parámetros que hay que ir completando para definir las características físicas e hidrológicas de cada sub-cuenca.

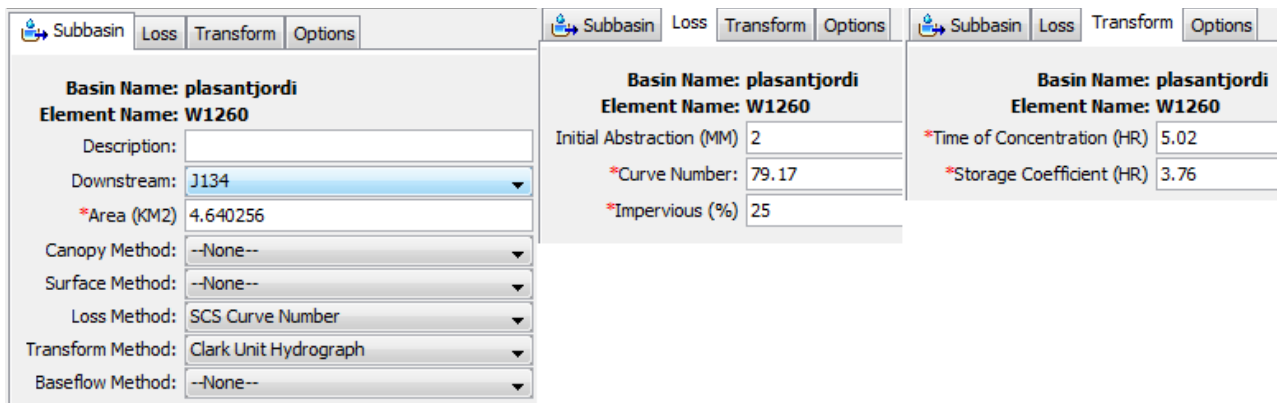


Figura 51: ejemplo de parámetro definidos para una sub-cuenca en HMS.

PARÁMETRO	MÉTODO	DEFINICIÓN
<b>Subbasin</b>	<b>SCS Curve Number</b>	Cómo se comporta la escorrentía según el número de curva
	<b>Clark Unit Hydrograph</b>	Clark 1945, se basa en computar el volumen de agua caído sobre la superficie de la cuenca y considerar el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de esta
<b>Loss</b>	<b>Initial Abstraction</b>	Cantidad de agua que el terreno es capaz de infiltrar y por tanto pasará a ser escorrentía subterránea.
	<b>Curve Number</b>	Número de curva de la sub-cuenca.
	<b>Impervious</b>	Permeabilidad en % de la sub-cuenca.
<b>Transform</b>	<b>Time of concentration</b>	Tiempo máximo de circulación del agua hasta el punto de cierre de la cuenca o de control.
	<b>Storage coefficient</b>	Coefficiente de almacenamiento del suelo.

Figura 52: cuadro resumen de los métodos HMS usados en nuestra simulación.

Hay algunos parámetros que deben ser calculados previamente, como ya hicimos con el número de curva (NC). El porcentaje de permeabilidad podemos estimarlo mediante el mapa de usos de suelo que ya tenemos, en zonas muy urbanizadas ese porcentaje será mayor. Para el tiempo de concentración ( $t_c$ ) tenemos:

$$t_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$$

donde:  $t_c$  = tiempo de concentración (horas)  
 $L$  = longitud del cauce (km.)  
 $S$  = pendiente media (m/m)

\*Fórmula matemática del tiempo de concentración ( $t_c$ ) más utilizada en España, definida por la *Dirección General de Carreteras (M.O.P.U., 1997), Instrucción de carreteras 5.2-IC.*

**El coeficiente de almacenamiento (R) en horas** puede calcularse como una fracción del ( $t_c$ ), multiplicando este por un factor del orden de 0.75 (*Sánchez San Román, 2012*). Debemos aplicar ambas fórmulas a todas las sub-cuencas ya que cambian de una a otra, para agilizar el proceso trabajamos en una hoja Excel.

		L (km)	S			Tc	coef. Almacenamiento	
16	0.3	15.935	0.1182	0.58634654	0.76	3.69072346	2.768042597	
17	0.3	13.701	0.1006	0.56318295	0.76	3.3928086	2.544606453	
20	0.3	7.122	0.0763	0.52557069	0.76	2.17479882	1.631099117	
23	0.3	13.752	0.1093	0.57498305	0.76	3.34920307	2.511902301	
37	0.3	4.438	0.0237	0.39236213	0.76	1.89575153	1.421813648	
45	0.3	3.273	0.0287	0.41159536	0.76	1.45038286	1.087787144	
46	0.3	11.039	0.1031	0.5666497	0.76	2.86568668	2.149265013	
50	0.3	19.949	0.0578	0.49032265	0.76	5.01527815	3.761458615	
52	0.3	14.937	0.0497	0.4721599	0.76	4.142416	3.106811999	
71	0.3	3.151	0.0433	0.45616501	0.76	1.30319481	0.977396105	
82	0.3	1.291	0.0138	0.34274393	0.76	0.82195525	0.616466436	
84	-	-	-	-	-	-	-	
en horas								

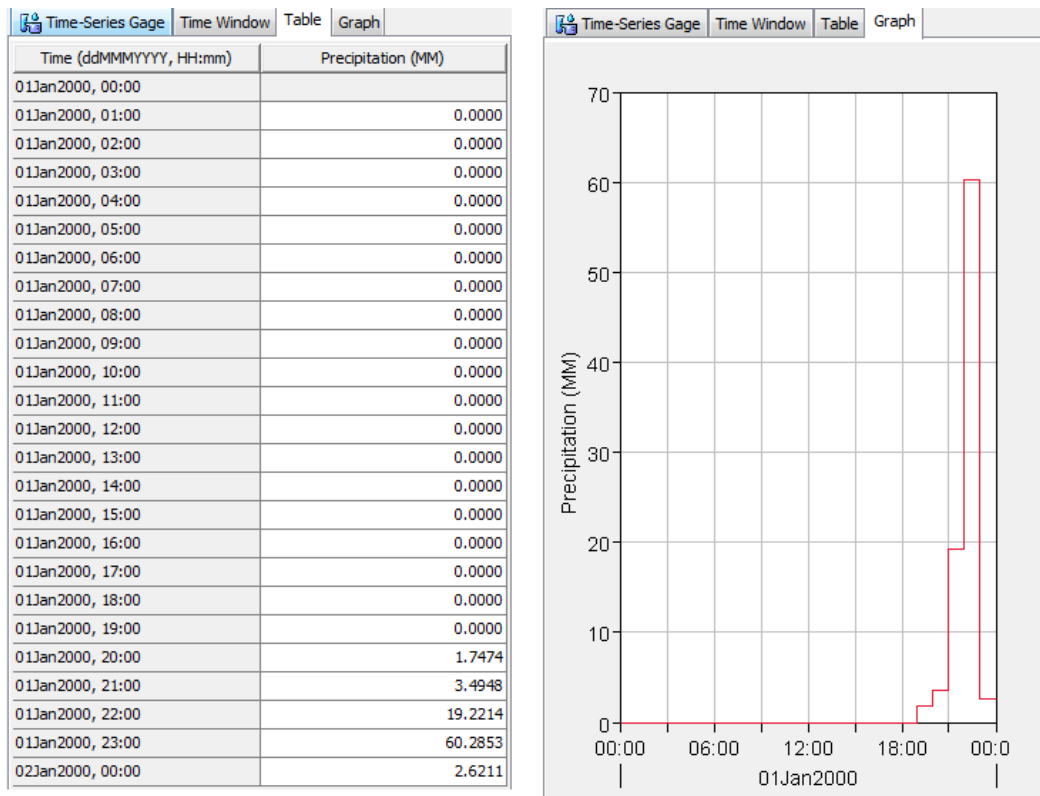
**El modelo meteorológico** tiene dos fases, una primera en la cual debemos introducir en el apartado "Time-Series Data Manager" las precipitaciones reales obtenidas previamente en el apartado de análisis estadístico de caudales y su forma de distribución temporal, es decir, los hietogramas obtenidos. La forma de esos hietogramas nos indica cómo se suelen distribuir las precipitaciones temporalmente (si por ejemplo la lluvia mantiene su intensidad durante todo el evento o si cae más al principio o al final) por lo tanto debemos distribuir las precipitaciones de cada estación meteorológica según este modelo para los tres periodos de retorno de T50, T100 y T500 años.

Se toman los datos pluviométricos de los cuatro eventos extraordinarios más significativos de los últimos 30 años que nos proporcionó la AEMET, son 4 días que tienen registro de datos completo (las 24 horas) y encajan con la serie anual de precipitaciones máximas diarias. Las fechas son:

Año	Mes	Día	Precipitación/día (mm)	Precipitación/hora (mm)
1991	Enero	25	27.4	1.141
2001	Septiembre	6	41.9	1.745
2008	Mayo	9	34.6	1.441
2010	Mayo	3	106.3	4.429

\*Todos los cálculos y explicaciones referentes al cálculo de hidrogramas se encuentran en la página 36 (apartado 6.1.2 análisis temporal de hietogramas de precipitaciones máximas diarias).

Una vez que tengamos introducidos todos los datos de precipitaciones, ya podemos crear los tres modelos meteorológicos T50, T100 y T500 con sus hidrogramas específicos. Se estima que según la media, los eventos tormentosos que afectan a nuestra área de estudio concentran todas sus precipitaciones en las últimas horas de la tarde, por lo tanto los datos se introducen con esa tendencia.



**Figura 53:** datos introducidos en “Time-Series Data Manager”. Se puede ver la distribución de las precipitaciones en un intervalo de 24 horas para el modelo de hietograma sesgado a la izquierda (sesgo negativo).

**Las especificaciones de control** simplemente tratan de indicarle al programa cuando debe empezar y terminar la simulación y el incremento de tiempo (*Time interval*) para efectuar los cálculos. El intervalo de tiempo será de 1 hora. En este caso determinamos como fecha de inicio las 00:00 horas del día 1 de enero hasta las 24:00 del día siguiente (día 2 de enero), de esta forma tendremos 2 horas de simulación, tiempo suficiente para que la escorrentía superficial “escurra”.

## 6.2 Metodología del análisis hidráulico.

Una vez obtenidos los caudales máximos diarios aplicando el método hidrometeorológico y mediante el paquete informático HEC-HMS, lo que nos interesa conocer ahora es como circula por la cuenca esa escorrentía superficial. Los análisis hidráulicos tratan de modelizar el flujo del agua sobre la superficie topográfica, siguiendo la premisa de que el agua, como fluido que es, siempre se desplaza a favor de la gravedad (encajándose en valles, vaguadas, torrentes etc..).

Hay dos formas de simular este proceso según sea el tipo de movimiento: unidimensional y bidimensional. Para el análisis unidimensional se trabajara con el software HEC-RAS (de la misma familia que HEC-HMS) y para el análisis bidimensional se usará el software Iber 2D (2.0). En el mercado existen numerosos programas que hacen simulaciones similares (River2D, Sobek, TUFLOW...) pero se opta por estos dos por su eficacia y relativa simplicidad.

### 6.2.1 Análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS:

El paquete informático seleccionado para llevar a cabo el modelo hidráulico unidimensional es *HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)*, diseñado para simular unidimensionalmente el comportamiento del flujo de agua en ríos o canales naturales y de este modo averiguar si el caudal desborda el cauce o no, por tanto es muy útil en estudios de inundación para determinar zonas inundables. El programa trabaja con los caudales resultantes de HMS como información de partida y es capaz de generar modelos gráficos visibles en ArcGis. Para flujo constante, el procedimiento de cálculo que usa HEC-RAS está basado en la resolución de la ecuación de energía unidimensional (las pérdidas de energía se evalúan por fricción y contracción/expansión). Para flujo inestable, el programa trabaja con las ecuaciones de *Saint Venant*.

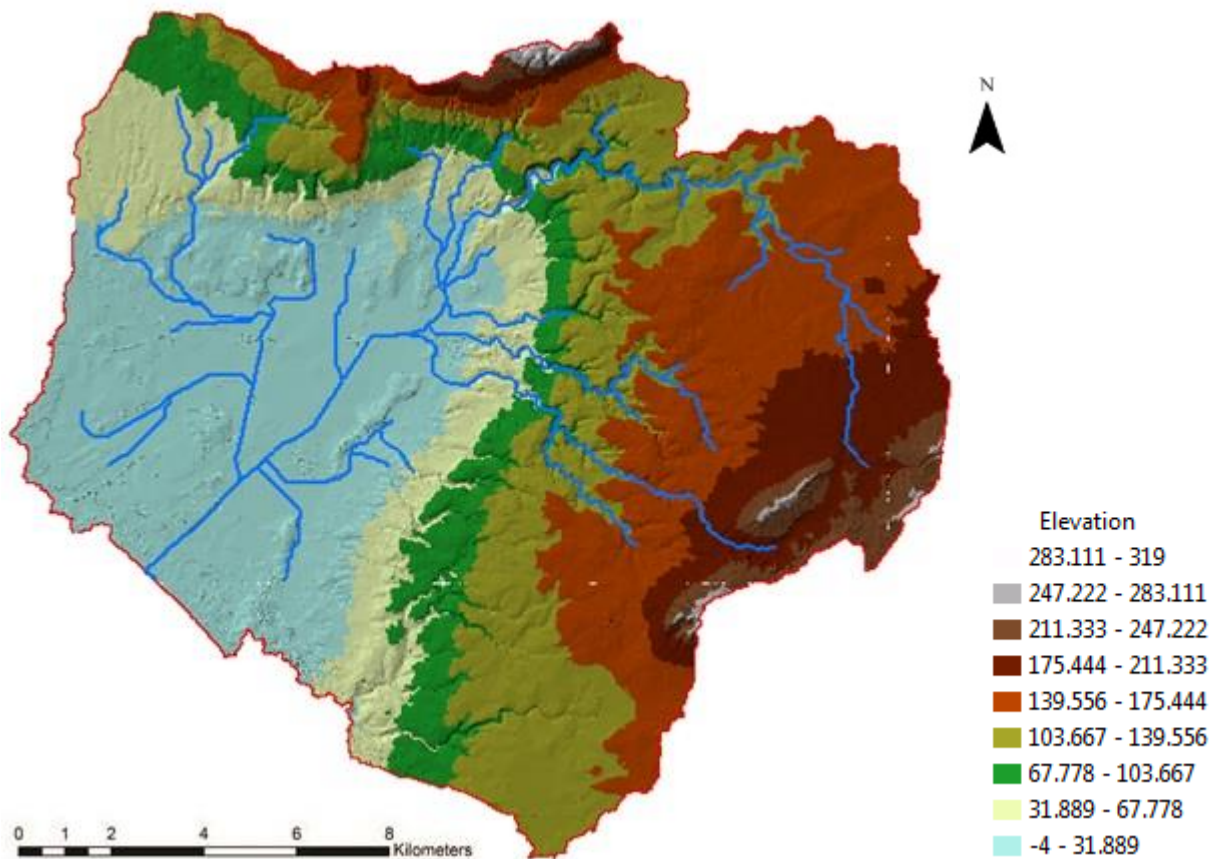
Un proyecto en RAS tiene varias fases, una primera llamada **pre-proceso** para la cual es necesario instalar en ArcGis una extensión llamada **HEC-GeoRas**, una segunda donde los resultados de la primera y HMS se introducen en **HEC-RAS** y una tercera y última fase de **exportación y visualización** de resultados de nuevo en ArcGis.

#### ➤ **Pre-proceso en ArcGis mediante la extensión HEC-GeoRas.**

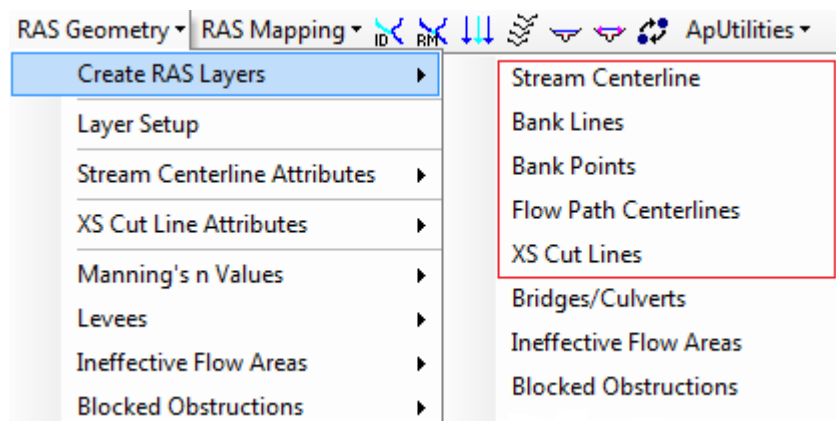
Se trata de un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno GIS complementar el trabajo en HEC-RAS. El resultado de este pre-proceso será un archivo de datos sobre la geometría del terreno estudiado, incluyendo el cauce del río/canal delimitado y secciones de análisis transversal del mismo. Este archivo será importado a HEC-RAS para su procesamiento.

Partimos del **modelo digital del terreno (MDT)** que nos dará una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar y nos permitirá caracterizar las formas del relieve de nuestra cuenca de estudio. Usaremos el mismo MDT que en otras ocasiones, con un tamaño de celda 2x2.

El programa no trabaja con datos raster por tanto debemos convertir el MDT a TIN. Para ello usamos la herramienta del menú **3D analyst > Raster to TIN**.

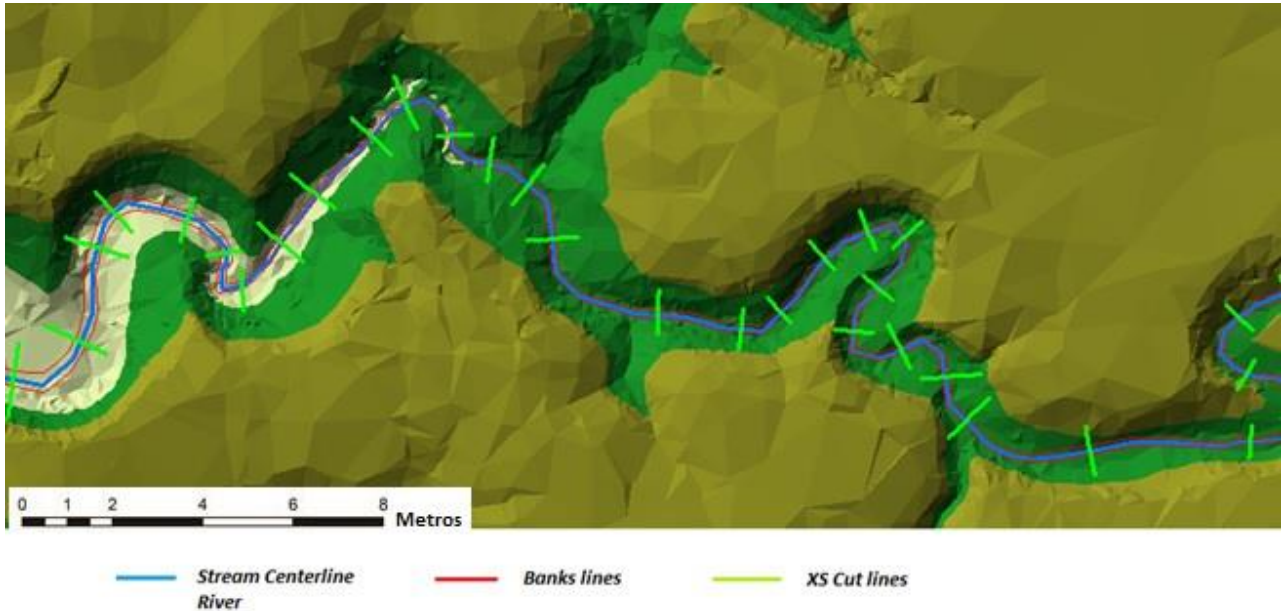


Una vez tenemos el TIN ya podemos empezar a trabajar con la extensión HEC-GeoRas. Su manejo es sencillo pero laborioso, lo único que debemos hacer es ir aplicando en orden todas las herramientas del menú RAS Geometry (como su propio nombre indica, queremos crear una geometría del cauce para después importarla a HEC-RAS). Destacar que en este caso, queremos la geometría de dos ramas del río, para ello repetiremos el proceso dos veces (GeoRas deja hacerlo a la vez, pero después suele dar errores en el punto de unión de ambas ramas del río).



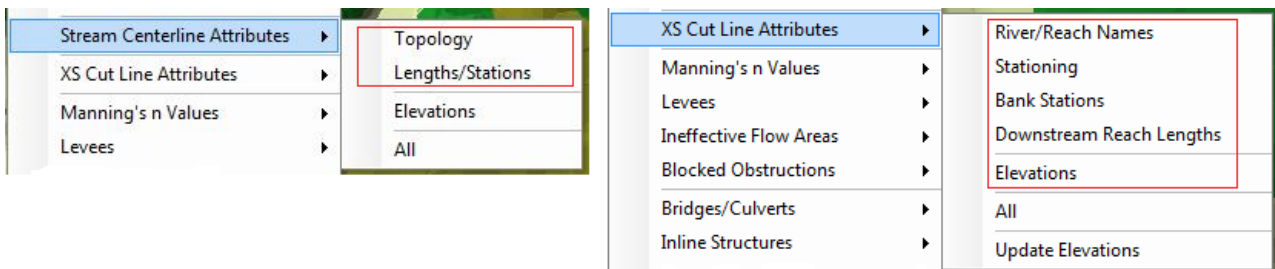
**Figura 54:** menú pre-proceso de la extensión HEC-GeoRas. Las herramientas encuadradas en rojo deben seguirse en orden descendente.

Estas herramientas nos permiten crear varias capas que manualmente hay que digitalizar con los elementos que se nos pide, las tres capas principales son: **Stream Centerline**, capa donde digitalizamos el centro del río que deseamos. **Banks lines**, capa donde marcamos cuales van a ser los límites del cauce del río. Y la más importante, **XS Cut lines**, donde generamos una capa de secciones transversales al río que nos permitirán ver la geometría del fondo del canal. Los criterios para dibujar las **XS Cut Lines** son principalmente que la línea debe cortar perpendicularmente al cauce, en cuanto a cuantas líneas poner, es algo que decide el usuario (depende del nivel de detalle que se quiera obtener).



**Figura 55:** detalle del TIN con las 3 capas de geometría creadas con la extensión HEC-GeoRas para el río principal que atraviesa el Pla de Sant Jordi.

El siguiente paso es el cálculo numérico con la extensión HEC-GeoRas de tal modo que ciertos datos como pueden ser elevación y topología se añaden a las capas creadas para que después RAS pueda trabajar con ellos. Usaremos varias herramientas de los menús **Stream Centerline Attributes** y **XS Cut Line Attributes**.

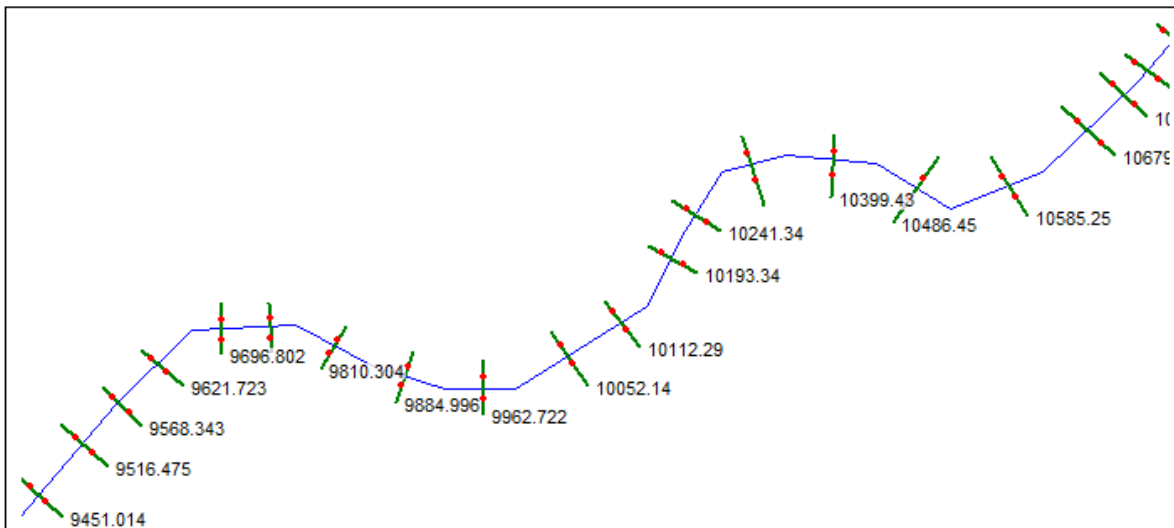
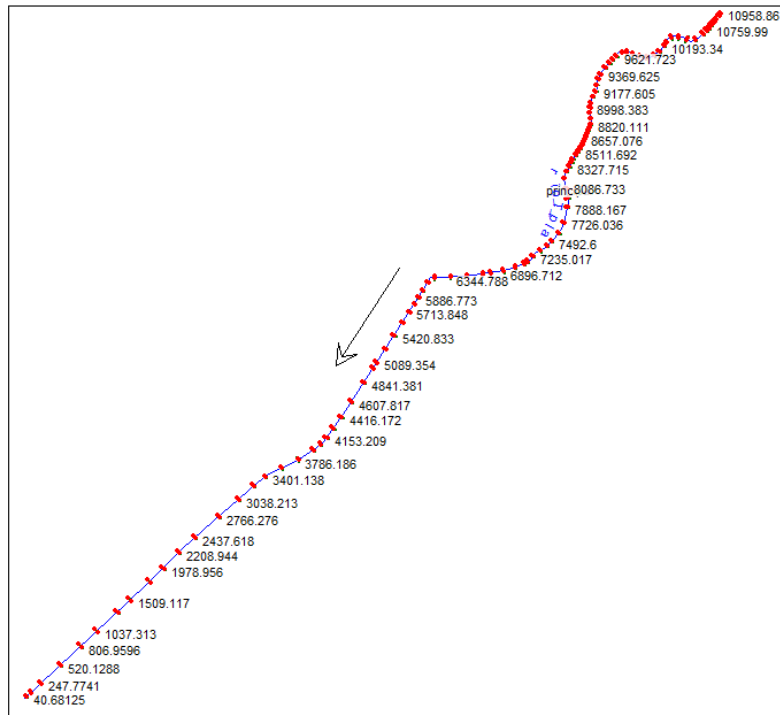


**Figura 56:** menús pre-proceso de la extensión HEC-GeoRas para el cálculo numérico. Las herramientas encuadradas en rojo deben seguirse en orden descendente.

Ya tenemos todo lo necesario para poder empezar a trabajar en HEC-RAS, solo debemos exportar todas estas capas que contienen los datos topográficos como un archivo GIS para su manejo en el programa RAS.

➤ **Preparación del modelo hidráulico con HEC-RAS.**

En este apartado se pretende modelizar el flujo de agua de la cuenca mediante el paquete informático HEC-RAS y generar un archivo de resultados que posteriormente será exportado a ArcGis para su visualización. Al abrir el archivo exportado desde ArcGis en RAS nos sale directamente la geometría del río con todas las secciones que hemos definido previamente, la visualizamos en la opción **Enter Geometric Data**.



**Figura 57:** geometría del cauce del río central de la cuenca del Pla de Sant Jordi. Arriba, geometría general de todo el cauce. Abajo, detalle del cauce, se puede identificar el río en azul, las secciones transversales en verde y las paredes del cauce indicadas por puntos rojos. Al lado de cada sección se encuentra su cota.

Una vez tengamos la geometría de río debemos asignar a cada tramo o sección transversal **el valor de la n-Manning** para el cálculo de la fricción a la que está sometida el agua y poder saber así su velocidad. En la cabecera, el río está formado por canales naturales encajados en torrentes o barrancos, pero en la parte baja el río se encauza en una acequia artificial construida para canalizar el agua y abastecer a las tierras de cultivos cercanas, por eso tenemos dos tipos de canales con condiciones específicas para cada uno de ellos y diferentes valores de n-Manning.

Tipo de canal	Mín.	Normal	Máx.
Canal natural, serpenteante con algunos pozos, matorrales y piedras.	0.060	0.050	0.060
Canal natural, serpenteante con pocos matorrales y piedras.	0.045	0.040	0.045
Canal natural, tramos que atraviesan praderas o zonas de cultivo.	0.040	0.035	0.040
Canal artificial, poco mantenimiento con maleza densa en el flujo y en los laterales.	0.060	0.080	0.060
Canal artificial, fondo limpio y poca maleza en los laterales.	0.040	0.045	0.040

Figura 58: tabla de los valores de n-Manning según el tipo de canal (*Manual hidráulica de canales*,

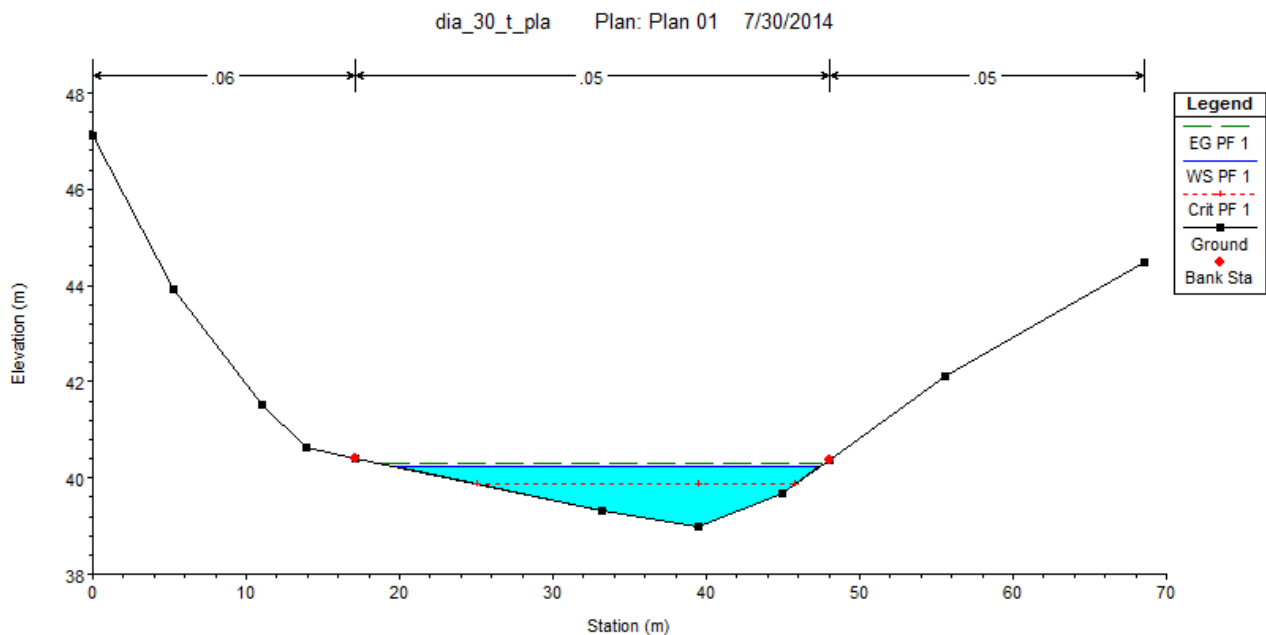
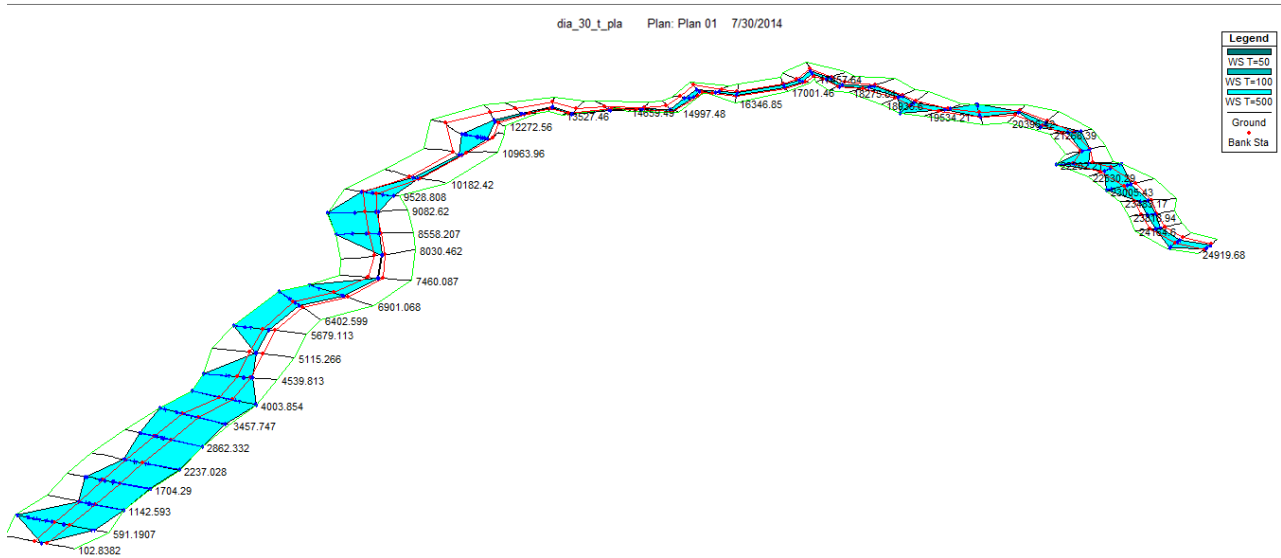


Figura 59: ejemplo de sección transversal del río principal del Pla de Sant Jordi para una simulación de periodo de retorno T50 años.

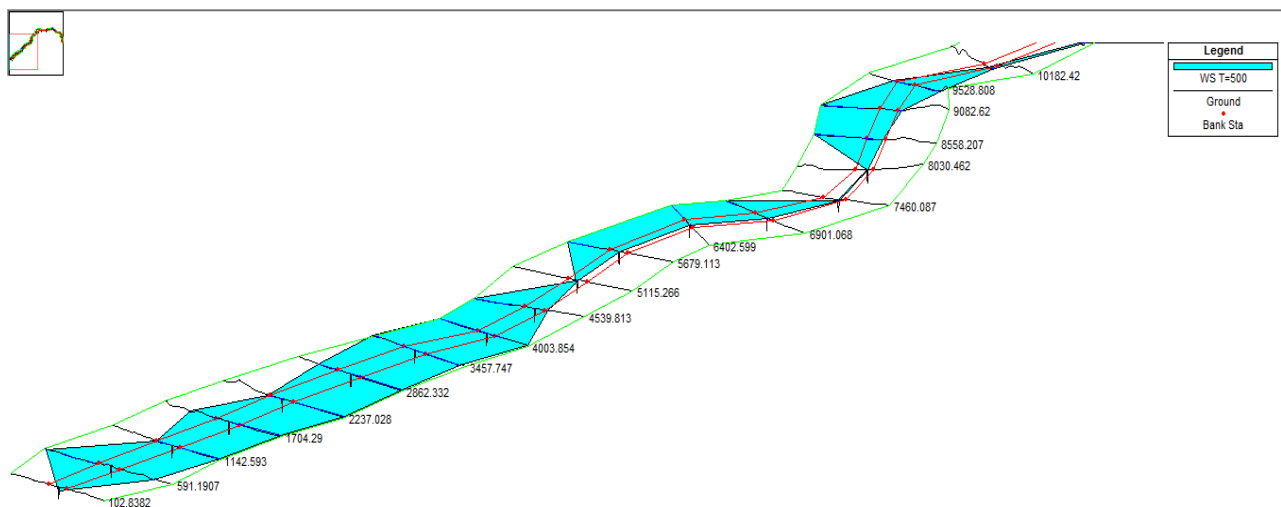
El ejemplo de **sección transversal** que vemos pertenece a la parte alta del río, donde el canal aún es natural. Se aprecia la típica geometría en forma de “V” que da lugar al encajamiento del cauce formando los torrentes que desembocan en el Pla. Los puntos rojos indican la situación de los “Banks”, que delimitan el cauce principal frente a lo que el programa ya considera llanura de inundación (HEC-RAS trata de forma diferente al cauce principal que a las llanuras en cuanto al cálculo de la rugosidad n-Manning se refiere). La zona coloreada de azul es la altura que alcanza la lámina de agua para esa simulación (puede ser T50, T100 o T500 años).

Por último, en la opción **Steady Flow Data** del menú principal de RAS debemos introducir los caudales punta que hemos obtenido en HMS para cada tramo del río ya que no tiene un caudal estándar, esta operación debemos realizarla tres veces ya que introducimos los caudales para T50, T100 y T500 años. También en este mismo menú, debemos completar las **condiciones de contorno del canal** (Boundary Conditions), que son aquellas que definen el comportamiento de un modelo en sus límites. HEC-RAS permite hacer modelizaciones en régimen de flujo permanente y define hasta cuatro tipos distintos de condiciones de contorno: *nivel de agua, calado crítico, curva de caudal y calado normal*.

En nuestro caso, usaremos el último tipo de condición, **calado normal o normal depth** (es el método más habitual) donde el flujo se aproxima al uniforme y el dato a entrar es la pendiente del tramo de influencia en tanto por uno. Una vez especificada el tipo de condición de contorno que vamos a usar ahora debemos definir si son para aguas arriba o aguas abajo. Esto depende del régimen de flujo previsto y tenemos tres opciones: *régimen supercrítico* (para aguas arriba), *régimen subcrítico* (para aguas abajo) y *régimen variable o mixto* (para ambos). En nuestro caso definiremos **régimen subcrítico para aguas abajo**.



**Figura 60:** simulación con HEC-RAS del río central del Pla de Sant Jordi. En azul se indican las zonas hasta donde alcanza la lámina de agua para el periodo de retorno T500 años.



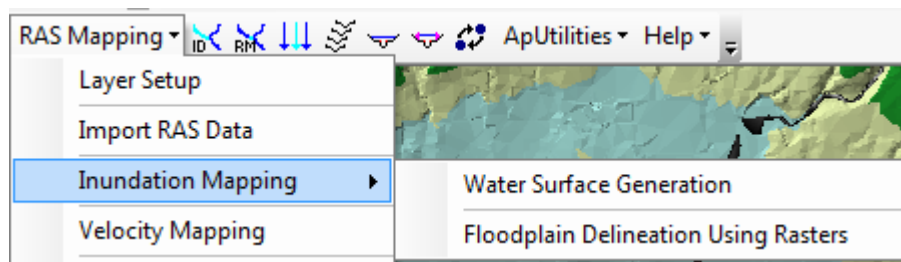
**Figura 61:** detalle de la desembocadura del río para la simulación de T500 años.

El programa nos genera tres archivos diferentes, uno para cada periodo de retorno T50, T100 y T500. Estos archivos se deben exportar de nuevo a ArcGis donde podremos visualizar las zonas inundables sobre la topografía del terreno (sobre el TIN creado anteriormente).

➤ **Post-procesado en ArcGis. Visualización de resultados.**

Nuevamente en ArcGis, usamos la extensión HEC-GeoRas para generar los resultados finales del proceso. Algunos de los resultados que genera son, las superficies de inundación para cada periodo de retorno elegido, los grids de profundidad o calado alcanzado, visualizaciones 3D etc..

En el menú desplegable **RAS mapping**, debemos aplicar las opciones **Water Surface Generation** y **Floodplain Delineation**.



En estos dos procesos se crearán las zonas de inundación para cada perfil, es decir, para caudal que se ha establecido previamente en HEC-RAS. Además se genera un grid con el calado de la lámina de agua en la llanura de inundación.

\*El resultado final del proceso se muestra en el apartado RESULTADOS de este trabajo.

### 6.2.2 Análisis hidráulico bidimensional IBER 2D:

El software Iber 2D es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo y procesos de transporte de sólido en ríos y estuarios, es capaz de reproducir el flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y aguas poco profundas. Fue desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, **GEAMA** (Universidad de A Coruña, UDC) y el **Instituto FLUMEN** (Universitat Politècnica de Catalunya y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el **CEDEX** y **la Dirección General del Agua**.

El modelo Iber surge como respuesta al interés mostrado por el **CEDEX** en disponer de una herramienta que facilite la aplicación de la legislación vigente en materia de aguas, especialmente en los requerimientos derivados de la Instrucción de Planificación Hidrológica, la Directiva de Inundaciones o el Plan Nacional de Calidad de las Aguas. Cabe destacar que Iber está desarrollado directamente desde la administración pública española para ser especialmente útil a las necesidades técnicas de las diferentes Confederaciones Hidrográficas.

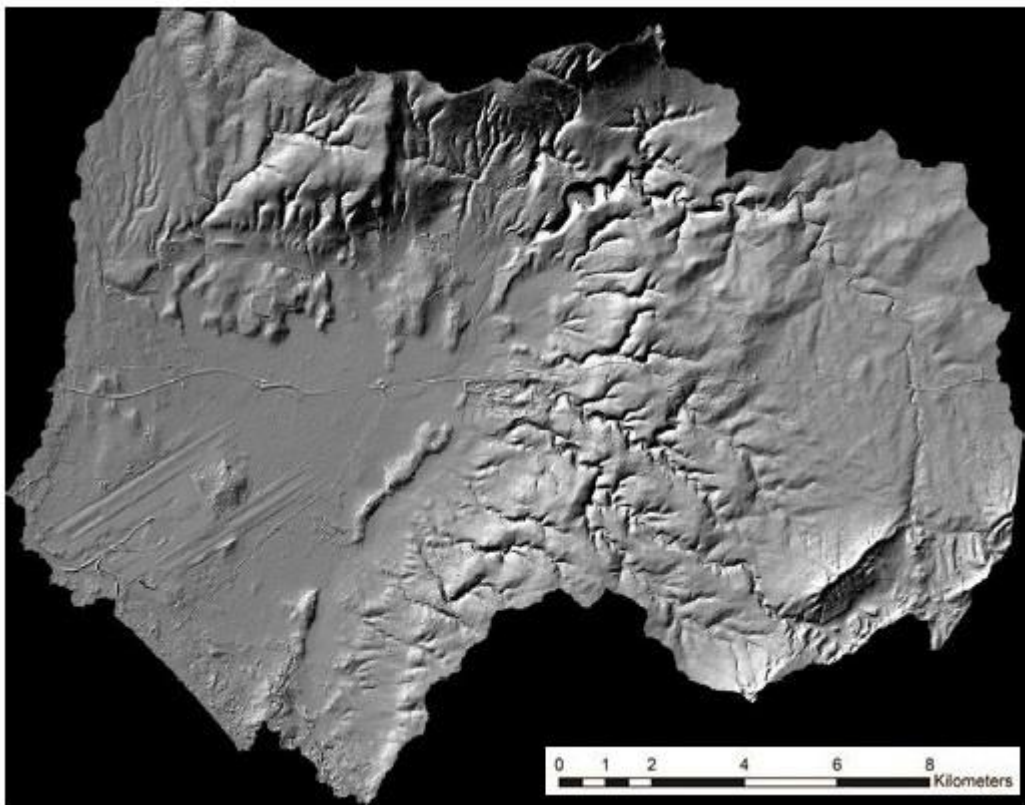
Consta de **un módulo hidrodinámico** que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso desagüe o en general la zonificación del Dominio Público Hidráulico), **un módulo de turbulencia** y **un módulo de transporte sólido** por arrastre de fondo y en suspensión para la cuantificación de procesos de erosión y sedimentación. Para el caso concreto que ocupa a este trabajo fin de máster solo será utilizado el módulo hidrodinámico.

Para realizar un cálculo con el módulo hidrodinámico de Iber debemos seguir los siguientes pasos: *crear o importar una geometría (topografía), asignar condiciones de contorno y caudales, generar la malla, asignar la rugosidad del terreno (n-manning), asignar las opciones del cálculo (tiempo de cálculo) y consulta de resultados (módulo post-proceso)*. En los siguientes sub-apartados se irán describiendo todos estos pasos con detalle.

➤ **Crear o importar una geometría (topografía).**

De nuevo partimos del **modelo digital del terreno (MDT)** que nos permitirá tener una representación matemática de los valores de altura y caracterizar así las formas del relieve de nuestra cuenca. Se trata del mismo MDT usado anteriormente para el proceso en HEC-RAS, con una malla de resolución espacial de 2x2 procedente del vuelo LIDAR realizado por el IGN. Señalar que Iber trabaja siempre con el MDT en formato ASCII, por lo tanto previamente debemos convertirlo en ArcGis.

Con la herramienta **“crear RTIN”** convertimos el archivo ASCII del MDT en un RTIN, que nos da una geometría formada por una red irregular de triángulos rectángulos. Al crearlo se debe indicar la longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se formarán, así como una tolerancia (máxima distancia en vertical entre el MDT y la geometría creada).



**Figura 62:** modelo digital del terreno (MDT) utilizado para introducir la topografía de la cuenca en Iber 2D.

Una vez importado el archivo RTIN se debe colapsar el modelo ya que los triángulos se han importado como triángulos independientes, es decir, sin compartir líneas como lado común. Ahora ya podemos poner como imagen de fondo la ortofoto y así ver mejor el resultado.



**Figura 63:** ejemplo de RTIN, ortofoto y geometría de triángulos irregulares generados en Iber.

➤ **Asignación de condiciones de contorno y caudales.**

Iber diferencia entre dos tipos de condiciones de contorno, las de entrada y las de salida, es decir, la entrada corresponde al inicio del canal (aguas arriba) y la salida corresponde a la desembocadura del canal (aguas abajo). **Señalamos los elementos de la geometría que actuarán como entrada y salida del canal** de modo que seleccionamos los lados de los triángulos que formen una línea perpendicular al cauce del río (el programa interpretará que esa línea marca el inicio o el final del canal).

También debemos **introducir los datos de caudal** que disponemos, son los caudales punta de los hidrogramas resultantes del proceso con HEC-HMS y además señalar el tipo de régimen en el que estamos (sub-crítico, crítico o supercrítico), para nuestra cuenca el tipo de régimen es sub-crítico.

Se toman un total de 12 canales que rodean y desembocan en la cuenca del Pla como entradas para hacer la simulación (cada uno de ellos tiene un valor diferente de caudal) y como único punto de salida se toma el desagüe al mar en la parte suroeste de la cuenca. Numerándolos en el sentido de las agujas del reloj se les asignan los valores de caudales procedentes de HMS para los diferentes periodos de retorno T50, T100 y T500 años.

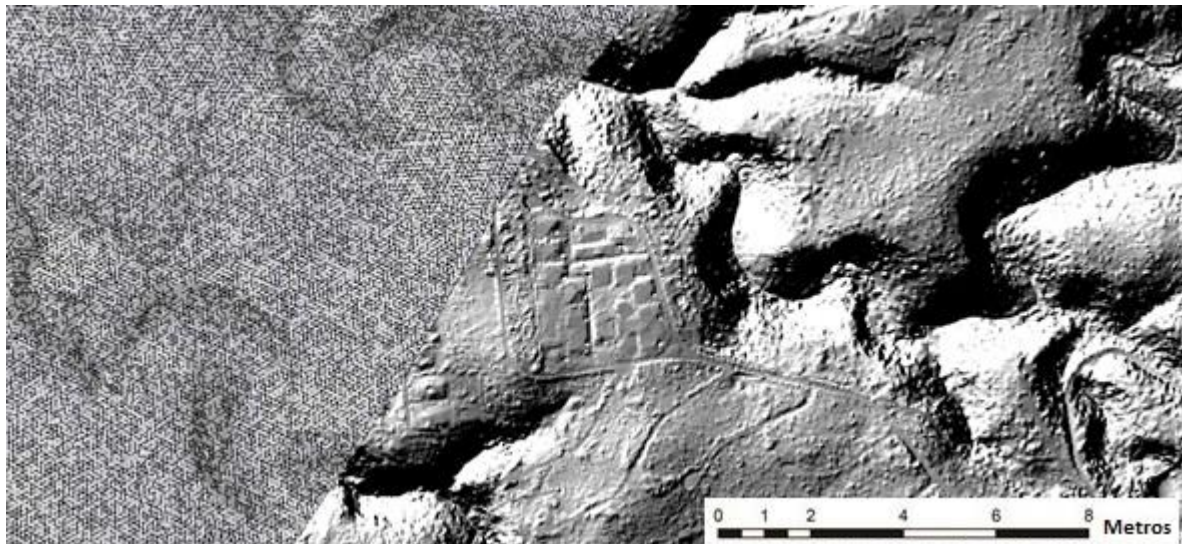
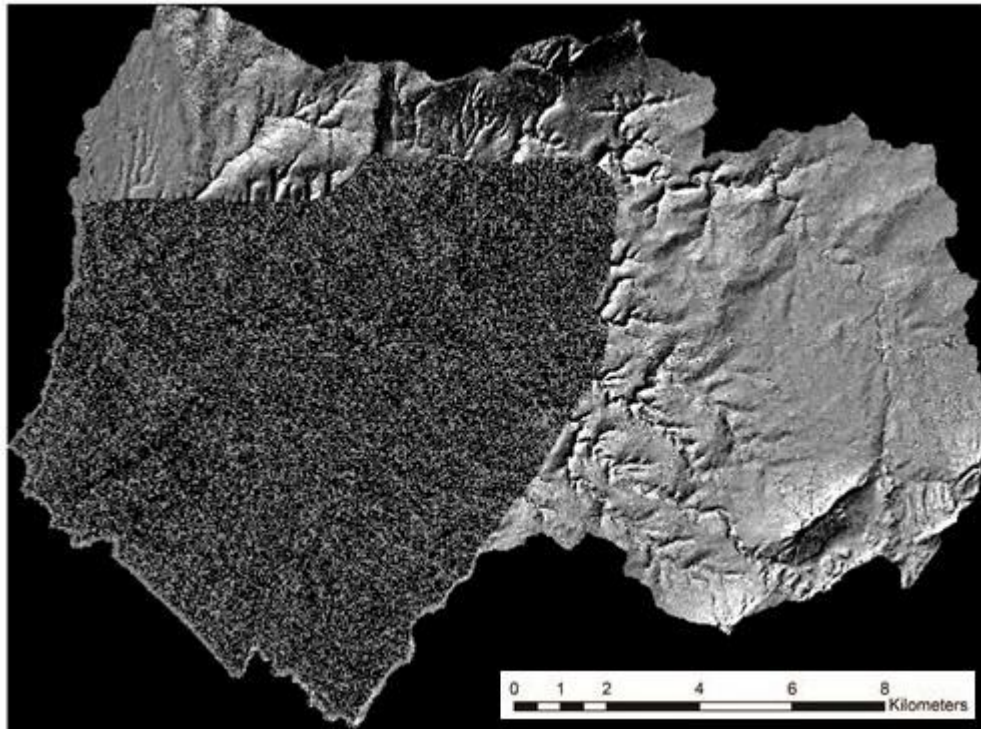
Nº Canal	Caudal (m³/s)	Nº Canal	Caudal (m³/s)
1	28.1	7	33.7
2	4.4	8	17.3
3	8.5	9	86.3
4	9	10	12.9
5	18.5	11	18.0
6	27.4	12	38.5

**Figura 64:** tabla con los caudales punta procedentes de HMS para el periodo de retorno T50 años.

➤ **Generar la malla.**

Creamos la malla que representará el relieve de la zona (vista en 3D) y a su vez almacena todos los datos relativos a las condiciones de contorno y caudales asignadas hasta ahora.

En el **menú Malla > estructurada > superficies**, seleccionamos todas las superficies triangulares anteriormente creadas y asignamos como número de divisiones 1. Como el área de estudio es bastante grande se debe aumentar el tamaño de la malla creada hasta 10 metros (el programa se cuelga con un tamaño de malla menor), esto quiere decir que el tamaño máximo de malla son 10 metros.



**Figura 65:** arriba, mallado con tamaño máximo de 10 metros de la zona de la cuenca del Pla de Sant Jordi. Abajo, detalle fuera y dentro de la zona de mallado.

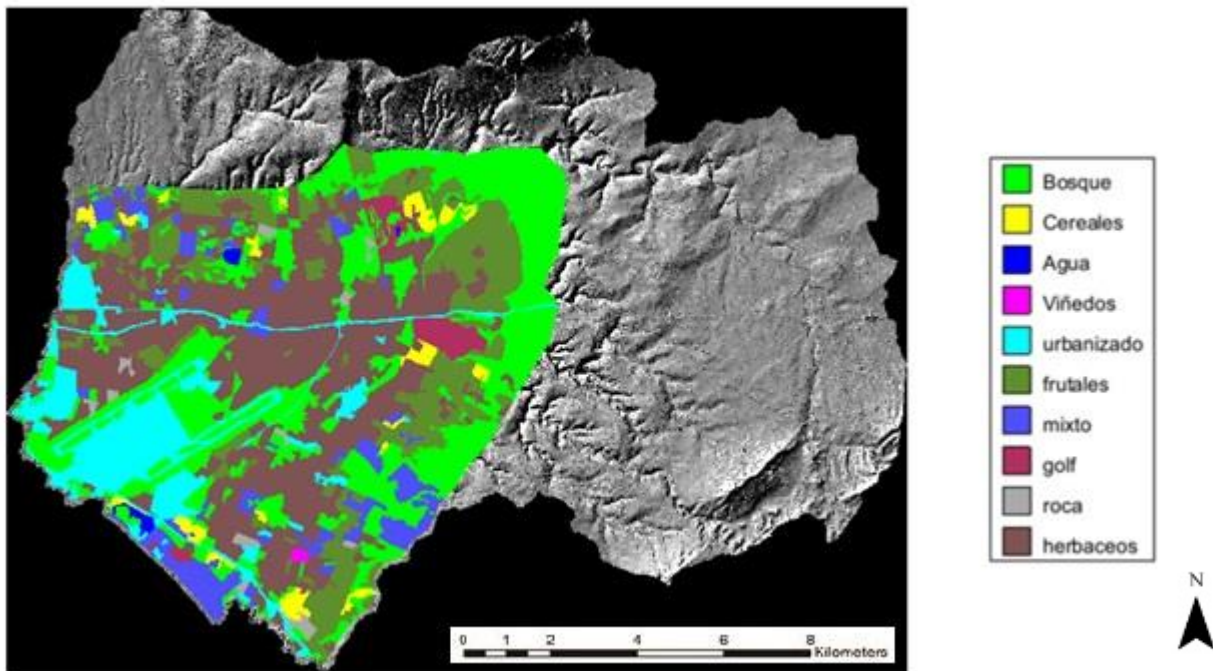
➤ **Asignación de la rugosidad del terreno (N-manning).**

En Iber, el parámetro rugosidad se asigna mediante el coeficiente de Manning (ya usado anteriormente en HEC-RAS). Con el **menú rugosidad > usos del suelo**, podemos escoger los usos del suelo que queramos y atribuirlos a las superficies que forman la geometría .

Existen unos valores de N-manning predeterminados para cada uso del suelo, pero no necesariamente tienen que usarse, se pueden cambiar los valores sin problema. En nuestro caso, utilizamos los valores basándonos en las tablas del *United States Geological Survey (USGS)*.

Tipo uso del suelo	Valor N-manning	Tipo uso del suelo	Valor N-manning
Bosque	0.11	Frutales arbóreos	0.15
Cultivos de cereales	0.04	Mixto urbano	0.06
Agua	0	Campos de golf y zonas ajardinadas	0.03
Viñedos	0.08	Roca desnuda	0.01
Suelo urbanizado	0.07	Cultivos herbáceos	0.035

Una vez tenemos los usos definidos los representamos en la malla para ver cómo quedan distribuidos.



**Figura 66:** arriba, tabla con los valores de N-manning según la USGS para los usos del suelo de la cuenca del Pla. Abajo, mapa de la distribución de los usos del suelo por la malla generada.

➤ **Asignación de las opciones del cálculo (tiempo de cálculo).**

Antes de lanzar un cálculo, en primer lugar se deben fijar los parámetros de cálculo o datos del problema, que básicamente es indicar al programa cuanto tiempo debe durar la simulación del proceso. Mediante el menú **Datos > datos del problema** definimos que la simulación tenga un día de duración (86400 segundos) y con intervalos de tiempo de 15 minutos (865 segundos).

➤ **Consulta de resultados (módulo post-proceso).**

El programa te reporta muchos tipos de resultados, pero en este caso nos vamos a centrar en la visualización de **calado** y **velocidad**. Podemos colorear las zonas según nuestras preferencias y realizar una animación de los resultados, lo cual nos genera un video de cómo se comporta el flujo de agua por la cuenca ( muy útil para identificar rápidamente las zonas inundables).

\*Los mapas finales se muestran más adelante en el apartado de **RESULTADOS**.

## **7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.**

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes procesos y métodos usados, se exponen en el mismo orden que en el apartado de metodología. Se dividen los resultados en dos grandes apartados (métodos hidrológicos e hidráulicos) que a su vez se sub-dividen en sus apartados correspondientes.

### **7.1 Resultados del análisis hidrológico.**

Como ya se mencionó anteriormente, bajo este epígrafe se agrupan todos los resultados de las técnicas que componen el **método hidrometeorológico** que trata de convertir las diferentes variables meteorológicas en escorrentía superficial (lluvia en caudales).

#### **7.1.1 Resultados del análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias.**

En la siguiente tabla se muestra **la elección del mejor ajuste** para los datos de cada estación meteorológica a partir de los resultados gráficos obtenidos del análisis estadístico de series de precipitaciones máximas diarias mediante el programa CHAC y los resultados del test de bondad del ajuste por el método de errores cuadráticos mínimos.

		<b>Mejor ajuste Test de bondad</b>		<b>Mejor ajuste Gráfico</b>	<b>Ajuste seleccionado</b>
<b>Son San Juan</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	GEV + ML	GEV + ML
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + MOM	
		<b>3</b>	GEV + PWM	Log PEARSON III	
	<i>Datos Completo</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	GEV + ML	GEV + ML
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + MOM	
		<b>3</b>	GEV + PWM	GEV + PWM	
<b>Porciuncula</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	Gumbel + MOM	Gumbel + MOM
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM	
		<b>3</b>	GEV + ML	Gumbel + PWM	
	<i>Datos Completo</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	Gumbel + MOM	Gumbel + MOM
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM	
		<b>3</b>	GEV + ML	Gumbel + PWM	
<b>Marratxi Son Bonet</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III
		<b>2</b>	SQRT + ML	Gumbel + PWM	
		<b>3</b>	SQRT + MOM	Gumbel + MOM	
	<i>Datos Completo</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	SQRT + ML	SQRT + ML
		<b>2</b>	SQRT + ML	Log PEARSON III	
		<b>3</b>	GEV + MOM	Gumbel + MOM	
<b>Xorrigo</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III
		<b>2</b>	SQRT + ML	GEV + PWM	

		<b>3</b>	GEV + MOM	Gumbel + PWM		
		<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Gumbel + PWM	Gumbel + PWM
			<b>2</b>	SQRT + ML	SQRT + ML	
			<b>3</b>	GEV + MOM	Log PEARSON III	
<b>Marratxi La Cabaneta</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM	GEV + PWM	
		<b>2</b>	SQRT + ML	Log PEARSON III		
		<b>3</b>	GEV + MOM	GEV + ML		
	<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM	GEV + PWM	
		<b>2</b>	SQRT + ML	Log PEARSON III		
		<b>3</b>	GEV + MOM	GEV + ML		
<b>Algaida Pina</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III	
		<b>2</b>	SQRT + ML	GEV + PWM		
		<b>3</b>	GEV + MOM	SQRT + ML		
	<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III	
		<b>2</b>	SQRT + ML	GEV + PWM		
		<b>3</b>	GEV + MOM	SQRT + ML		
<b>Algaida Farmacia</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	GEV + ML	GEV + ML	
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + MOM		
		<b>3</b>	GEV + ML	Log PEARSON III		
	<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	GEV + ML	GEV + ML	
		<b>2</b>	SQRT + ML	GEV + MOM		
		<b>3</b>	GEV + PWM	Gumbel + MOM		
<b>Algaida</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III	
		<b>2</b>	SQRT + ML	Gumbel + MOM		
		<b>3</b>	GEV + MOM	Gumbel + ML		
	<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	SQRT + ML	Gumbel + ML	Gumbel + ML	
		<b>2</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM		
		<b>3</b>	GEV + ML	Gumbel + PWM		
<b>Llucmajor II</b>	<i>Datos Totales</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	Log PEARSON III	Log PEARSON III	
		<b>2</b>	SQRT + ML	GEV + ML		
		<b>3</b>	GEV + MOM	Gumbel + PWM		
	<i>Datos Completos</i>	<b>1</b>	Log PEARSON III	GEV + PWM	GEV + PWM	
		<b>2</b>	SQRT + ML	Log PEARSON III		
		<b>3</b>	GEV + MOM	Gumbel + PWM		

Aclarar que para cada estación se pueden encontrar dos tipos de datos debido a la falta de información de en las series (para ciertos meses o días no hay registros de precipitaciones, están incompletos). Los **datos**

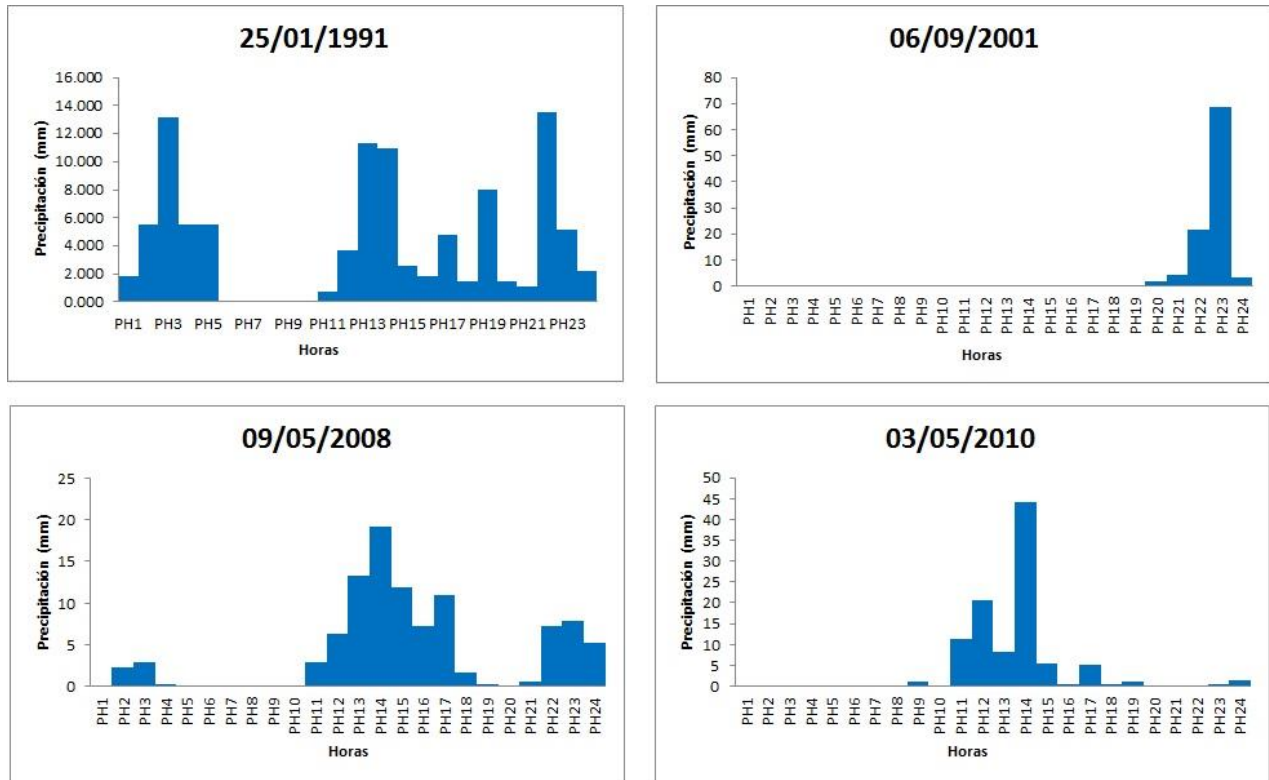
**totales** son aquellos en los cuales no se han quitado los meses o días en blanco, se han dejado tal cual y se cuenta con ellos. Para los **datos completos**, se han quitado aquellos meses o días sin registro.

Una vez que tenemos los resultados del análisis para la obtención del mejor ajuste, pasamos a mostrar los **resultados de los cuantiles de precipitaciones (mm/día)** obtenidos mediante el programa CHAC para las todas las estaciones meteorológicas y diferentes periodos de retorno.

<b>P (mm/día)</b>		<b>T (años)</b>				
		<b>2</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>500</b>
<b>Son San Juan</b>	<i>Datos Totales</i>	46	62	70	72	76
	<i>Datos Completos</i>	45	61	71	74	80
<b>Porciuncula</b>	<i>Datos Totales</i>	39	54	67	73	86
	<i>Datos Completos</i>	39	54	67	73	86
<b>Marratxi Son Bonet</b>	<i>Datos Totales</i>	40	59	79	89	113
	<i>Datos Completos</i>	40	57	75	83	104
<b>Xorrigo</b>	<i>Datos Totales</i>	48	90	140	164	230
	<i>Datos Completos</i>	52	95	133	149	186
<b>Marratxi La Cabaneta</b>	<i>Datos Totales</i>	46	71	99	113	128
	<i>Datos Completos</i>	46	72	100	113	149
<b>Algaida Pina</b>	<i>Datos Totales</i>	49	87	129	149	200
	<i>Datos Completos</i>	50	89	132	152	203
<b>Algaida Farmacia</b>	<i>Datos Totales</i>	58	85	100	104	111
	<i>Datos Completos</i>	63	90	107	113	125
<b>Algaida</b>	<i>Datos Totales</i>	53	80	101	109	127
	<i>Datos Completos</i>	63	89	112	122	144
<b>Llucmajor II</b>	<i>Datos Totales</i>	49	73	96	105	128
	<i>Datos Completos</i>	48	73	101	114	150

### 7.1.2 Resultados del análisis de hietogramas de precipitaciones.

La AEMET facilitó los datos de los cuatro eventos excepcionales más significativos registrados en los últimos 30 años para la zona del Pla de Sant Jordi. Se ha analizado la duración y la distribución temporal de dichas precipitaciones obteniendo hietogramas (en mm/h) sesgados a la derecha como modelo representativo del conjunto de esos datos.



La duración de los eventos va desde unas pocas horas, hasta casi un día completo de lluvia. Para el hietograma del día 25/01/1991, el evento de precipitación duró diecinueve horas, mientras que para el del día 06/09/2001 apenas duró cinco horas.

\*Estos hietogramas serán introducidos posteriormente en el programa HEC-HMS.

### 7.1.3 Resultados de la elaboración de capas con ArcGis:

Se muestran las 3 capas principales generadas con Arcgis (**pendientes, texturas del suelo y usos del suelo**) que después serán usadas por los programas específicos de hidrología de superficie y además se incluyen 2 capas más (**elevaciones TIN y geomorfología**) que se usaron como auxiliares. Se muestran para la cuenca completa ya que en el apartado de metodología solo se mostraba un extracto de cada una de ellas. Se presentan en forma de mapa según ArcMap.

## MAPA DE ELEVACIONES DE LA ZONA PLA DE SANT JORDI



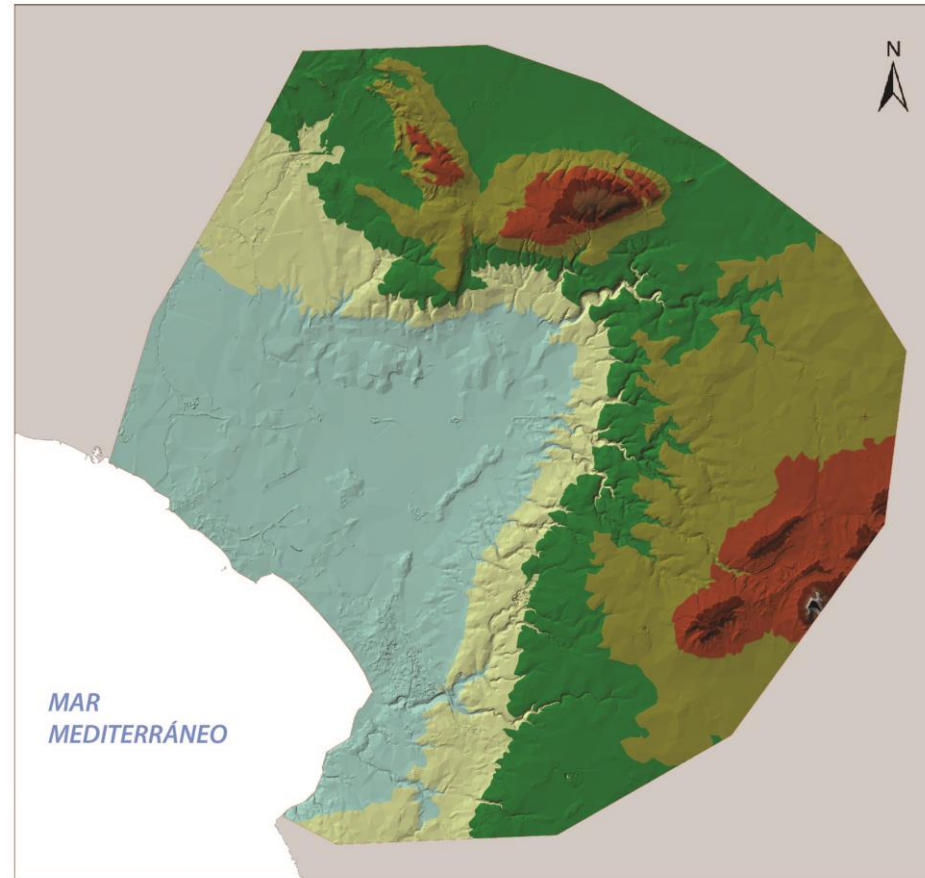
0 5 10 20 30 40  
Kilometers

### LEYENDA

#### Elevation

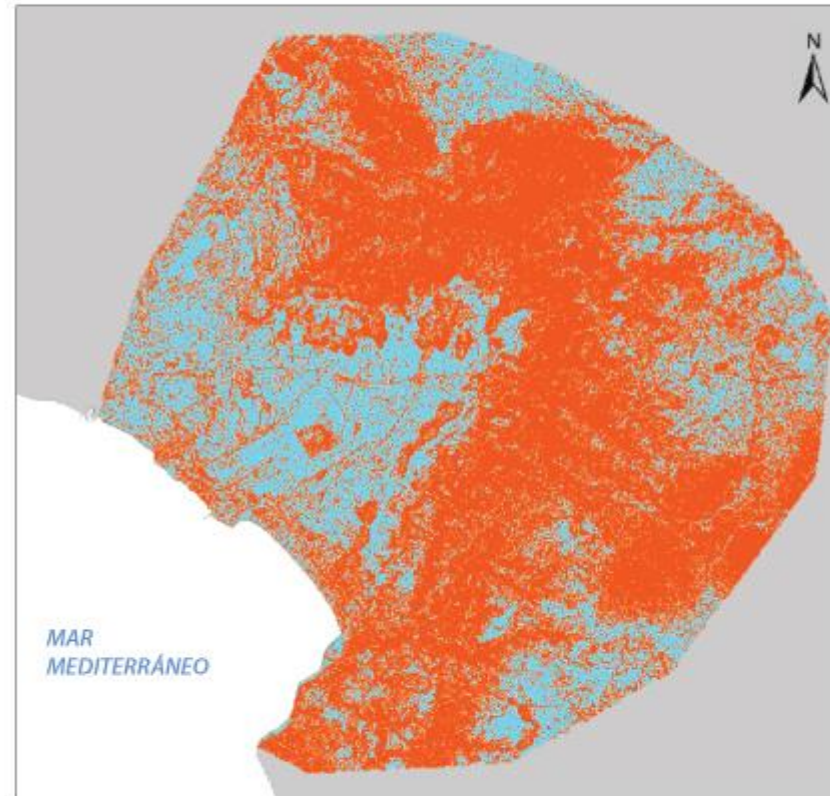
■	> 373
■	326 - 373
■	279 - 326
■	232 - 279
■	185 - 232
■	139 - 185
■	92 - 139
■	45 - 92
■	< 45

Autora: Virginia Díaz De la Cruz  
Noviembre 2014



0 1 2 4 6 8  
Kilometers

## MAPA DE PENDIENTES RECLASIFICADAS DEL PLA DE SANT JORDI








Autora: Virginia Díaz De la Cruz  
Noviembre 2014

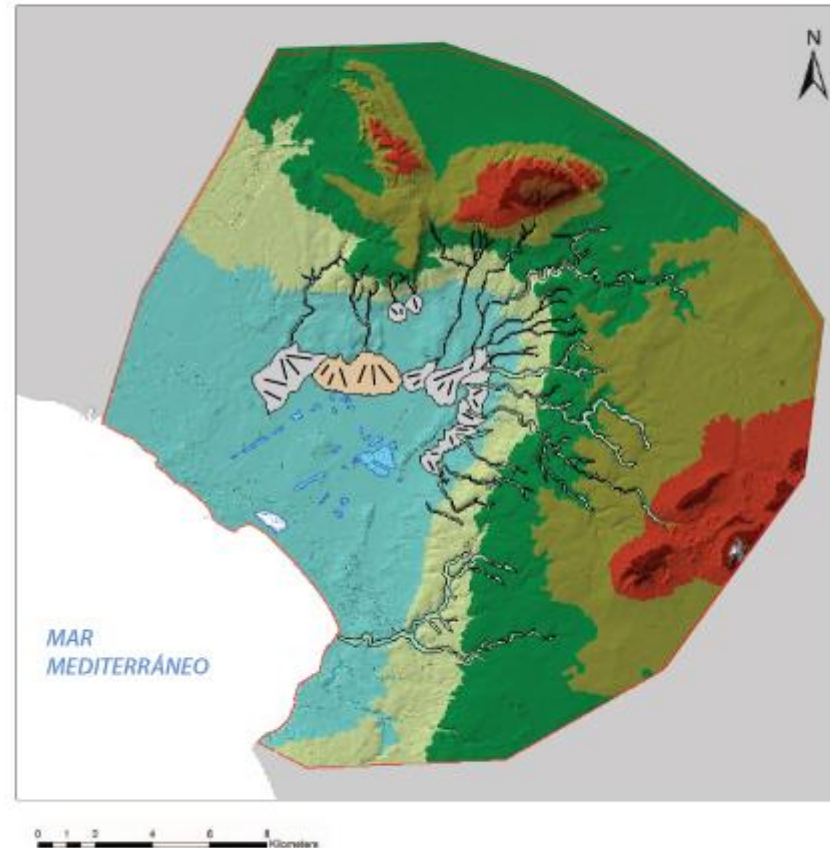
## MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA ZONA PLA DE SANT JORDI



### LEYENDA

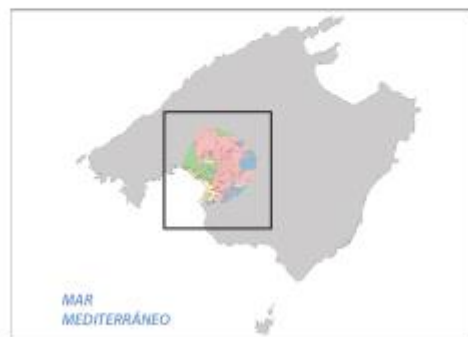
#### Geomorfología

-  Abanicos aluviales
-  Depósitos de vertientes (conos, glacis)
-  Fondos de valle (limos y arenas con grava)
-  Fondos húmedos o encharcamientos temporales
-  Lagoon: Salinas de Fontanelles



Autora: Virginia Díaz De la Cruz  
Noviembre 2014





## MAPA DE GRUPOS TEXTURALES PARA EL PLA DE SANT JORDI



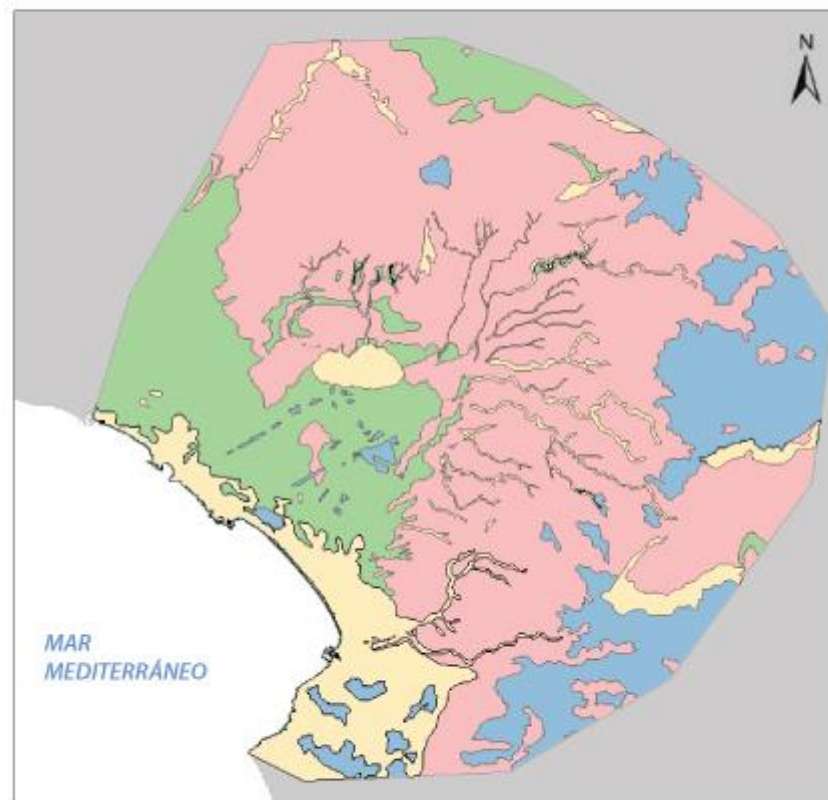
0 1 2 3 4 Kilómetros

### LEYENDA

#### Grupos texturales

-  A
-  B
-  C
-  D

\* Según clasificación USDA.



0 1 2 4 6 8 Kilómetros

Autora: Virginia Díaz De la Cruz  
Noviembre 2014

## MAPA DE USOS DEL SUELO PARA EL PLA DE SANT JORDI

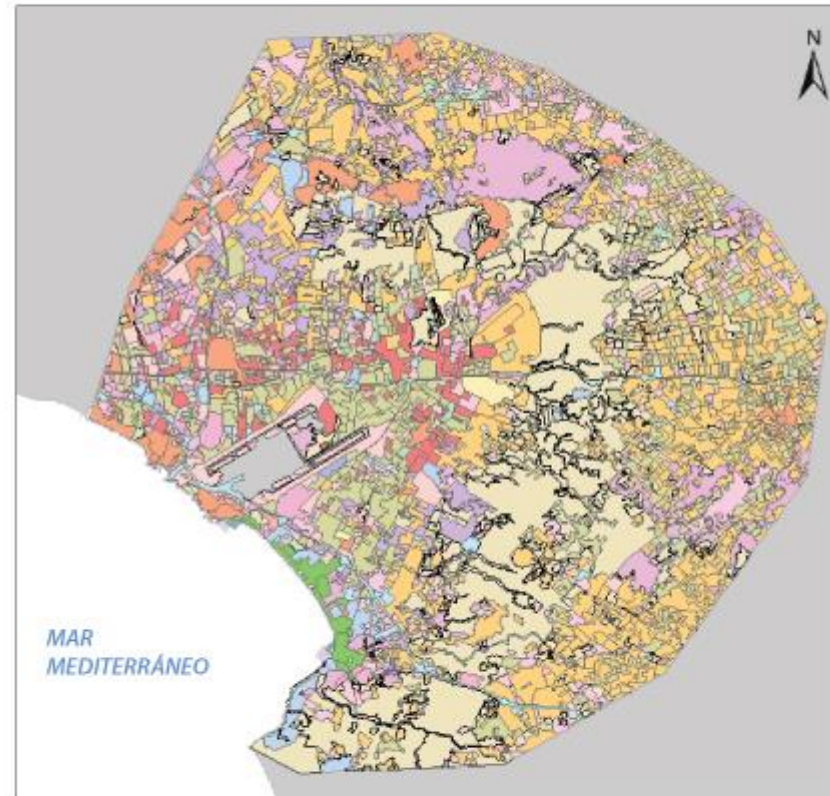


0 5 10 20 30 Kilómetros

### LEYENDA: usos del suelo

	Aeropuerto		Mosaico de cultivos mixtos
	Autopistas y autovías		Olivares
	Bosques coníferas		Pastizales/praderas
	Cultivos secano		Playas y dunas
	Cultivos herbáceos regado		Tejido urbano
	Equipamientos y servicios		Tierras de labor
	Frutales cítricos		Viñedos
	Frutales tropicales		Zonas industriales y comerciales
	Humedales/zonas pantanosas		Zonas portuarias
	Matorral boscoso		Zonas verdes urbanas

Autora: Virginia Díaz De la Cruz  
 Noviembre 2014



0 1 2 4 6 8 Kilómetros



### 7.1.5 Modelo hidrometeorológico mediante software HEC-HMS:

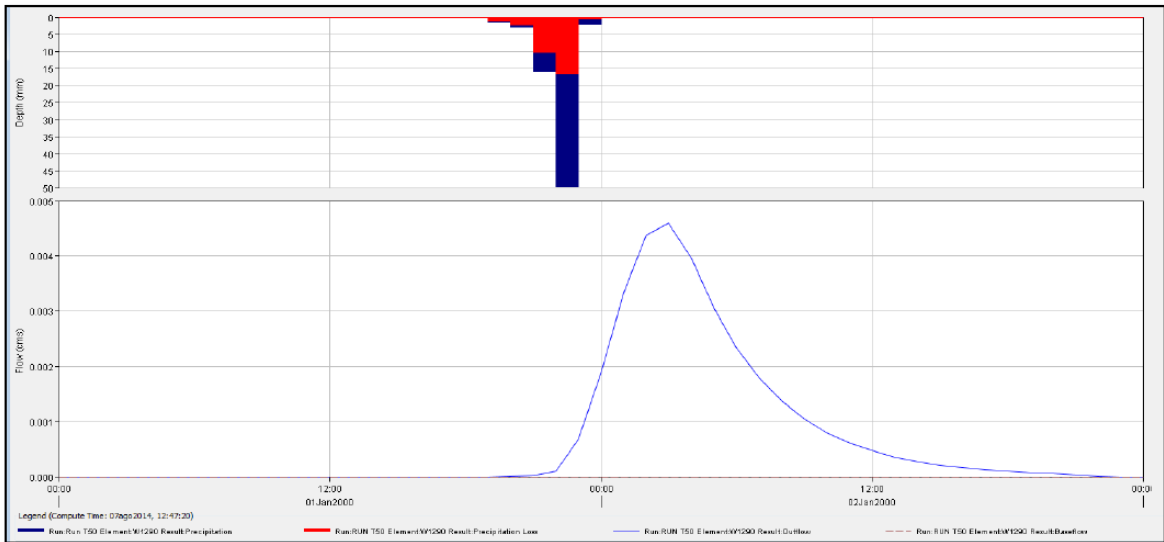
Una vez tenemos definidos los parámetros que componen el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control, ya podemos ejecutar la simulación en HMS. El resultado son los **caudales punta** para cada uno de los junctions generados para los periodos de retorno T50, T100 y T500 años.

<b><u>Caudal Punta (m<sup>3</sup>/s)</u></b>					
<b>T50</b>		<b>T100</b>		<b>T500</b>	
<b>J212</b>	46,3	<b>J212</b>	49,9	<b>J212</b>	61,3
<b>J226</b>	30,9	<b>J226</b>	37,2	<b>J226</b>	54,1
<b>J209</b>	20,9	<b>J209</b>	26,5	<b>J209</b>	43,1
<b>J202</b>	21	<b>J202</b>	25,9	<b>J202</b>	39,8
<b>J195</b>	23,9	<b>J195</b>	29,2	<b>J195</b>	45,4
<b>J180</b>	37	<b>J180</b>	43,3	<b>J180</b>	61,7
<b>J177</b>	26,7	<b>J177</b>	31,3	<b>J177</b>	72,1
<b>J183</b>	36,9	<b>J183</b>	44	<b>J183</b>	73,3
<b>J152</b>	26,7	<b>J152</b>	32,3	<b>J152</b>	47,3
<b>J147</b>	16,9	<b>J147</b>	19,6	<b>J147</b>	25,9
<b>J188</b>	1,5	<b>J188</b>	1,7	<b>J188</b>	2,1
<b>J215</b>	22,9	<b>J215</b>	27	<b>J215</b>	34,5
<b>J174</b>	14,5	<b>J174</b>	16,9	<b>J174</b>	21,6
<b>J139</b>	28,1	<b>J139</b>	32,2	<b>J139</b>	42,6
<b>J134</b>	9,8	<b>J134</b>	11	<b>J134</b>	13,8

**Tabla 68:** caudales punta (m<sup>3</sup>/s) obtenidos del programa HEC-HMS para el Pla de Sant Jordi.

El programa también nos da estos mismos resultados de forma gráfica, para cada uno de las subcuencas o de los junctions podemos ver sus hidrogramas e hietogramas de crecida. Todos estos datos serán usados más tarde para la modelización hidráulica.

En la siguiente figura podemos ver el resultado gráfico de la subcuenca que contiene el punto final de desagüe, es decir, la desembocadura al mar. Para nuestro evento de precipitación con un periodo de retorno de T50 años, tenemos el hietograma (en la parte superior de la imagen) y el hidrograma (parte inferior).

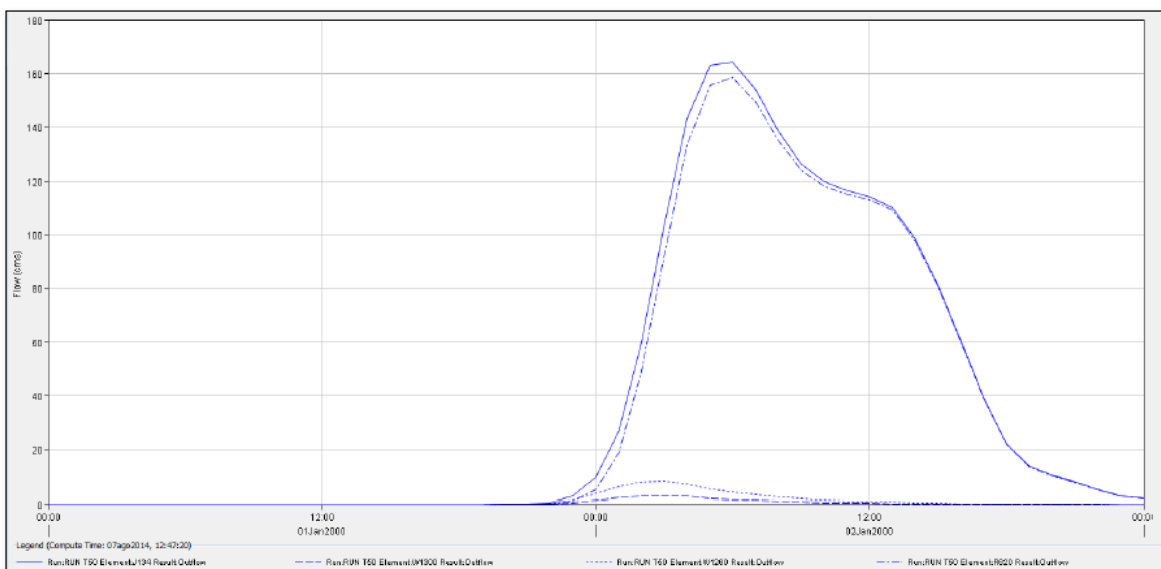


**Figura 69:** hietograma e hidrograma de la subcuenca que contiene el punto final de desagüe (el mar) para la cuenca del Pla de Sant Jordi obtenido mediante el programa HEC-HMS.

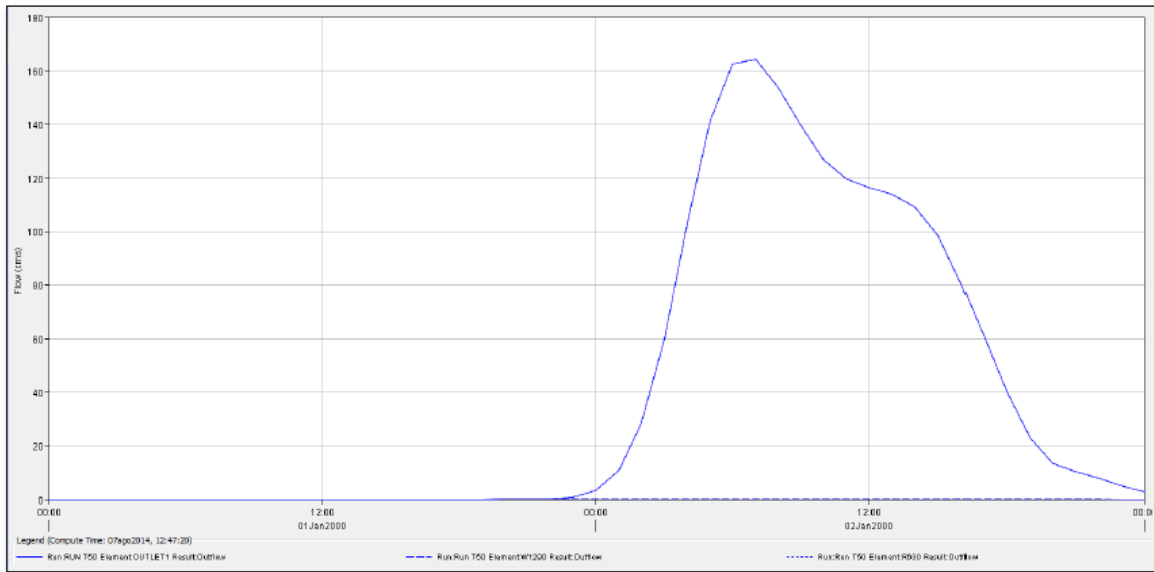
También podemos consultar las gráficas de los hidrogramas de crecida para cada uno de los junctions definidos, en este caso se proponen dos ejemplos de junctions:

- Para el último punto de confluencia entre dos tramos de propagación del río (donde se une el último afluente con el río principal antes de su desembocadura al mar). Integra todos los valores de caudal de todos los junctions aguas arriba.
- Para el punto de desagüe final de toda la cuenca del Pla de Sant Jordi, la desembocadura al mar.

\*Ambos ejemplos corresponden al periodo de retorno T50 años del evento estudiado.



**Figura 70:** hidrograma de crecida obtenido mediante el programa HEC-HMS para el último junction de confluencia antes de la desembocadura al mar.



**Figura 71:** hidrograma de crecida obtenido mediante el programa HEC-HMS para el punto de desagüe final de toda la cuenca del Pla de Sant Jordi.

En la siguiente tabla se muestra la evolución del caudal correspondiente al periodo de retorno T50 años para el punto final de desagüe de la cuenca del Pla, de este modo podemos hacernos una idea de su evolución a lo largo del tiempo. Se analizan los datos para un periodo de tiempo de 24 horas (1 día) y se generan datos en intervalos de 1 hora.

El **caudal punta** observado se da el **día 2 de enero a las 6:00** horas produciendo un total de **164.2 m<sup>3</sup>/s**, es decir, a esa hora se produce lo que se conoce como la punta de la avenida o del evento.

Date	Time	Inflow from... (M3/S)	Inflow from... (M3/S)	Inflow from... (M3/S)	Outflow (M3/S)
01ene2000	00:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	01:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	02:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	03:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	04:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	05:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	06:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	07:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	08:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	09:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	10:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	11:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	12:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	13:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	14:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	15:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	16:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	17:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	18:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	19:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	20:00	0.0	0.0	0.0	0.0
01ene2000	21:00	0.0	0.0	0.0	0.1
01ene2000	22:00	0.1	0.2	0.1	0.4
01ene2000	23:00	0.4	1.3	0.9	2.7
02ene2000	00:00	1.2	3.5	5.0	9.8
02ene2000	01:00	2.2	6.1	18.8	27.1
02ene2000	02:00	2.9	7.9	49.1	59.8
02ene2000	03:00	3.0	8.2	92.9	104.1
02ene2000	04:00	2.6	7.1	133.5	143.2
02ene2000	05:00	2.0	5.5	155.5	163.0
02ene2000	06:00	1.5	4.2	158.5	164.2
02ene2000	07:00	1.2	3.2	149.4	153.8
02ene2000	08:00	0.9	2.4	135.1	138.5
02ene2000	09:00	0.7	1.9	123.8	126.3
02ene2000	10:00	0.5	1.4	118.0	120.0
02ene2000	11:00	0.4	1.1	114.8	116.3
02ene2000	12:00	0.3	0.8	113.1	114.2
02ene2000	13:00	0.2	0.6	109.1	110.0
02ene2000	14:00	0.2	0.5	97.7	98.4
02ene2000	15:00	0.1	0.4	80.3	80.8
02ene2000	16:00	0.1	0.3	60.2	60.6
02ene2000	17:00	0.1	0.2	38.9	39.2
02ene2000	18:00	0.1	0.2	22.0	22.2
02ene2000	19:00	0.0	0.1	13.5	13.7
02ene2000	20:00	0.0	0.1	10.3	10.5
02ene2000	21:00	0.0	0.1	7.8	7.9
02ene2000	22:00	0.0	0.0	4.9	4.9
02ene2000	23:00	0.0	0.0	2.9	2.9
03ene2000	00:00	0.0	0.0	1.8	1.8

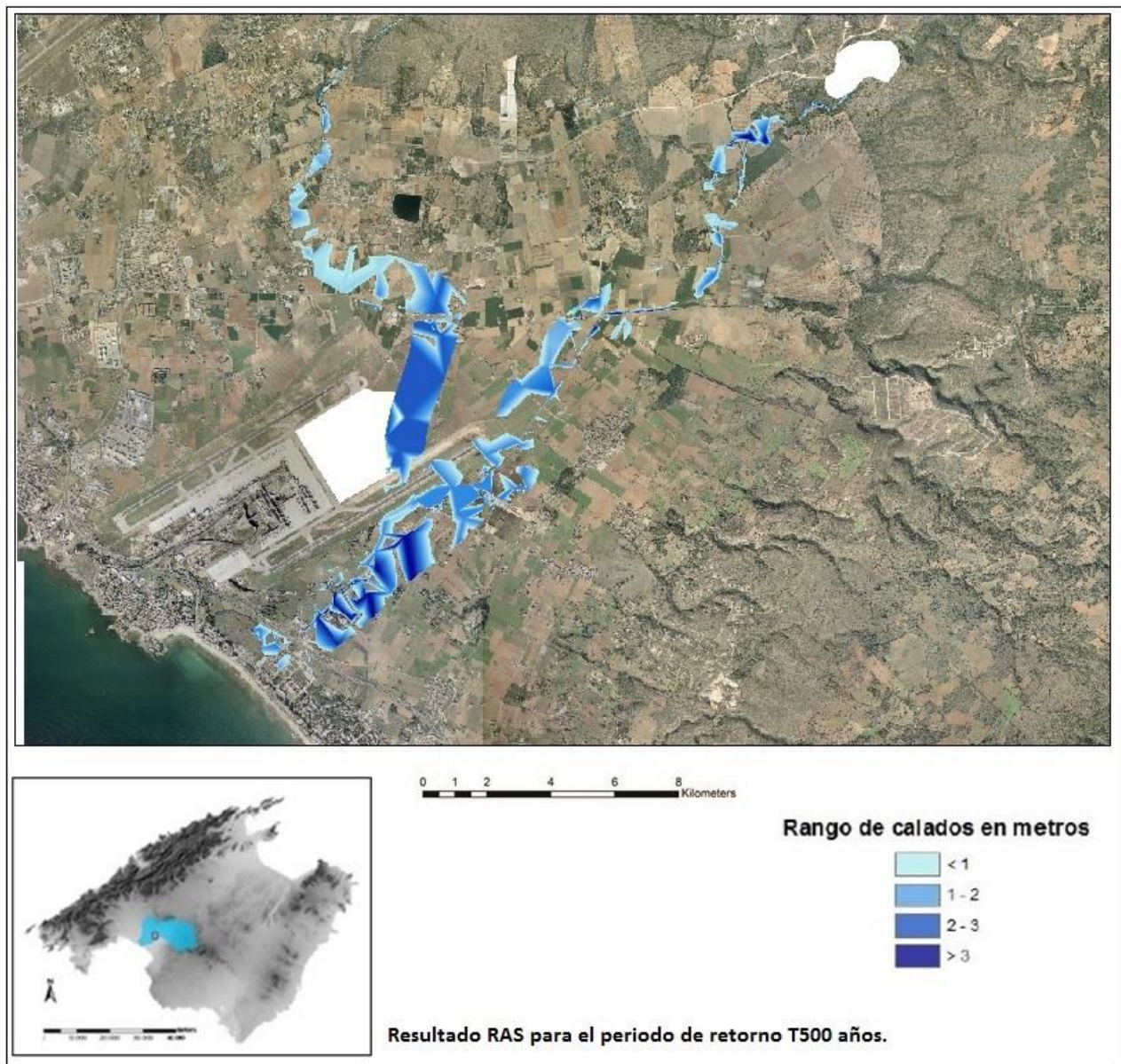
*Figura 72: tabla con los caudales correspondientes al punto de desagüe de la cuenca.*

## 7.2 Resultados del análisis hidráulico.

Siguiendo los epígrafes definidos anteriormente en el apartado de metodología, pasamos a mostrar los resultados obtenidos mediante los llamados métodos hidráulicos. En este caso se muestran los resultados obtenidos por los programas HEC-RAS y IBER 2D.

### 7.2.1 Resultados del análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS:

A continuación se muestra el resultado dado para el cálculo unidimensional realizado con el programa HEC-RAS para el periodo de retorno T500 años. Destacar que no se incluyen los resultados para T50 años ya que han sido desechados por ser de mala calidad (se explicará mejor en el apartado “discusión de resultados”).

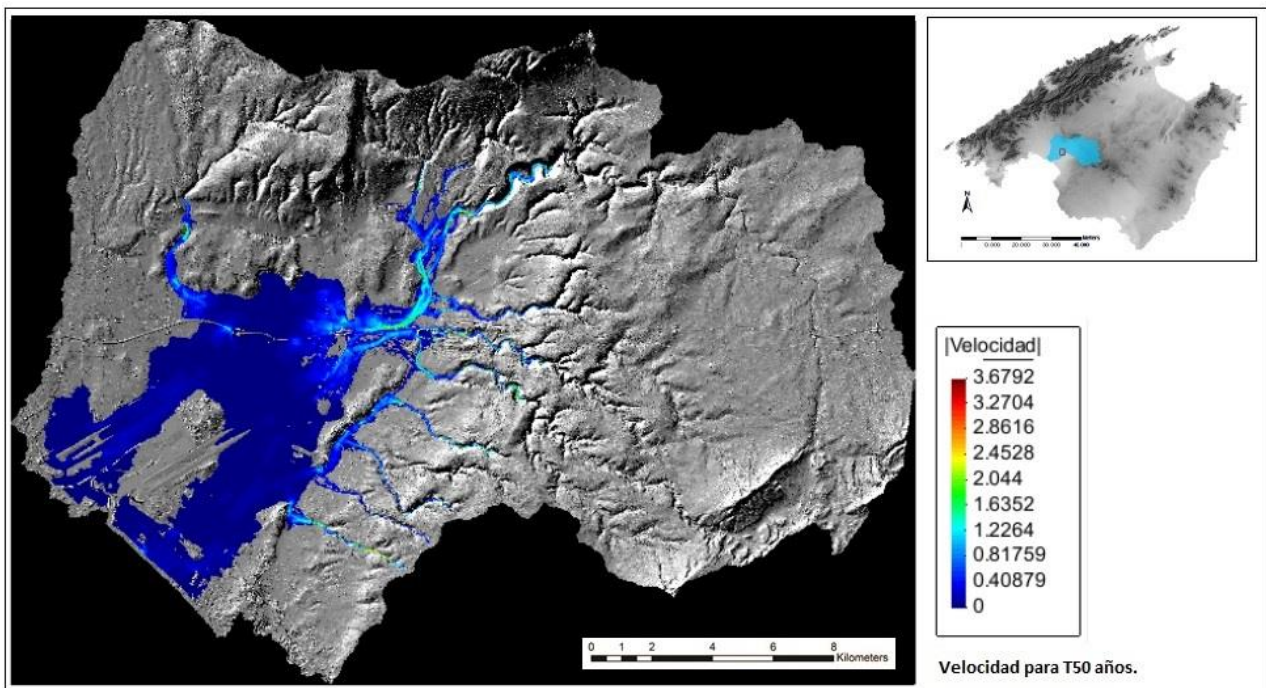
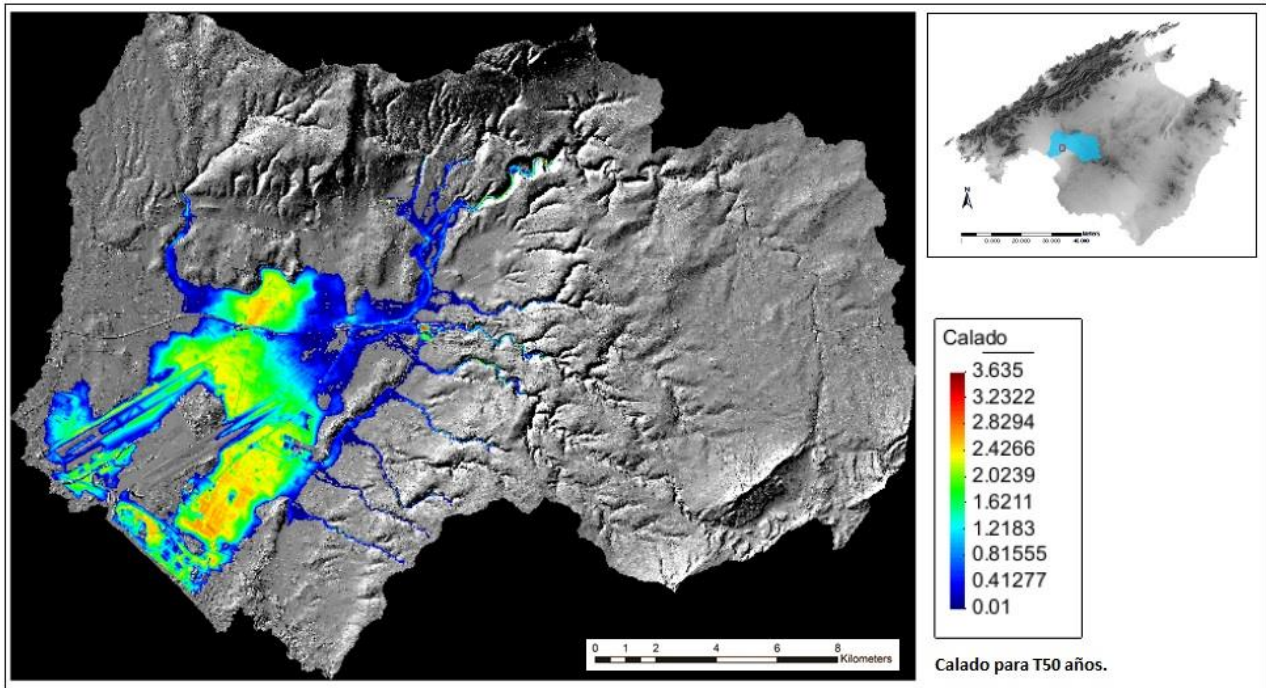


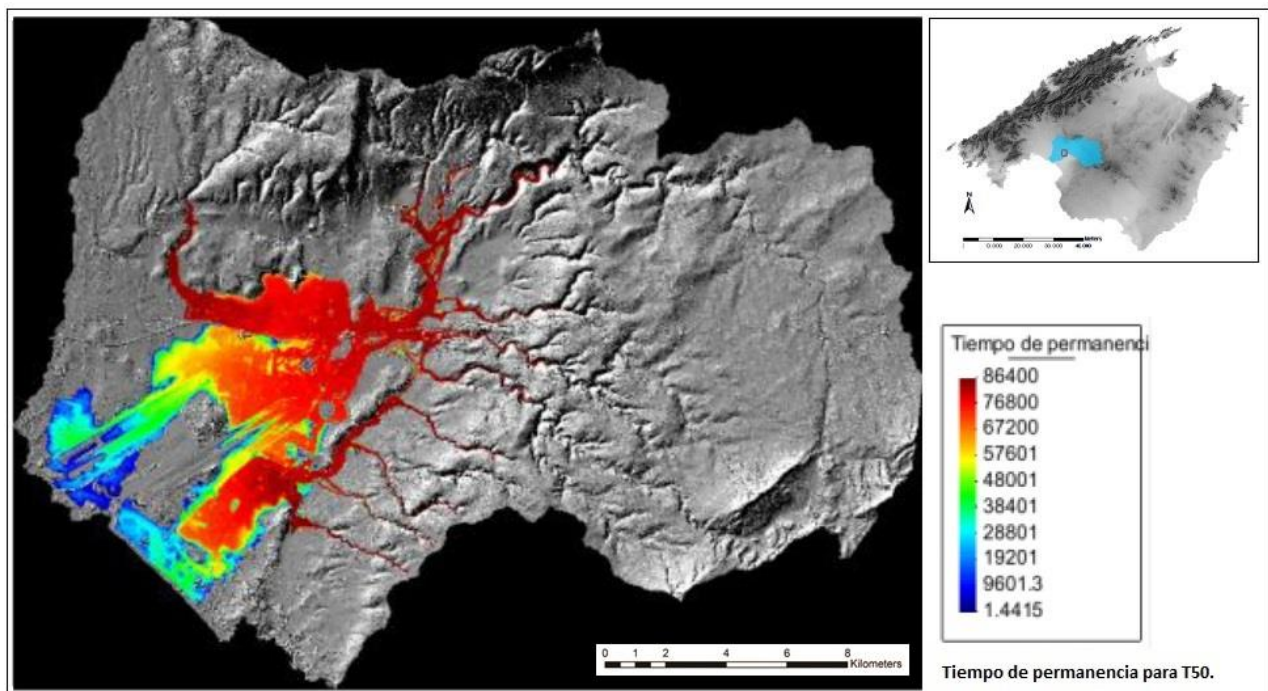
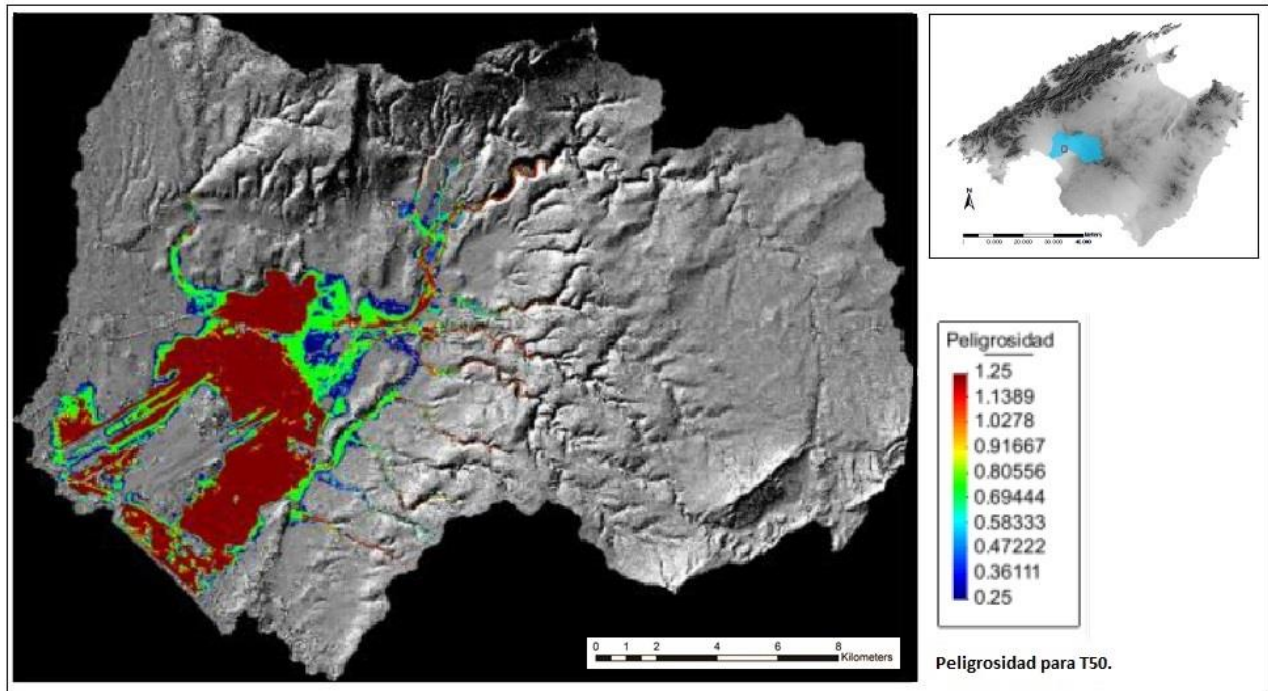
**Figura 73:** resultado gráfico representativo del calado obtenido con el programa HEC-RAS para el periodo de retorno de T500 años en la zona central de la cuenca del Pla de Sant Jordi.

### 7.2.2 Resultados del análisis hidráulico bidimensional IBER 2D:

Se muestran los resultados dados por el programa *IBER 2D* para el análisis hidráulico bidimensional de la cuenca del Pla de Sant Jordi, con resultados para los periodos de retorno de T50 y T100 años (el periodo de retorno de T100 años no se ha considerado finalmente debido a que los resultados eran muy parecidos a T50, y se ha creído más conveniente comprar entre T50 y T500 años para observar mejor las diferencias).

Para el periodo de retorno T50 se tienen imágenes de los siguientes parámetros: calado del agua, velocidad del agua, peligrosidad y tiempo de permanencia del agua en las zonas inundadas.



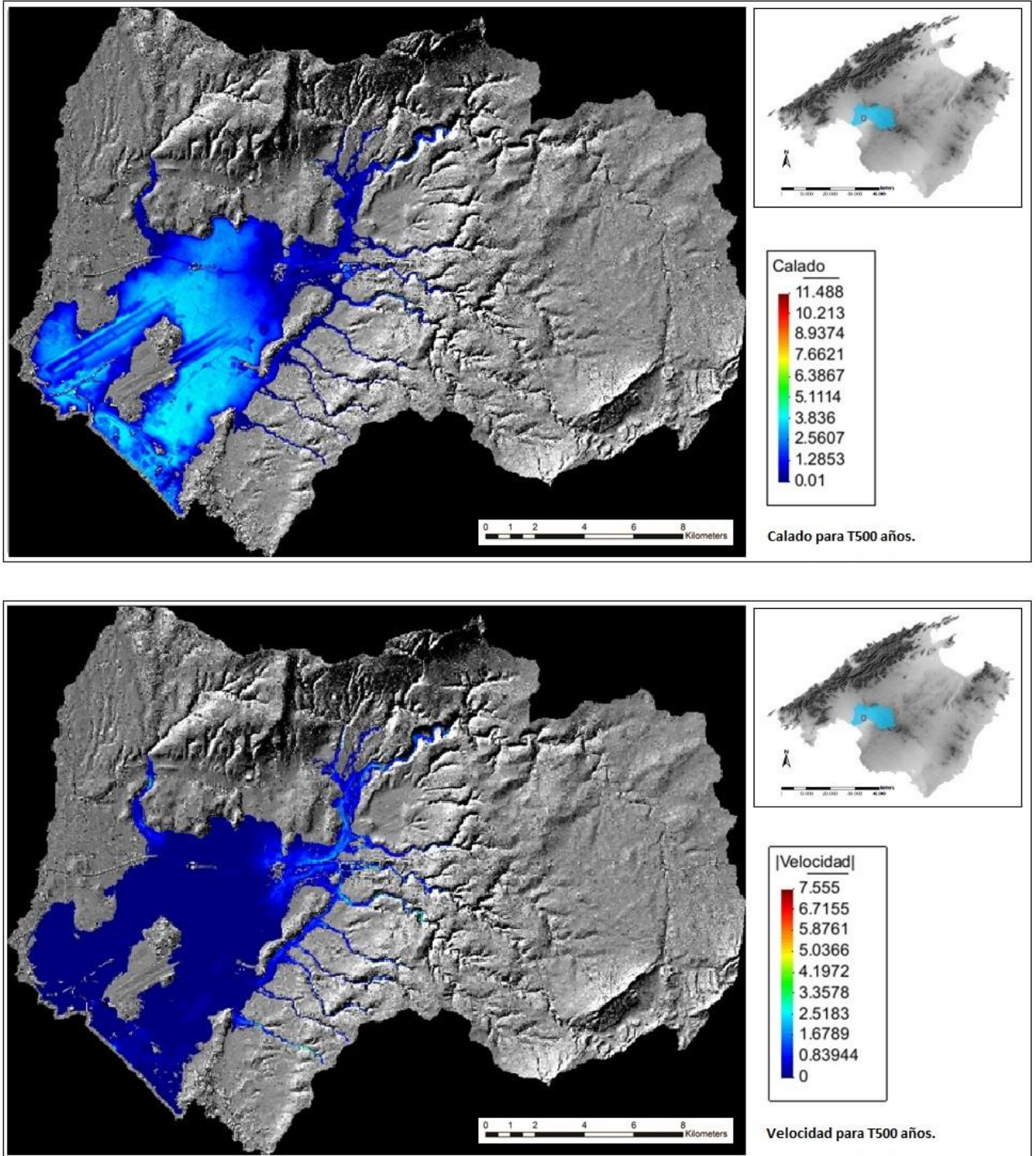


**Figuras 74:** resultados gráficos del programa IBER 2D del periodo de retorno T50 años y los diferentes parámetros definidos para la cuenca del Pla de Sant Jordi.

\*El parámetro “peligrosidad” viene definido por la integración del valor del calado del agua y el valor de la velocidad del agua, de tal modo se establecen 3 límites:

- **Peligrosidad alta:** si [calado >1 metro] ó [velocidad > 1m/s] ó [calado + velocidad > 0.5 m<sup>2</sup>/s].
- **Peligrosidad moderada:** si el calado está entre 0.5 y 1 metro ó la velocidad está entre 0.5 y 1m/s ó el calado + velocidad están entre 0.25 y 0.5 m<sup>2</sup>/s.
- **Peligrosidad baja:** si [calado < 0.5m] ó [velocidad < 0.5m/s] ó [calado + velocidad < 0.25 m<sup>2</sup>/s].

Para el periodo de retorno T500 años solo se tienen imágenes del valor de calado del agua y de la velocidad, ya que el programa ha dado muchos problemas de cálculo para este periodo y finalmente no se han podido tener resultados para la peligrosidad y el tiempo de permanencia (esto es debido a que la cantidad de datos a analizar era muy elevada, el programa tardó una semana en generar resultados de calados y velocidades por ejemplo).



**Figuras 75:** resultados gráficos del programa IBER 2D del periodo de retorno T500 años y los diferentes parámetros definidos para la cuenca del Pla de Sant Jordi.

## **8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

Una vez expuestos los resultados obtenidos en las sucesivas fases que componen los análisis hidrológico e hidráulico, se procede a su discusión para intentar valorar si han sido productivos o por el contrario se han obtenido malos resultados. También se justifican los métodos empleados y las posibles fuentes de error detectadas a lo largo de todo el trabajo. De nuevo se divide en dos grandes bloques, métodos de análisis hidrológicos y métodos de análisis hidráulicos.

### **8.1 Discusión de los resultados del análisis hidrológico.**

Para el caso del análisis hidrológico, los métodos empleados han sido los estándar que se suelen seguir en la mayoría de los análisis de inundaciones.

Se ha optado por hacer el **análisis estadístico con las precipitaciones máximas diarias anuales** de 9 estaciones meteorológicas repartidas por toda la cuenca del Pla de Sant Jordi, con el fin de tener un mayor número de datos de precipitación a analizar. Aun así, nos hemos encontrado con el problema de que algunas zonas de la cuenca no tenían ninguna estación cercana (las estaciones no estaban repartidas homogéneamente por la cuenca, había varias cercanas entre sí, concentradas en una zona), para solucionar este problema se propuso hacer una interpolación de los valores que sí teníamos a toda la cuenca, y el método elegido para ello fue el kriging, un método geoestadístico frecuentemente usado en estos casos debido a que se basa en la premisa de que puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos a puntos distantes entre sí. De este modo conseguimos que todas las subcuencas que componen el Pla de Sant Jordi tuvieran datos de precipitaciones bastante fiables y ajustados.

Una vez obtenidos los resultados del análisis de precipitaciones mediante el programa informático CHAC y aplicado **el ajuste del test de bondad con el método del error cuadrático mínimo**, se dan como resultado final para este proceso **el mejor ajuste por función**, que en este caso correspondía a la función *Log Pearson III*. El resultado es algo sorprendente, ya que generalmente en anteriores estudios de zonas con clima mediterráneo y por tanto con el régimen de precipitaciones parecido, los mejores ajustes para los modelos los dan las funciones SQRT y TCEV por máxima verosimilitud para el ajuste de parámetros. Esto puede deberse fundamentalmente a dos razones; a que la isla de Mallorca tiene una orografía muy peculiar que no tienen otras regiones mediterráneas (la sierra de Tramontana influye de manera muy importante en las precipitaciones), y a las condiciones especiales de la cuenca del Pla de Sant Jordi (su situación geográfica circundada por cotas altas y su topografía extremadamente plana). Todos estos factores, hacen pensar que el ajuste por *Log Pearson III* es aceptable, por lo tanto se considera como bueno.

Finalmente, os **resultados de los cuantiles de precipitaciones (mm/día)** obtenidos mediante el programa CHAC para las todas las estaciones meteorológicas y diferentes periodos de retorno se consideran adecuados, ya que ningún valor de precipitación parece exagerado y va en consonancia con el clima mediterráneo predominante en la zona.

Con respecto a **los hietogramas**, solo se usaron los datos de 4 eventos excepcionales facilitados por la AEMET (25/01/1991, 06/09/2001, 09/05/2008 y 03/05/2010) debido a que eran los únicos que estaban completos (había datos en intervalos de una hora) y encajaban con las series anuales de precipitaciones máximas diarias. En este caso, el problema vino directamente de los datos proporcionados por la AEMET, muchos de ellos estaban incompletos o eran erróneos (en muchas ocasiones la suma de las precipitaciones

por horas no daba el valor del evento extremo cedido por la AEMET). En tal caso se optó por solo trabajar con los 4 eventos anteriormente descritos y por lo tanto con 4 hietogramas.

**La elaboración de las capas vectoriales** que posteriormente se han usado en los programas hidrológicos se ha realizado con tecnología SIG, concretamente con el paquete ESRI ArcGis (ArcMap), ya que se ha considerado el mejor método de integrar y tratar toda la información geoespacial disponible. Los principales problemas han surgido a la hora de elaborar **la capa de usos del suelo**, ya que se optó por trabajar con *SIOSE* en vez de con *CORINE LAND COVER* para ganar definición (corine generalizaba muchos usos, y para nuestro trabajo era importante catalogar bien hasta las parcelas más pequeñas). Asemejar los usos del suelo de *SIOSE* a *CORINE* ha sido un proceso laborioso pero finalmente se determina que se han conseguido buenos resultados. Lo mismo pasa con la asignación del número de curva, fue un proceso largo de integración de tablas de atributos para conseguir que cada subcuenca tuviera su propio y justificado número de curva. La prueba de que la capa de usos del suelo ha resultado buena es que al introducirla posteriormente en los programas de análisis hidrológicos, estos dan buenos resultados.

**El modelo de cuenca y los caudales punta** obtenidos por el programa HEC-HMS han resultado ser tal y como se esperaban. En un principio surgió el problema de que debido a la topografía extremadamente plana de la zona del Pla, las especificaciones de control definidas no eran adecuadas y tuvieron que ser reajustadas. Lo que se considera el tiempo de simulación que el programa usa para sacar los caudales no era suficiente, al tener muy poca pendiente el agua tardaba mucho tiempo en “escurrir” y llegar al punto de la desembocadura final, ese tiempo fue aumentado y los resultados se consideraron válidos.

**Los hidrogramas e hietogramas obtenidos en HEC-HMS** también han sido los esperados para una cuenca de estas características. En ellos se puede ver como la curva de concentración o ascenso no es inmediata, sino que empieza a aumentar con la precipitación hasta alcanzar el caudal punta, lo que indica que la respuesta de la precipitación – escorrentía no es inmediata. La curva de descenso es muy suavizada y enlaza con la curva de agotamiento. Como es lógico, el valor máximos de caudal se da en el punto final de desagüe para una hora determinada del día, lo que indica que el modelo está bien calibrado.

## 8.2 Discusión de los resultados del análisis hidráulico.

Para el caso del análisis hidráulico se han usado dos métodos diferentes, uno basado en el análisis unidimensional de la cuenca y otro bidimensional, esto se ha llevado a cabo mediante los programas informáticos HEC-RAS y IBER-2D. En un principio se planteó usar solamente el análisis unidimensional HEC-RAS, ya que es el habitual en la mayoría de los estudios de inundación, pero de nuevo las condiciones especiales de la cuenca (topografía muy plana) hicieron necesario el añadido del análisis bidimensional.

**El software HEC-RAS** no ha dado buenos resultados. Para el periodo de retorno T50 años, apenas se reflejaban las zonas susceptibles a inundación y directamente se han desechado. Para el periodo de retorno T500 años si se aprecian dichas zonas, pero los resultados son de mala calidad. Esto se puede ver en que las áreas indicadas en azul (las que indican las zonas inundables), aparecen dispersas y trianguladas, no se observa una lámina de agua homogénea.

El problema por el cual este software no da resultados óptimos de inundación es que no está diseñado para trabajar en zonas tan llanas como es el caso del Pla, ya que al analizar las variables solo unidimensionalmente, la lámina de agua solo se representa en una dimensión (en este caso solo trabaja con la altura Z). Otro problema que nos genera estos resultados, es que la zona analizada tiene un ancho

fijo, y el programa no es capaz de analizar que pasa fuera de ella. Está pensado para actuar en zonas donde la pendiente es mucho mayor y el río por tanto va bastante encajado. Como lo que a nosotros nos interesa ver es como el río desborda e inunda los campos de cultivos adyacentes (ver cuáles y cuanto los inunda) y HEC-RAS no ha sido capaz de proporcionárnoslo se optó por aplicar un software que analizara la zona de forma bidimensional.

**El software IBER 2D** ha funcionado mucho mejor que HEC-RAS, dando unos resultados mucho más realistas. El principal problema que dio este programa fue la elaboración de la malla (de la cual parten todos los cálculos) ya que necesitábamos un MDT con mucha resolución debido de nuevo a la topografía plana del terreno. Este programa te analiza el flujo de la lámina de agua generada en 2D, y crea una simulación de cómo va fluyendo por toda la zona, por esta razón necesitábamos la máxima resolución ya que un simple muro que actué como límite entre parcelas por ejemplo, puede ser un obstáculo y el agua acumularse ahí.

Los cálculos que lleva el programa una vez empezada la simulación son muy complejos, puede llegar a tardar días para devolver una simulación completa (para el periodo de retorno T50 tardó casi dos días y para T500 casi una semana) y en muchas ocasiones se acaba colapsando y el programa se cuelga. Se utilizó un mallado de 10 metros de lado máximo (es decir, hay zonas de hasta 10 metros, pero muchas otras menores) para intentar agilizar los cálculos. Por esta razón se optó por no hacer la simulación para T100 años (se suponía que saldría muy parecida a T50 y se prefería comparar con T500).

**Para el periodo de retorno T50 años, los valores de calado** del agua muestran a buena parte del Pla inundado, únicamente se salvan las pistas que componen el aeropuerto de Son San Joan ya que fueron diseñadas y construidas más elevadas que el resto de las tierras que le rodean, precisamente para evitar estos fenómenos. Los mayores calados (marcados en tonos rojos-anaranjados) se sitúan entre la zona de El Arenal y el pueblo de Sant Jordi, esto se debe a que por esa zona atraviesa de este a oeste la autopista, que actúa como barrera para la escorrentía superficial y produce encharcamientos importantes en ciertas zonas (si observamos la leyenda de color, podemos ver que se pueden llegar a dar valores de 2.5 metros de agua encharcada).

**Los valores de velocidad** más elevados se dan en las partes altas de la cuenca (alcanzando los 1.2 m/s) como es lógico. En la zona norte-noreste y dentro de los barrancos o torrentes que desembocan en el Pla, esto se debe a que la pendiente en esas zonas es mayor. **Los valores de peligrosidad** surgen como una integración del calado y la velocidad, las zonas con mayor peligro se encuentran en la zona central de la cuenca, bordeando el aeropuerto y anegando los campos de cultivos adyacentes. **Los valores de tiempo de permanencia** del agua son muy importantes para los cultivos, ya que cuanto más tiempo permanezca un campo anegado, más cosecha se pierde y más difícil es de recuperar después. Estos valores de nuevo se concentran en la zona central del Pla.

**Para el periodo de retorno T500 años, los valores de calado** son bastante superiores a los de T50, donde el valor máximo estaba alcanzado estaba en 3 metros y para T500 se pueden llegar a alcanzar casi los 5 metros. Los valores de velocidades también son superiores, pasando de los 1.2 m/s a los casi 2.5 m/s.

Todos estos resultados finales no han sido adecuadamente calibrados debido a que en la zona no se dispone de mucha documentación histórica para comparar, ni tampoco placas o marcas que puedan indicar inundaciones pasadas.

## **9. CONCLUSIONES.**

La cuenca del Pla de Sant Jordi se desecó en el siglo XIX, antes de esto la zona era considerada como pantanosa, el nivel freático subía y bajaba continuamente y por tanto la zona apenas era aprovechable para desarrollar alguna actividad productiva (solo había campos de cultivos propiedad de los habitantes de cercanos). Esas aguas estancadas provocaban continuos problemas a las poblaciones cercanas (anegamiento de los pocos campos de cultivos que había con sus correspondientes pérdidas económicas, proliferación de insectos etc..) y fue por estos motivos por los que se tomó la decisión de desecar el Pla. Sin embargo lo que en primera instancia parecía una buena solución ha resultado ser insuficiente, y los problemas de inundación siguen dándose a día de hoy. Viendo la necesidad de resolver un problema real, surge la idea de plantear este trabajo fin de master, con el fin de analizar hidrológica e hidráulicamente la cuenca del Pla.

A continuación se muestran las conclusiones principales obtenidas de este trabajo fin de máster.

- Los problemas de inundación que se dan en la cuenca del Pla de Sant Jordi se manifiestan cada vez que se produce un evento de precipitaciones un poco elevado, son estacionarios y rara vez se pueden prever. Esto hace que sea un problema muy presente en la vida de los habitantes del Pla, ya que les afecta directamente de diversas formas: anegando campos de cultivos, vías de comunicación, el aeropuerto de Son Sant Joan y además, se ha convertido en un problema de salud pública ya que proliferan insectos y aves.
- Las zonas que más sufren los fenómenos de inundación son las que rodean al aeropuerto de Son Sant Joan (sobretudo campos de cultivo) y todas las zonas centrales de la cuenca, ya que son las que tienen cotas más bajas. En esa zona central era donde se situaba la antigua bahía.
- La elevada demanda turística de la zona ha provocado la modificación del paisaje natural, interrumpiendo en muchos casos el flujo natural del agua y provocando embalsamiento en ciertas zonas que antes no se veían afectadas. En general, los cambios antrópicos sufridos por la zona contribuyen de manera muy importante a las inundaciones.
- La topografía de la cuenca extremadamente llana ha supuesto un problema a lo largo de todo el proceso, ya que muchos de los programas informáticos usados en estos casos no están diseñados para trabajar en este tipo de condiciones.
- Una vez analizados los resultados obtenidos, se puede estimar que los métodos elegidos para este trabajo han sido los adecuados y se han conseguido todos los objetivos marcados inicialmente.
- Los resultados obtenidos sirven como una primera y buena estimación al análisis de peligrosidad de la zona del Pla, y mejoran significativamente los estudios anteriormente publicados para esta zona.
- Se considera que estos resultados pueden ser integrados en un futuro con la vulnerabilidad y la exposición para estimar el riesgo total de la zona, pudiendo servir esto para delimitar y cartografiar áreas con riesgo potencial de inundación con el fin de adoptar medidas preventivas o diseñar planes de emergencias.

## **10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

**ABAQA (2010):** *Estudihidrològic de la conca Pla de Sant Jordi. T.M. de Palma de Mallorca. Modelització hidràulica superficial en dues dimensions i model piezomètric d'aigües subterrànies.* Agència Balear de l'Aigua i de la Qualitat Ambiental. Conselleria de Medi Ambient (Govern de les Illes Balears). Consultor HQA. Palma de Mallorca, 22 pp.+ planos.

**BESTARD CLADERA, B. (2014):** *El Prat de Sant Jordi y sus intentos de desecación.* BALEARIDES digital. Palma de Mallorca.

**BOE núm. 221 de 14 de Septiembre de 2001.,** *Plan Director del Aeropuerto de Mallorca.*

**CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO. SERVICIO HIDRÁULICO (1987):** *Hidrogeología de la Isla de Mallorca.* Madrid, 86 pp.

**CUNNANE, C. (1988):** Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 100, 269-290.

**DE LA O, A. I GIL, I. (1996):** *Drenaje del Pla de Sant Jordi (Palma de Mallorca).* Ministerio de Agricultura i Conselleria d'Agricultura. Mallorca, 97 pp.

**DÍEZ-HERRERO, A.; LAÍN-HUERTA, L. y LLORENTE-ISIDRO, M. (2008):** *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración.* Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 190 pp.

**DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MALLORCA (2012):** *Plan de Gestión del Agua en las Islas Baleares.* Mallorca, 55 pp.

**DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (M. O. P. U., 1997):** *Instrucción de carreteras 5.2-IC.* Madrid, 17 pp.

**EMAYA (Empresa Municipal d'Aigües i Clavegueram) 2012:** Estudio hidrológico de la cuenca del Pla del Sant Jordi. Mallorca, 68 pp.

**ESTUDIO DE INGENIERÍA Y URBANISMO (ESTIU, 2007):** *Estudio de soluciones para el drenaje del tramo final del Torrent de Sa Siquia en la playa de Palma.*

**FERRER, M. (2004):** *Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva del modelo hidrológico del SCS: datos de perfiles de suelos y Teledetección.* CEDEX (Ministerio de Fomento), Monografías C-48.

**FERRER POLO, F. J. (2000):** *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas.* CEDEX, 74 pp.

**GARCÍA BARTUAL, R. (1998):** *Desagregación de series de lluvia para aplicaciones en simulación de sistemas de recursos hidráulicos.* Revista de obras públicas. Madrid, 24-29 pp.

**GEORGE, J., ARCEMENT, J.R., and VERNE, R. SCHNEIDER (1989):** *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains.* United States Geological Survey Water-Supply. Prepared in cooperation with the United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. Denver, 44 pp.

**GOY, J.L., ZAZO, C. Y CUERDA, J. (1997):** *Evolución de las áreas margino-litorales de la costa de Mallorca (I. Baleares) durante el último y presente interglacial: nivel del mar holoceno y clima.* Boletín Geológico y Minero. (108-4) 455-463 pp.

**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1991):** *Memoria mapa Palma (I. del Toro y Cap de cala Figuera), Escala 1:50000.*

**LÓPEZ-GRACÍA, J. M. (2003):** *Recarga de acuíferos con agua residual depurada en el llano de Palma de Mallorca. 30 años de experiencia. Simposio sobre el agua y la ciudad sostenible: hidrogeología urbana.* Barcelona. 12 pp.

**M. J. I. (1995):** *Resolución de 31 de enero, Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.* B. O. E., 38 (14 febrero), 4846-4858 pp.

**MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. Y NAVARRO HEVIA, J. (1996):** *Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico.* Universidad de Valladolid. Valladolid. 283 pp.

**PHILLIPS, J.V. AND TADAYON, S. (2007):** *Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona.* United States Geological Survey Water-Supply. Prepared in cooperation with the Flood Control District of Maricopa County. Virginia, 49 pp.

**ROSELLÓ I VERGER, V. M. (1959):** *El Prat de Sant Jordi y su desecación.* Boletín de la Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Palma de Mallorca. 622, 1-10 pp.

**SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F. J. (2013):** *Tránsito de hidrogramas.* Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. 10 pp.

**SGOP (1968):** *Estudio Hidrogeológico del Llano de Palma.* Director Angel García Yagüe. Informe inédito. Servicio Geológico de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas.

**SGOP (1972):** *Informe Hidrogeológico del Llano de Palma.* Ramón Llamas. Informe inédito. Servicio Geológico de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas.

### **PÁGINAS WEB:**

[www.pocapoc.org](http://www.pocapoc.org), (2008): *Mallorca despierta 2015.*

[www.ultimahora.es](http://www.ultimahora.es), *UH Noticias Local (2010): Decenas de personas exigen soluciones a Calvo para combatir la plaga de mosquitos.*

[www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) : Búsqueda "Kriging".