



**INFORME DE RESULTADOS EN VIRTUD DEL CONVENIO ESPECÍFICO DE COLABORACIÓN ENTRE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AIGÜES I CLAVEGUERAM S.A. DE PALMA DE MALLORCA Y EL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA PARA EL ESTUDIO CIENTÍFICO-TÉCNICO DE LAS INUNDACIONES EN EL PLÁ DE SANT JORDI (PALMA DE MALLORCA, BALEARES)**

**(TOMO II)**

**(En Palma de Mallorca, enero de 2016)**



## **PARTE 5**

### **SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA CON UN MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO PARA EL ESTUDIO DE LAS INUNDACIONES DEL PLA DE SANT JORDI**

#### **Equipo de trabajo**

Carolina Guardila Albert

Pedro Agustín Robledo Ardila



## TABLA DE CONTENIDOS

OBJETO DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO.....	3
ACUÍFERO SUPERIOR PLIO-CUATERNARIO DEL PLA DE SANT JORDI.....	4
DEFINICIÓN DEL ACUÍFERO .....	4
PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS .....	6
BALANCE DE AGUA.....	7
ENTRADAS .....	8
SALIDAS.....	9
PIEZOMETRÍA.....	10
METODOLOGÍA: MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO .....	13
ANTECEDENTES .....	13
MODELIZACIÓN .....	13
DISEÑO DEL MODELO: DOMINIO, CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES .....	13
CALIBRACIÓN .....	16
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE .....	18
RESULTADOS: CUANTIFICACIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS .....	20
RECARGA POR PRECIPITACIÓN 2006-2012.....	20
RETORNOS DE RIEGO .....	21
OTRAS MASAS DE AGUA.....	22
POZOS DE DRENAJE DEL AEROPUERTO .....	23
EXTRACCIONES.....	24
EXTRACCIONES EMAYA.....	25
RESULTADOS: SIMULACIÓN 2006-2012 .....	27
CALIBRACIÓN .....	27
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	30
PIEZOMETRÍA.....	32
BALANCE DE AGUA.....	1
RELACIÓN DE LAS INUNDACIONES Y EL NIVEL PIEZOMÉTRICO SEGÚN EL MODELO. CONCLUSIONES	0

BIBLIOGRAFÍA .....	1
ANEXOS .....	2
ANEXO I. PIEZOMETRÍA .....	2
ANEXO II. UBICACIÓN DE LAS EXTRACCIONES .....	4
ANEXO III. CALIBRACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS POR ZONAS .....	5
ZONA NORTE CERCANA AL ULLAL DE SON MIR .....	5
ZONA NORESTE .....	6
ZONA NORESTE .....	7
ZONA NORTE-CENTRAL .....	8
ZONA NOROESTE SUPERIOR.....	9
ZONA SURESTE.....	10
ZONA CENTRAL-OESTE.....	11
ZONA SURESTE.....	12
ANEXO IV. INSTALACIÓN DEL MODELO .....	13
INSTALACIÓN DEL PROGRAMA MODEL MUSE .....	13

## **OBJETO DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO**

El Pla de Sant Jordi es una zona endorreica desecada en el siglo XIX que experimenta fenómenos de inundación con relativa frecuencia, siempre ligados a eventos de precipitaciones extremas. Dichas inundaciones, y su permanencia en el tiempo, causan importantes pérdidas económicas en los campos de cultivo afectados, así como molestias a los vecinos y daños en las vías de comunicación, como caminos de servicio del aeropuerto de Son Sant Joan ubicado en el centro del Pla o accesos a zonas urbanas. Se trata de una zona relativamente llana que apenas supera los 10 m s.n.m de cota máxima y un drenaje al mar a través del torrente Gros y la acequia sa Siquia, al oeste y este del área de estudio. La superficie del terreno constituye una parte del techo del acuífero detrítico libre subyacente. Este aspecto pone de relieve la posible influencia que las oscilaciones de los niveles piezométricos pueden tener en las inundaciones si superan la cota de la superficie del terreno. Sin embargo, esta relación directa entre las inundaciones y el acuífero no se conoce en detalle.

A pesar de que los modelos matemáticos construidos hasta los años 90 consiguen reproducir el comportamiento general del acuífero del Pla de Sant Jordi, han quedado obsoletos ya que no llevan incorporados la continua mejora del conocimiento de la zona ni las modificaciones a las que se ha sometido el entorno físico

El presente trabajo consiste en la realización y aplicación de un modelo matemático de flujo de aguas subterráneas con el objetivo de cuantificar la relación entre acuífero del Pla de Sant Jordi y las inundaciones que afectan a la zona durante episodios de lluvias fuertes.

MODFLOW es el código numérico en diferencias finitas (McDonald y Harbaugh, 1988) más utilizado a escala mundial. Adicionalmente ModelMuse ofrece una interfaz de fácil manejo. Ambos programas han sido desarrollados por el Servicio Geológico Americano (USGS) y han sido utilizados para la modelación matemática del acuífero del Pla de Sant Jordi. En el Anexo IV se explica cómo instalar el modelo.

Como punto de partida para la realización del modelo se han consultado los modelos anteriores efectuados por el Servicio Geológico de Obras Públicas (1973), por el Servicio Hidráulico de Baleares (1976, 1978, 1980) y por la Dirección General de Recursos Hidráulicos (1995). El modelo tiene en cuenta las características climatológicas y geológicas reales así como las estructuras antrópicas existentes. Para ello se ha implementado toda la información recogida en las otras actividades del convenio en el que se enmarca este trabajo (Convenio Específico de Colaboración entre la Empresa Municipal de Aïgues i Clavegueram S.A. de Palma de Mallorca y el Instituto Geológico y Minero de España para el Estudio Científico-Técnico de las Inundaciones del Plá de Sant Jordi Palma de Mallorca, Baleares). El periodo para el que se dispone de mejor información sobre las actividades antrópicas relacionadas con las aguas subterráneas es 2006-2012, por lo que ha sido seleccionado para la construcción y calibración del modelo.

# ACUÍFERO SUPERIOR PLIO-CUATERNARIO DEL PLA DE SANT JORDI

## Definición del acuífero

El Pla de Sant Jordi constituye el sector central meridional del Llano de Palma (figura 1), que forma parte de un graben que se formó con posterioridad al Mioceno medio tras la finalización del régimen compresivo que supuso la orogenia alpina. Es el Llano de Palma una cuenca subsidente delimitada por fracturas de origen tectónico que se ha ido colmatando con sedimentos postorogénicos desde el Mioceno superior hasta el Cuaternario (Barón, 1987).

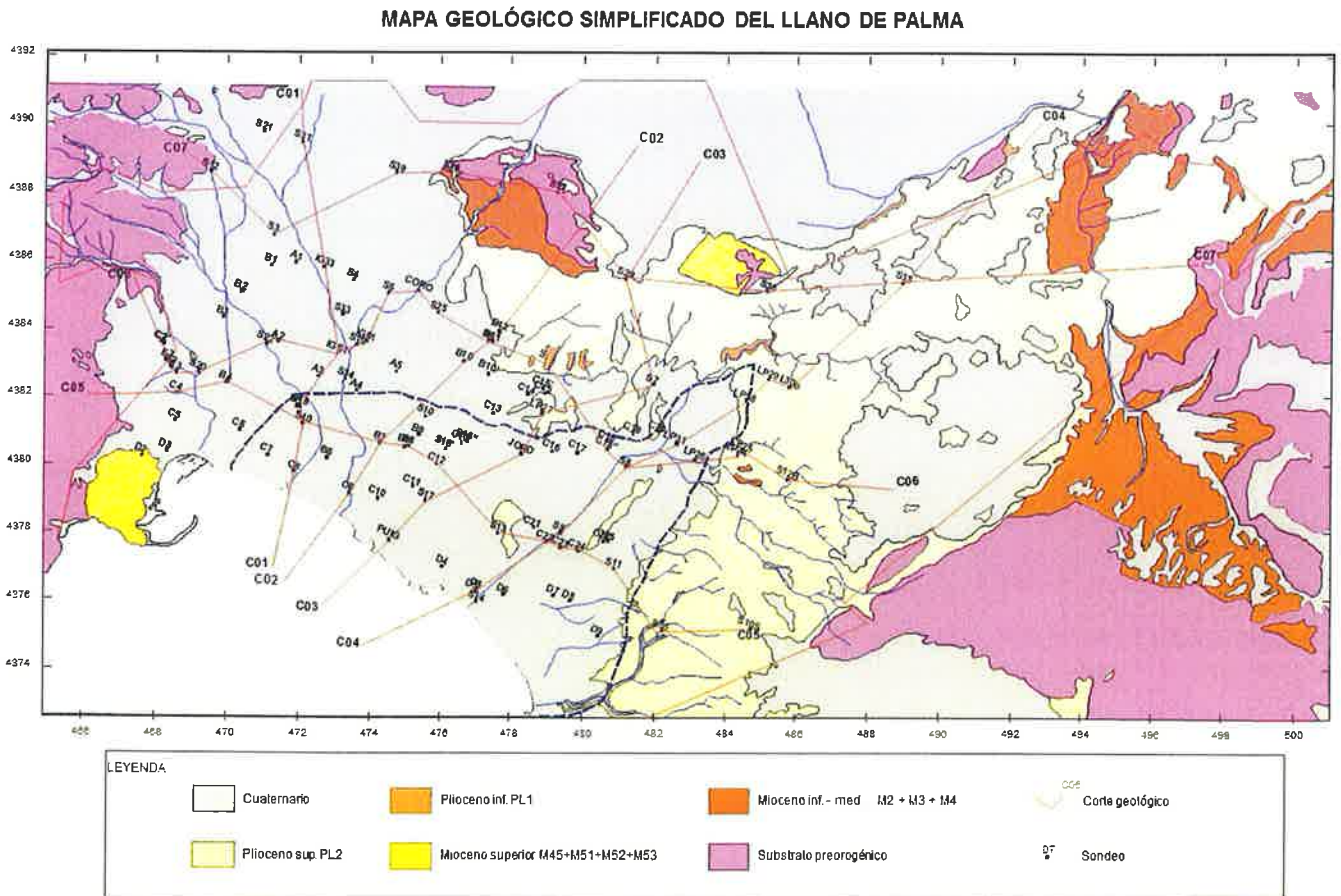


Figura 1. Mapa de situación del acuífero del Pla de Sant Jordi (línea discontinua). Figura tomada de IGME (2012).

El acuífero que se estudia en el presente trabajo está formado por niveles del Plioceno superior y del Cuaternario. Está limitado inferiormente por una capa impermeable de margas y calcisiltitas del Plioceno inferior que afloran de forma aislada pero se reconocen fácilmente en los sondeos (figura 2). El paso de la capa impermeable a la permeable es gradual. Este acuífero se encuentra al suroeste abierto al mar a lo largo de toda la línea de costa comprendida entre la ciudad de Palma y la localidad de El Arenal. Al norte está delimitado por las paleo-islas del Mioceno y al este por una línea de erosión. Es un acuífero libre de área 126,636 km<sup>2</sup>, correspondiente a la Masa de Agua Subterránea (MAS) 1814M2 Sant Jordi, de acuerdo a la definición y los requisitos de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000). También se le conoce como el acuífero de la Playa de Palma.

El Plioceno superior corresponde a la llamada unidad de Calcarenitas de Sant Jordi, que aflora extensamente en el borde oriental del Llano de Palma. Su potencia es variable, alcanzando un máximo de 70 m, y está formada por unas calcarenitas ricas en foraminíferos y ostrácodos, muy porosas y carstificadas que evolucionan verticalmente a calcarenitas y lumaquelas con estratificación cruzada de gran escala, que se interpretan como depósitos litorales (shoreface y foreshore), que hacia el techo presentan depósitos atribuibles a dunas.

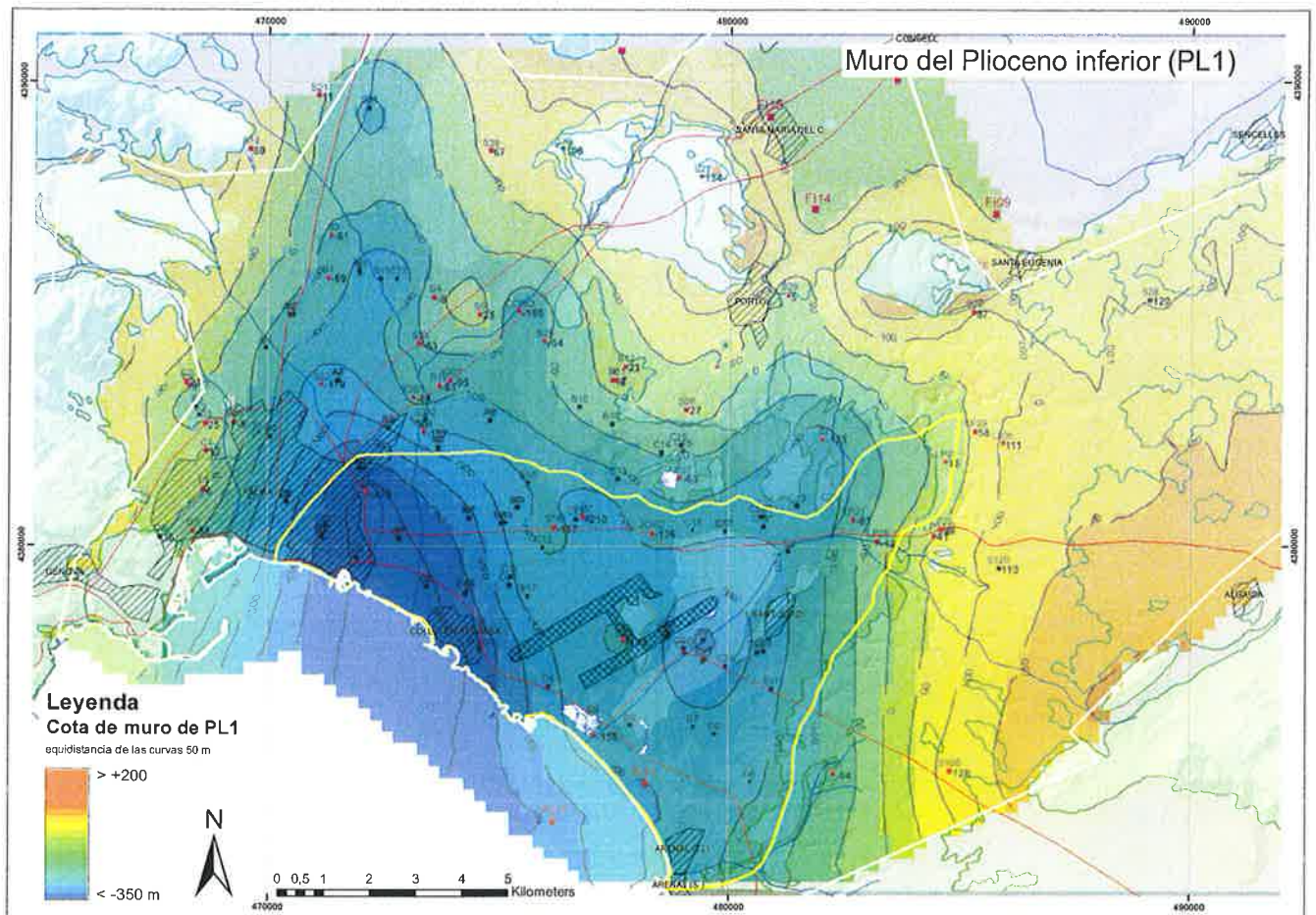


Figura 2. Superficie que delimita el muro del acuífero. Figura tomada de IGME (2012).

El Cuaternario, también denominado unidad de Limos Rojos de Palma, posee potencias variables que pueden oscilar desde inexistentes hasta más de 200 m, con una potencia media de 40 m. Estos sedimentos se disponen mediante una superficie erosiva sobre los materiales subyacentes. Litológicamente está constituida por limos rojos que intercalan niveles de conglomerados procedentes de abanicos aluviales (aluvial fan). En menor medida se intercalan depósitos de carbonatos y limos negros de tipo lagunar o lacustre. Hacia el techo y en los bordes de la cuenca aparecen intercalaciones de arenas litificadas (marés) que responden a depósitos de origen eólico relacionados con las fluctuaciones eustáticas del Tirreniense (Pleistoceno).

El mapa del muro del acuífero (figura 2) se ha modificado a partir de los datos de Curtosis et al. (2000b). Este mapa marca la presencia de dos paleovalles con vergencia sur, así como otro con vergencia norte situado al norte de la ciudad de Palma (IGME, 2012).

## PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Los ensayos de bombeo realizados por el IGME en el acuífero Plio-Cuaternario arrojan coeficientes de almacenamiento del orden de 1 a 2% y una transmisividad entre 10 y 1000 m<sup>2</sup>/d (IGME, 2012). En cambio, en el último modelo realizado en 1995 por la Dirección General de Recursos Hidráulicos los valores calibrados varían entre 1250 y 10000 m<sup>2</sup>/d (YACU, 1995). Curtosis (1995a) sugiere que los valores deberían encontrarse entre 150 y 5000 m<sup>2</sup>/d. Para el presente modelo se ha introducido unos valores de transmisividad en función de las litologías. Los valores iniciales de la calibración del modelo realizado han sido tomados de IGME (2012, figura 3). Los valores finales de la calibración serán comentados en el apartado de resultados.

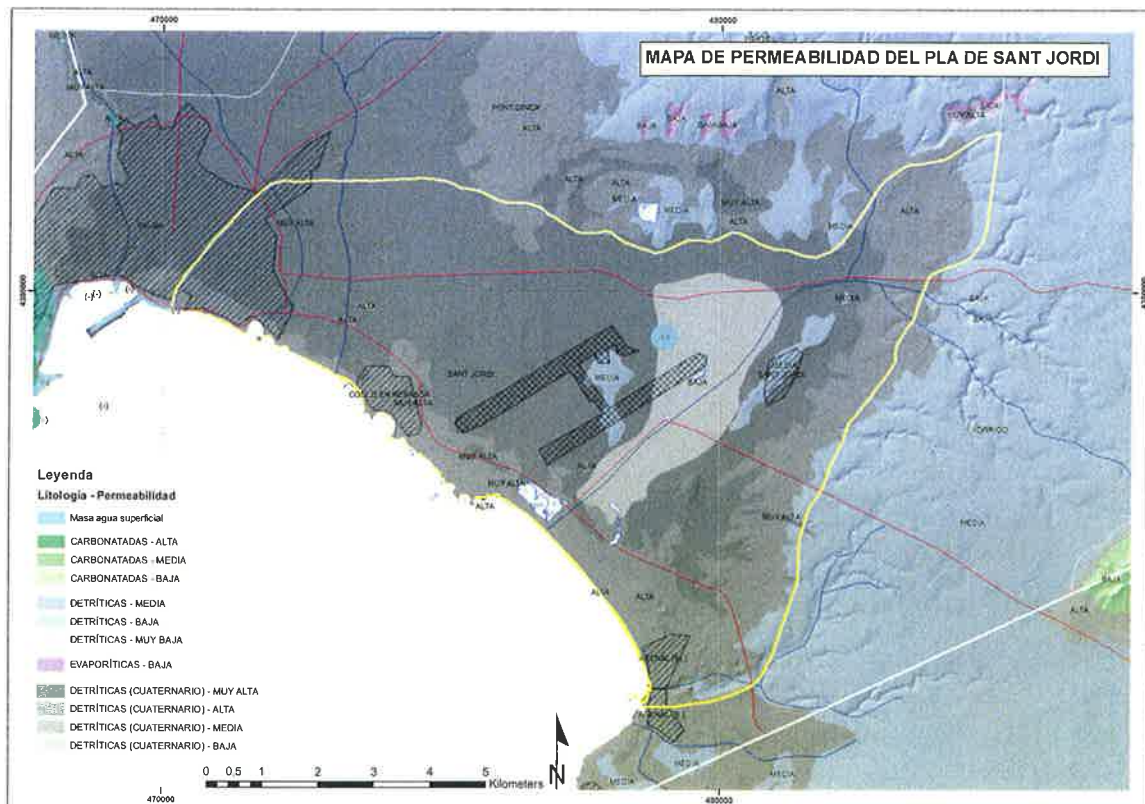


Figura 3. Zonas de transmisividad definidas en el modelo. Valores iniciales de calibración. Figura tomada de IGME (2012).

Por otro lado, según el modelo de YACU (1995), el coeficiente de almacenamiento debe de estar entre 0,10 y 0,30 en materiales detríticos cuaternarios y entre 0,02 y 0,04 para las calcarenitas. Curtosis 1995a afirma que los valores del coeficiente de almacenamiento deberían variar entre 0,01 y 0,03. En el modelo de YACU (1995) la calibración realizada llegó a la conclusión de que los coeficientes de almacenamiento eran homogéneos en todo el modelo con un valor del 20%. Esta misma aproximación ha sido tomada en el presente modelo.



## Balance de agua

El balance constituye la información fundamental que permite la correcta caracterización del funcionamiento del acuífero, analizando de forma pormenorizada cada uno de los elementos que constituyen las entradas y salidas de agua en el sistema.

La ecuación que define el cálculo del balance en un acuífero para un año hidrológico sería:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta \text{ Almacenamiento}$$

Entre las entradas la infiltración eficaz de la precipitación constituye el componente principal de la recarga al sistema, junto con los retornos de riegos, los flujos procedentes de masas vecinas, los vertidos de aguas residuales y la intrusión de agua en la línea de costa. Se desprecia la infiltración a través de los torrentes y por pérdidas en las redes urbanas (abastecimiento y alcantarillado).

En las salidas, el componente principal considerado es el bombeo de aguas subterráneas para satisfacer las demandas de abastecimiento a la población, el regadío, usos domésticos de población diseminada (no conectada a las redes de abastecimiento), ganadería, industria y venta de agua. Además del bombeo, se consideran las salidas a humedales y la salida al mar.

ENTRADAS (hm <sup>3</sup> /a) tomadas de la media anual 1985-2006		SALIDAS (hm <sup>3</sup> /a) tomadas del año 2006	
Infiltración de agua de lluvia (15% de la lluvia)	4,43	Abastecimiento en red	1,68
Retornos de riego	1,60	Agrojardinería	2,04
Pérdidas redes abastecimiento	0,50	Industria	0,16
Pérdidas alcantarillado	0,12	Regadío	0,00
Transferencia entre MAS	5,30	Humedales	0,50
Intrusión marina		Ganadería	0,68
Infiltración de torrentes		Salidas al mar	6,90
Total entradas	11,95	Total salidas	11,95

Tabla 1. Balance de la masa de agua subterránea (MAS) de Sant Jordi 18.14M2, según el derogado Plan Hidrológico de las Illes Balears (PHIB 2013).

Estos balances no son fijos, y sus datos varían en función del cambio en las variables consideradas: variación en la pluviometría, modificación del régimen de bombeos, etc. La propuesta del derogado Plan Hidrológico de las Islas Baleares 2013 (PHIB, 2013) emplea los datos correspondientes a las extracciones reales cuantificadas en 2006 para el cálculo de las salidas y los valores medios anuales del periodo 1985-2006 para las entradas. Los datos aportados por este balance se recogen en la tabla 1. Estos valores son algo diferentes a los correspondientes al modelo objeto del presente estudio. En este trabajo tanto las entradas como las salidas han sido estimadas mensualmente con los datos disponibles

para el periodo simulado 2006-2012, de ahí las diferencias entre la tabla 1 y los valores del modelo. Otras diferencias serán descritas y analizadas en el apartado denominado “Calibración 2006-2012”.

## Entradas

A continuación se resumen las entradas consideradas para la elaboración del presente modelo matemático durante el periodo 2006-2012. Las diferencias de algunos de los valores calculados para el presente modelo con los considerados en el PHIB (2013) se deben a que las entradas del modelo han sido calculadas de forma mensual en el período de cálculo 2006-2012, según la precipitación mensual y la calibración realizada. Otro factor que influye ligeramente es que el área modelada es algo menor a el área delimitada por la masa de agua. En el caso del PHIB (2013) los valores considerados son anuales, en un período mucho mayor (1985-2006) con varios periodos de sequía.

- *Infiltración de agua de lluvia*: se estima en  $5,67 \text{ hm}^3/\text{a}$  para el periodo 2006-2010 (años hidrológicos) a partir de una precipitación media para el conjunto de la masa de Sant Jordi de 514 mm. Esto equivale a una infiltración del 15%, valor tomado del PHIB 2013.
- *Procedencia de otras masas de agua subterránea*:  $2 \text{ hm}^3/\text{a}$  procedentes de la vecina unidad de Xorrigo que limita la masa de Sant Jordi en su mitad nororiental, y  $2 \text{ hm}^3/\text{a}$  procedentes de la masa del Pont d’Inca que bordea la masa de Sant Jordi en su mitad noroccidental. Para poder ajustar los niveles en el entorno del Ullal de Son Mir ha sido necesario introducir una entrada “extra” en esta zona de unos  $3,1 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Estas cifras arrojan unos  $7,1 \text{ hm}^3/\text{a}$  de entradas de otras masas, mientras que el PHIB (2013) los cuantifica en  $5,3 \text{ hm}^3/\text{a}$ .
- *Retornos de riego*: el cálculo de los retornos de riego se ha estimado en un factor equivalente al 11% de la dotación de riego aplicada en la superficie cultivable de la masa de Sant Jordi, que es de  $17,00 \text{ hm}^3$  de acuerdo con el volumen existente de concesiones para riego con aguas residuales depuradas en el año 2006, lo que fija el valor de retorno en  $1,9 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Estos retornos de riego son comparables a los considerados en el PHIB (2013), estimados en  $1,6 \text{ hm}^3/\text{a}$ .
- *Pozos absorbentes del aeropuerto*: Existe un sistema de drenes en torno al aeropuerto que fue construido en 1965 y ampliado por última vez en 1997. El valor estimado de drenaje de dichos pozos es de  $0,79 \text{ hm}^3/\text{a}$ .
- *Entradas desde el mar*: El balance que maneja el derogado Plan Hidrológico 2013 reduce la entrada de agua de mar prácticamente al sector de Porto Pi, eliminando cualquier cuantificación en la masa de Sant Jordi, dada la casi inexistente explotación intensiva del acuífero al haberse sustituido el riego con aguas subterráneas por la aplicación de aguas residuales depuradas. El balance obtenido con el modelo estima en  $0,01 \text{ hm}^3/\text{a}$  la entrada por el límite con el mar, en consonancia con lo considerado en el PHIB (2013).

No se ha considerado la infiltración proveniente de los torrentes. Por un lado no existe control de aforo de los torrentes en este sector. Por otro lado las rieras en la zona de estudio funcionan de forma esporádica dado su carácter de respuesta inmediata a las precipitaciones más intensas, momento en el que el caudal es descargado de forma rápida al mar, por lo que pueden considerarse despreciables (Servicio Geológico de Obras Hidráulicas, 1968; PHIB, 2013). Tampoco se han tenido en cuenta las pérdidas en redes de abastecimiento (el Plan Hidrológico estima estas pérdidas en  $0,50 \text{ hm}^3$ ), ni las pérdidas en el alcantarillado ( $0,12 \text{ hm}^3/\text{a}$  según el PHIB (2013)), ni ningún tipo de inyección de las aguas depuradas de Sant Jordi.

## Salidas

Al igual que ocurre con las entradas las diferencias entre los valores introducidos en el modelo y los valores del PHIB (2013) se deben al cálculo mensual realizado por el modelo y al recorte del área modelada. Las salidas del sistema que se han estimado e incluido en el modelo matemático para el periodo 2006-2012 son:

- *Extracciones*: El valor medio de las extracciones es de  $3,2 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Este valor es ligeramente inferior a las extracciones del año 2006 (unos  $4,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ ) en parte porque algunos sondeos quedan fuera del área modelada. Estas extracciones incluyen abastecimiento en red, agrojardinería e industria, que
  - *Abastecimiento en red y consumo disperso*: se cifra en  $1,98 \text{ hm}^3/\text{a}$ , mientras que en el PHIB se hablaba de  $3,71 \text{ hm}^3/\text{a}$  ( $1,68 \text{ hm}^3/\text{a}$  de abastecimiento en red y  $2,04 \text{ hm}^3/\text{a}$  de consumo disperso). Estas variaciones se deben a que existen numerosas extracciones fuera de la zona modelada y dentro de los límites de la masa de agua.
  - *Industria*:  $0,16 \text{ hm}^3/\text{a}$ .
  - *Ganadería*:  $0,53 \text{ hm}^3/\text{a}$ , ligeramente inferior que los  $0,68 \text{ hm}^3/\text{a}$  del PHIB (2013) por el mismo motivo mencionado anteriormente, la ubicación de ciertas extracciones fuera de la zona modelada.
  - *Bombeo de drenes construidos por EMAYA*: media de  $0,37 \text{ hm}^3/\text{a}$ .
- Descarga a torrentes:  $0,00 \text{ hm}^3$ .
- Descarga en manantiales:  $0,00 \text{ hm}^3$ .
- *Humedales*: no se ha considerado el caudal aportado por el sistema al mantenimiento de los humedales del Prat de Ses Fontanelles, Pla de Es Pillarí y Pla Aeropuerto.
- *Transferencia a otras masas*: de acuerdo con los datos de flujo obtenidos del análisis de los mapas piezométricos la masa de Sant Jordi recibe agua de las vecinas Xorriego y Pont d'Inca y descarga al mar. No existe por lo tanto salida de agua a masas vecinas.
- *Descarga al mar*: constituye tradicionalmente el término final en el cálculo del balance al ser el más difícil de cuantificar directamente y por lo tanto acumula los errores existentes en todos los términos anteriores de la ecuación. El análisis del sistema en un largo periodo de tiempo elimina el factor de variación en el almacenamiento de la ecuación general del balance como factor de incertidumbre, permitiendo igualar las entradas del sistema a las salidas para una situación de equilibrio a medio-largo plazo. La descarga al mar es equivalente a  $17,03 \text{ hm}^3/\text{a}$  a lo largo de la superficie de contacto del acuífero Plio-Cuaternario de Sant Jordi con el mar. Esta diferencia con los valores del PHIB (2013) que lo valoraban en  $6,7 \text{ hm}^3/\text{a}$ , se deben a que un valor está estimado en un periodo seco y el otro en un periodo mucho más amplio en el que se incluían sequías.

Existe una variación en el almacenamiento de la ecuación del balance. Esto viene indicado por la evolución de los niveles piezométricos que muestra un progresivo aumento en los últimos años. En realidad este incremento suple los fuertes descensos de años anteriores debidos a la intensa explotación del acuífero, lo que dio lugar a la entrada de agua de mar en el sistema.

## PIEZOMETRÍA

Se ha realizado un estudio de la evolución de los niveles freáticos en el Llano de Palma a partir de las bases de datos procedentes de las redes de control del IGME y de la Dirección General del Recursos Hídricos del Govern Balear (DGRH) entre los años 1968 y 2015. Se han considerado exclusivamente los piezómetros que atraviesan el acuífero libre Plio-Cuaternario, filtrando los datos procedentes de los piezómetros que alcanzan el acuífero inferior mioceno.

Para construir un modelo que represente de forma fiable la situación actual del acuífero se decidió que el periodo de funcionamiento del mismo fuese 2006-2012, por el buen conocimiento de las entradas y salidas al acuífero en este periodo. De esta forma los datos piezométricos empleados para calibrar el modelo corresponden a este periodo.

El estudio de la piezometría permitió redefinir los límites del acuífero en la parte este (oriental). En esta zona los niveles piezométricos indican que el acuífero superior no llega a tener agua por lo que se decidió desplazar el límite este (oriental) del acuífero eliminando esta zona para evitar problemas numéricos con celdas secas (figura 4). Concretamente los sondeos MA0553, MA0530, MA0538 y MA0539 están midiendo el acuífero mioceno. El punto MA0530 mide, según el perfil del sondeo, otro pequeño nivel acuífero que está entre el mioceno arrecifal y el plioceno. Es la unidad acuífera del Pont d’Inca. En cualquier caso, no tiene nada que ver con el nivel plioceno, cuyo muro queda en una cota superior al nivel piezométrico que se registra en ese punto. Por tanto, también se ha descartado.

También se han revisado los puntos en el margen norte. El sondeo MA0533 mide claramente el Plioceno superior, al igual que el MA0515. Los piezómetros MA0516, MA0550, MA0531, MA0512, MA0510, MA0497, MA0460 y MA0490 atraviesan todo el conjunto Plio-Cuaternario. El que queda corto y sólo toca Cuaternario es el MA0461, que no se ha tenido en cuenta en este modelo para eliminar incongruencias entre dos puntos inmediatos espacialmente. Este punto se podría usar si se quisiera diferenciar entre Plioceno y Cuaternario.

Por otro lado en el tratamiento de datos fue necesario corregir la base de datos de algunos piezómetros en los que se realizaron trabajos de mejora en las arquetas, variando el nivel de referencia de los mismos. Estos piezómetros fueron: MA0443, MA0492, MA0493, MA0496, MA0498, MA0500, MA0501, MA0514, MA0518, MA0533, MA0548, MA0550 y MA0551 (ver el capítulo X, apartado de Estudio hidrogeológico).

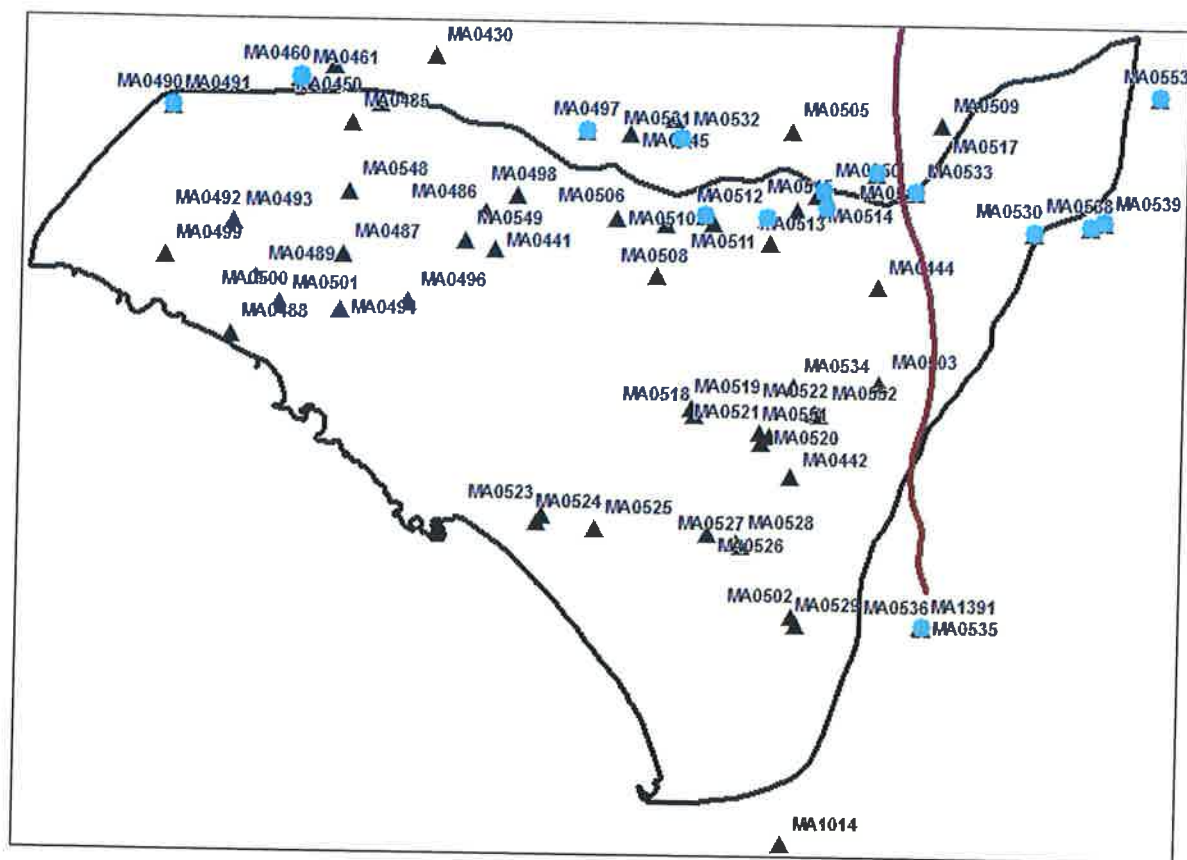


Figura 4. Piezómetros existentes en la zona del acuífero. La línea de color marrón corresponde con el nuevo límite con el que se ha redefinido la geometría del modelo. En azul se han resaltado los piezómetros mencionados en el texto.

Se han tomado las correcciones de niveles anómalos y coordenadas las coordenadas de 5 puntos (ver parte 3 de este documento) con desplazamientos poco significativos. En el caso del Ullal de Son Mir (o S'hort de S 'Ullal) esta corrección es importante.

En total se han considerado 51 piezómetros para la calibración durante el periodo 2006-2012 (tabla AI.1 del Anexo I). Como hay una gran cantidad de información piezométrica, para describir el comportamiento del acuífero en las distintas zonas del mismo, se han elegido 9 piezómetros representativos de cada una de ellos. Estos piezómetros se destacan en la tabla AI.1 del Anexo I con negrita. La situación de todos los piezómetros está representada en la Fig. 5.

El modelo comienza a funcionar en abril de 2006, por lo que la piezometría medida en esta época ha sido tomada como niveles iniciales en los cálculos del modelo.

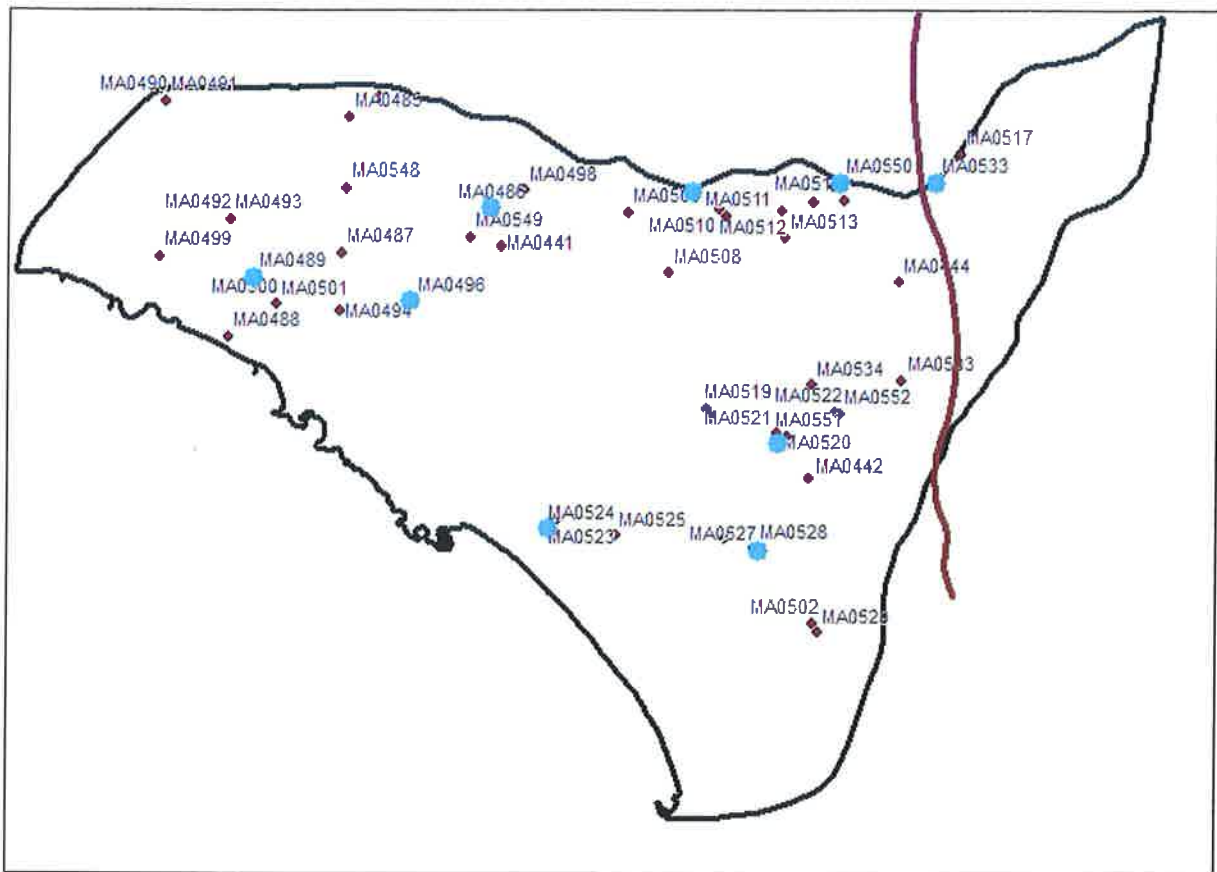


Figura 5. Ubicación de los 51 piezómetros empleados en la calibración durante el periodo 2006-2012, destacando los 9 que se han elegido como representativos de las distintas zonas del acuífero.

## METODOLOGÍA: MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO

### Antecedentes

En 1976 a petición del Servicio Hidráulico de Baleares la empresa consultora INTECSA realizó un estudio titulado “Estudio de la explotación de los acuíferos del Llano de Palma mediante un modelo matemático en régimen transitorio”. Consistía en un modelo matemático bidimensional simplificado cuyo objetivo era comprobar la distribución de transmisividades, coeficientes de almacenamiento y condiciones de borde. Las simplificaciones del modelo respondían a la necesidad de representar un medio hidrogeológico muy complejo del cual apenas se disponía de información. El estudio consistió en la calibración en régimen transitorio de un modelo basado en la formulación de Prickett y Lonquist. Otro objetivo añadido fue el análisis de diferentes alternativas de explotación futura del acuífero.

Este modelo realizado en 1976 fue ampliado en dos fases en 1978 y 1980. El periodo de ajuste de estas ampliaciones abarcaba desde marzo de 1972 hasta junio de 1977, incluyendo los dos primeros años de la explotación sistemática de los pozos de S’Estremera para el abastecimiento de agua a Palma. La superficie del modelo abarcaba 190 km<sup>2</sup>.

Existe otro modelo del Llano de Palma realizado por YACU S.L. en 1995 a petición de la Junta d’Aigües. Este modelo se realizó con MODFLOW, y en realidad es una adaptación de los modelos anteriores realizados con Prickett a la formulación del MODFLOW. El acuífero se simulaba como una

sola capa, asumiendo que no hay conexión con el acuífero confinado profundo. El acuífero es libre, aunque en ciertas zonas las calcarenitas están semiconfinadas por lentejones limosos. Tiene conexión perfecta con el mar, se supone nivel constante no dependiente de los ciclos de mareas. Las celdas son de 800 m de lado y la orientación de la malla corresponde con el modelo anterior. El estado estacionario se hacía corresponder a marzo de 1972. Se simulaba de 1972 a 1975 mensualmente. Se obtenían niveles correspondientes a la intrusión salina de esa época.

## **MODELIZACIÓN**

Las distintas fases necesarias para realizar un modelo numérico de aguas subterráneas se presentan de forma resumida en la Fig. 6 (IHOBE, 2006). A continuación se procederá a describir cómo se ha construido el modelo del Pla de Sant Jordi.

### **DISEÑO DEL MODELO: DOMINIO, CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES**

Se ha construido una malla con orientación en el sentido del flujo (figura 7). Las celdas que forman la malla tienen un tamaño de 100 m x 100 m. Hay un total 6655 celdas activas (unos 66 km<sup>2</sup>). Las celdas del modelo tienen una estructura sencilla: la conductividad y el coeficiente de almacenamiento son constantes en el tiempo para una misma celda.

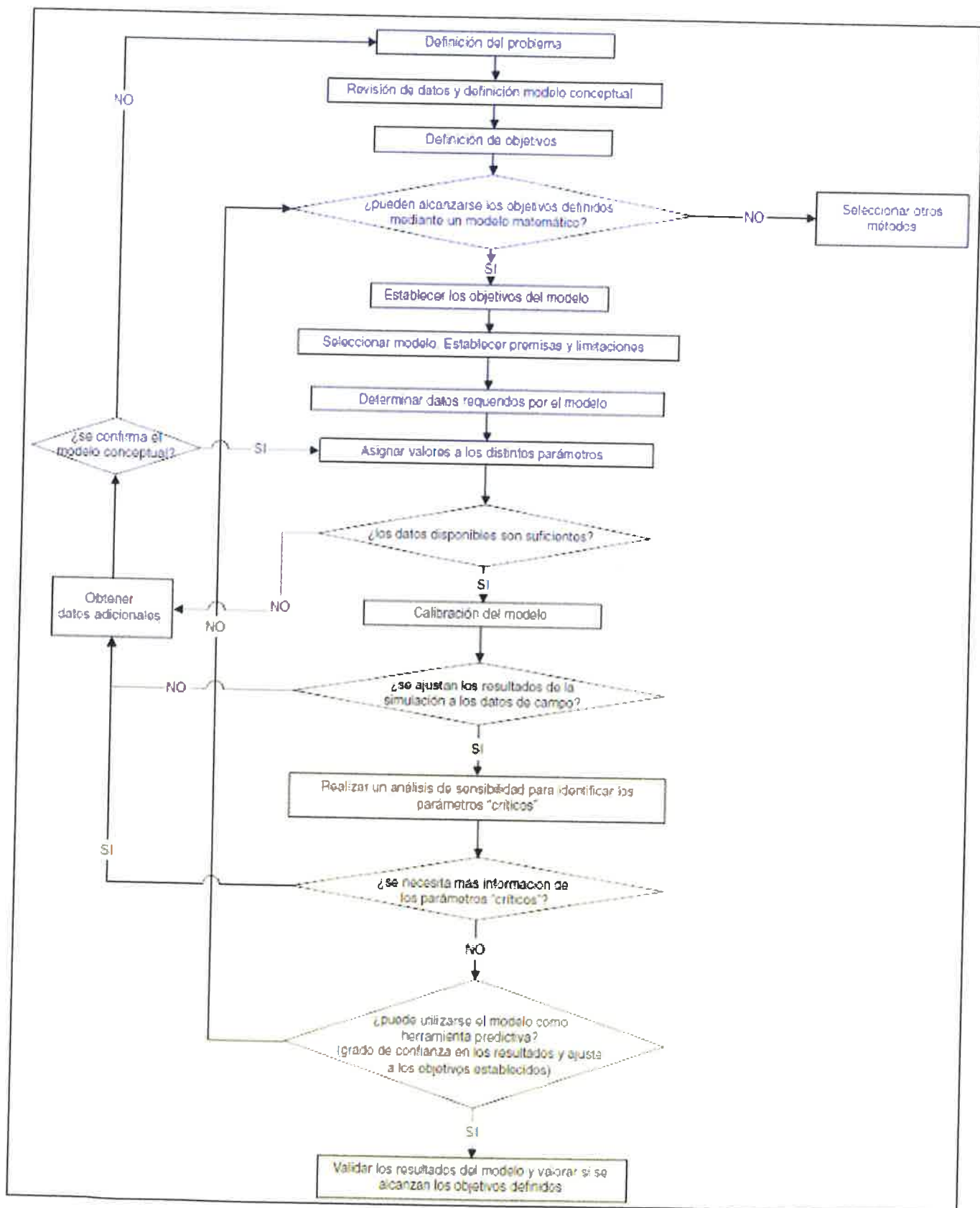


Figura 6. Resumen del proceso de modelación numérica.



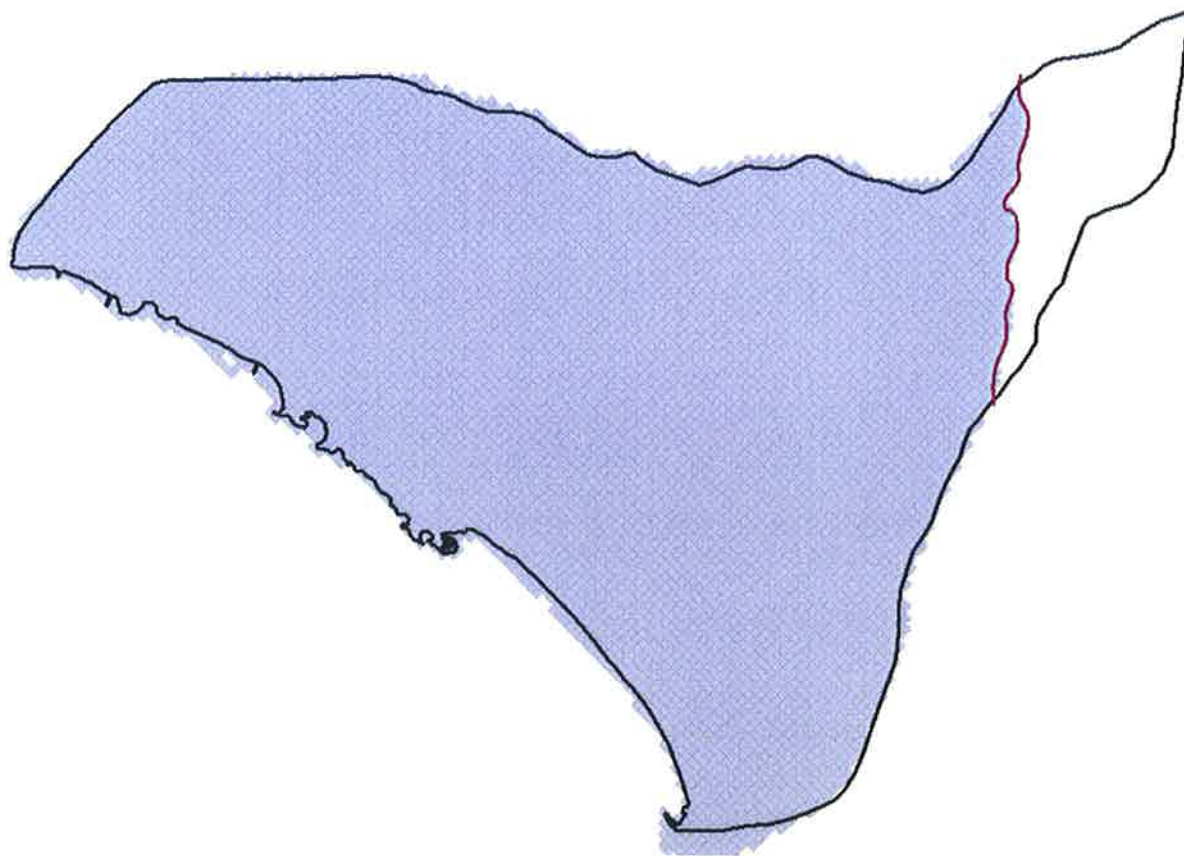


Figura 7. Malla utilizada en el modelo matemático en la zona seleccionada de la MAS de Sant Jordi. La línea separa la parte no incluida en el modelo. Los datos se han obtenido del derogado PHIB 2013.

El periodo calibrado, desde abril de 2006 hasta diciembre de 2012, se ha modelado mensualmente.

Los límites del área de interés se representan en los modelos matemáticos según lo que se denominan condiciones de contorno y tienen gran influencia en los resultados finales del modelo. Al igual que en modelos anteriores la estructura geológica se discretiza en una sola capa, con un comportamiento libre que represente el acuífero Plio-Cuaternario. Los límites se definen en función de la hidrogeología y las acciones naturales y antrópicas sobre el acuífero. En el caso del modelo objeto de este trabajo se han definido las siguientes condiciones de contorno según los paquetes definidos en MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1998):

- Al norte, el contacto con la masa Pont D’Inca se ha estimado como una entrada de agua al sistema. Numéricamente se ha aproximado como una zona de flujo constante de  $2\text{hm}^3/\text{a}$  (FHB en MODFLOW), siguiendo los valores aportados por el Plan Hidrológico 2013. Este valor, constante durante toda la simulación, tiene su error asociado, pero a falta de mejores estimaciones se ha dado por bueno. Adicionalmente en esta zona se ha considerado una entrada puntual de agua en el Ullal de Son Mir. Esta entrada es necesaria para poder reproducir los niveles medidos y se asocia a una entrada de agua desde el norte a través de una zona fracturada. Numéricamente se ha simulado como un pozo de entrada de agua, cuyos caudales han sido calibrados.
- Al suroeste, el mar Mediterráneo es un límite de nivel piezométrico constante (CHD en MODFLOW). Este límite no se sitúa exactamente en la línea de costa, sino ligeramente dentro

del mar, por lo que se le da un valor de altura piezométrica d 0,45 m. No se tiene en cuenta el efecto de las mareas.

- Al sureste, el contacto con la masa de Xorrigo se ha modelado como una zona con una recarga extra con una entrada de agua de  $2\text{hm}^3/\text{a}$ , conforme a los valores aportados por el derogado Plan Hidrológico 2013. Este valor debería en futuros estudios estimarse en función de la precipitación y la escorrentía de la masa de Xorrigo.
- La recarga natural del acuífero proviene principalmente de las lluvias. Se ha realizado un balance de agua en el suelo para poder estimar los valores de infiltración, que han sido aproximados numéricamente en MODFLOW con el paquete de recarga (RCH).
- Los pozos de extracción localizados se han introducido en el modelo con el paquete de pozos (WEL).
- Alrededor del aeropuerto existe una red de pozos de drenaje que se han aproximado como pozos de recarga con el paquete WEL.
- Retornos de riego se aproximan como zonas de recarga con el paquete RCH.

Más adelante se describirán con detalle la cuantificación de estas entradas y salidas al sistema.

## **Calibración**

La validez de un modelo se basa en la demostración de que éste puede reproducir adecuadamente las observaciones. Por eso el proceso de calibración es el componente más importante y complejo en el proceso de modelación. Consiste en ajustar o modificar un conjunto de parámetros del modelo hidrogeológico (permeabilidad, transmisividad o coeficiente de almacenamiento) para que los resultados del modelo reproduzcan distintas variables de estado medidas en el terreno (piezometría, flujos o concentraciones). El objetivo final de la calibración es obtener un modelo que sea capaz de representar el comportamiento del acuífero ante procesos naturales y antrópicos. El proceso de calibración, además, permite detectar datos sesgados o modelos conceptuales erróneos. Hay que tener en cuenta que las observaciones tienen incertidumbres asociadas y que el modelo conceptual siempre está sujeto a interpretación. Por ello el resultado de la calibración nunca será único.

El proceso de calibración puede ser realizado de dos formas diferentes. Por un lado está la metodología tradicional de prueba y error, en el que el modelador varía los parámetros hasta encontrar un ajuste razonable entre los valores medidos y simulados. Por otro lado la calibración se puede realizar mediante un ajuste automático, en el que un programa varía los parámetros de forma automática minimizando una función objetivo, que mide la diferencia entre los valores observados y los modelados. El ajuste automático con el programa UCODE (UCODE, 2014) ha sido utilizado para la calibración del presente modelo con la ayuda de la interfaz gráfica del USGS ModelMate (Banta, 2011).

Los criterios para decidir si la calibración es buena o no se basan en la comparación de valores medidos y simulados. Se calculan los residuos (la diferencia entre ambos) y una serie de estadísticos de los mismos (Fig. 8). Cuanto más pequeños sean estos estadísticos, mejor será la calibración.

-Valor medio (R)	$\longrightarrow$	$R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i$
-Valor absoluto (RA)	$\longrightarrow$	$RA = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n  r_i $
-Raíz cuadrada del residual (RMS)	$\longrightarrow$	$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}$
-Desviación estándar (SD)	$\longrightarrow$	$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}$
-Valor normalizado (RN)	$\longrightarrow$	$RN = \frac{RMS}{\max(H) - \min(H)}$

Figura 8. Criterios cuantitativos de una calibración.

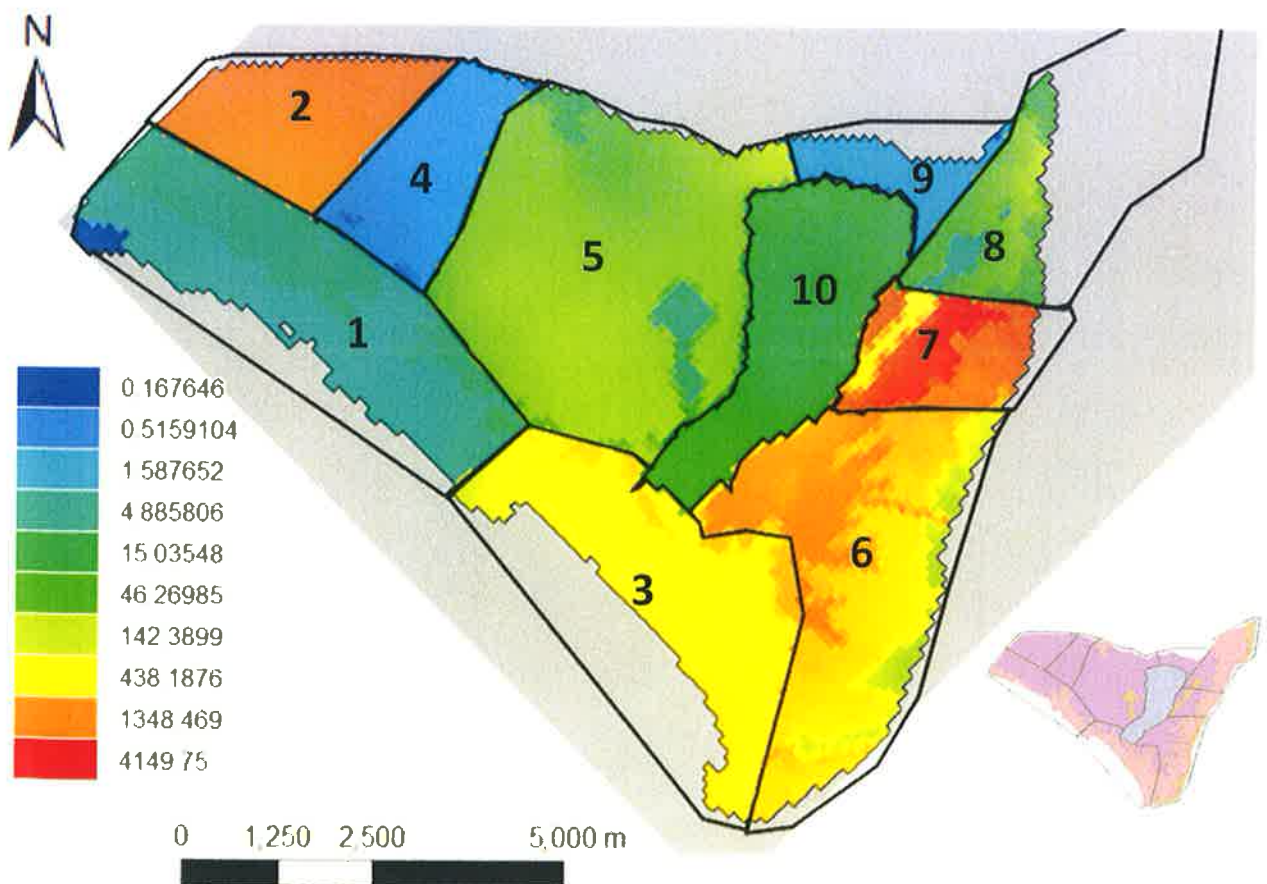


Figura 9. Zonificación de las permeabilidades en el acuífero.

Para los valores iniciales de permeabilidad se estudiaron distintas fuentes de información. Se han tomado como valores iniciales para la calibración los sugeridos por el IGME (2012). Para la calibración se ha definido una zonificación de permeabilidades según criterios hidrogeológicos, como son el comportamiento común de los piezómetros por zonas y las zonas de permeabilidad que delimitan las distintas litologías (figura 3). También se ha tenido en cuenta que cada zona estuviese respaldada por un número suficiente de datos piezométricos. La zonificación realizada se compone de 9 zonas, cuya estructura final puede observarse en la Fig. 9. En apartados posteriores se analizan los resultados de la calibración.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento se ha considerado constante en todo el modelo e igual a 0,2.

En este proceso de calibración del modelo debe existir también una revisión crítica de si las asunciones incorporadas al modelo son válidas, el grado de precisión con el que el modelo se ajusta a las observaciones y, si los parámetros utilizados para el ajuste final son creíbles.

Es necesario señalar que incluso cuando un modelo proporcione una representación aceptable de las condiciones observadas, ello no significa que el modelo sea correcto. También es importante tener presente que puede llegarse a alcanzar una misma situación a partir de múltiples combinaciones de parámetros, por lo que las soluciones no pueden considerarse únicas.

El balance del agua en el modelo, esto es la diferencia entre entradas y salidas del sistema, puede identificar potenciales problemas asociados a la propia matemática del modelo. Estos pueden ser fallos de convergencia de las soluciones o en los parámetros utilizados.

### **Análisis de sensibilidad e incertidumbre**

El análisis de sensibilidad de un modelo matemático permite evaluar la robustez del mismo, en cuanto a la consistencia con que se calibraron sus parámetros. Se entiende por sensibilidad del modelo a la mayor o menor alteración del mismo (niveles y caudales) ante una variación, uno a uno, del valor de los parámetros calibrados. Así, se evalúa la sensibilidad de las variables del modelo respecto a los parámetros. El análisis de sensibilidad marca qué parámetros son críticos para el modelo. Es decir, se identifica cuáles tienen mayor influencia en los resultados del modelo. El análisis de sensibilidad puede concluir que se necesitan más datos experimentales para mejorar la definición de los parámetros más críticos. Además sirve para comprobar si la relación entre el rango de variación de los parámetros de control tiene un reflejo proporcional en los resultados.

Un aspecto a recordar es que el análisis de sensibilidad proporciona información sobre la sensibilidad del modelo matemático, y no necesariamente sobre el sistema real. Para realizar el análisis de sensibilidad se cambian cada uno de los parámetros y se evalúa la respuesta del modelo a esas modificaciones. Los análisis de sensibilidad deben realizarse sobre todos los componentes del modelo. En el presente trabajo se ha utilizado el programa UCODE (2014) para el cálculo automático de la sensibilidad de las permeabilidades calibradas con la ayuda de la interfaz gráfica del USGS ModelMate (Banta, 2011).

Los modelos matemáticos también permiten tener en cuenta la incertidumbre asociada a la asignación de los valores de entrada y su efecto en los resultados. Normalmente los análisis de incertidumbre se realizan, para los modelos determinísticos, utilizando simulaciones con el máximo y el mínimo de los valores de entrada. Hay que ser consciente de que este rango se obtiene a partir de las observaciones disponibles, pero puede ser diferente del rango de valores real en el sistema. Además, es necesario asegurarse de que no se combinan valores contradictorios, que darían lugar a resultados poco realistas.

Los análisis de incertidumbre se llevan a cabo de forma habitual mediante el uso de modelos probabilísticos.

## RESULTADOS: CUANTIFICACIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS

### Recarga por precipitación 2006-2012

En primer lugar se hizo un estudio de la variabilidad espacial de la lluvia. En el entorno del acuífero que aquí se estudia existen 8 estaciones meteorológicas de la AEMET (figura 10). De las 8 estaciones hay dos que se descartan por no estar lo suficientemente cerca (B224 y B236). De las restantes las estaciones B278 y B282 tienen una serie histórica muy larga (1951-2013 y 1914-2013, respectivamente).

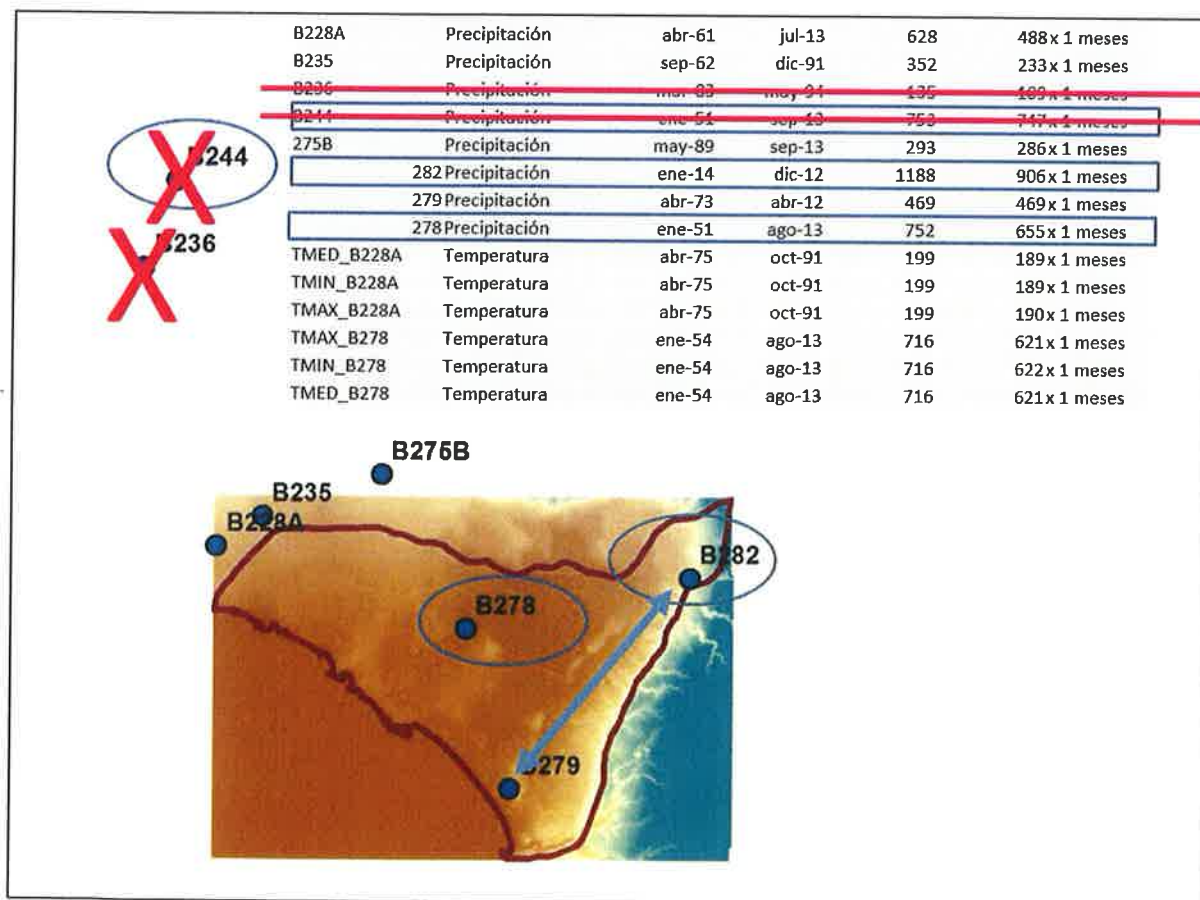


Figura 10. Situación de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Para evaluar si es necesario tener en cuenta las diferencias de precipitación dentro del acuífero se ha realizado un análisis de regresión lineal entre la estación B278, situada en el centro del acuífero, y las otras cinco. Los diagramas de dispersión resultantes de cada una de estas comparaciones se han resumido en la figura 11. Las ecuaciones de las rectas obtenidas con un ajuste lineal, obligando que pasen por el origen, se pueden ver encima de cada uno de los diagramas de dispersión. Todas las rectas corroboran que existe muy buena correlación de la precipitación mensual con la obtenida en la estación B278. La estación B279 es la que se desvía más, pero aun así la pendiente de la recta es de 0.85. Por ello se consideró que no era necesario tener en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia, decidiéndose

no realizar ningún tipo de interpolación y usar los datos pluviométricos y termométricos de la estación B278 para el cálculo del balance hídrico en el suelo.

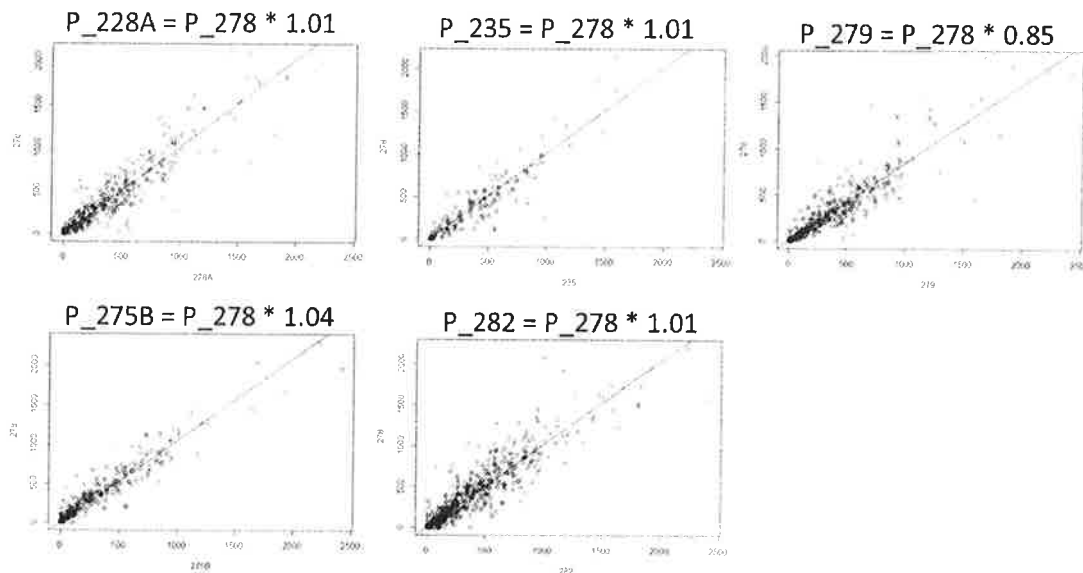


Figura 11. Diagramas de dispersión comparando los datos pluviométricos mensuales de la estación B278 con las estaciones B228A, B235, B279, B275B y B282. Encima de cada diagrama de dispersión se da la ecuación del ajuste lineal de la recta que pasa por el origen.

Se ha procedido al completado y tratamiento de los datos meteorológicos con el programa Trasero 2.0 (Padilla y Delgado, 2014). Tal y como se mencionó en el apartado de descripción del acuífero para el cálculo de la recarga se ha aplicado un factor de infiltración del 15%, que es el indicado en el derogado PHIB (2013). Los resultados en el periodo histórico 1985-2006 estudiado en el PHIB (2009) son que para una lluvia media anual de 402, 5 mm se infiltran 4,432 hm<sup>3</sup>/a. La serie obtenida para el periodo modelado 2006-2012 ofrece una lluvia anual media es de 514,82 mm y por tanto una infiltración de 5,67 hm<sup>3</sup>/a.

### Retornos de riego

Los retornos de riego representan la diferencia entre la demanda satisfecha y la demanda consuntiva. Para la distribución espacial y temporal de los retornos de riego ha sido necesario el tratamiento de los datos de dotaciones de riego. Se han consultado las dotaciones de riego para cada tipo de cultivo en las tablas publicadas en el PHIB (2013). Estas tablas vienen dadas por zonas, siendo la que nos ocupa la denominada Palma. Las comunidades de regantes proporcionan datos muy variables de consumo, dependiendo de los años, oscilando un mínimo cercano a los 12 hm<sup>3</sup>/a y un máximo de 20 hm<sup>3</sup>/a. La dotación total utilizada ha sido de 17 hm<sup>3</sup>/a (16 más campos de golf más algún que otro uso). El cálculo de los retornos de riego se ha estimado en un factor equivalente al 11% de la dotación de riego aplicada en la superficie cultivable de la masa de Sant Jordi. La cantidad regada es de 17 hm<sup>3</sup>/a de acuerdo con el volumen existente de concesiones para riego con aguas residuales, lo que fija el valor de retorno en unos 1,9 hm<sup>3</sup>/a. Para la distribución espacial se ha empleado el mapa de cultivos de la zona (figura 12). La variación temporal se realiza con un peso 70/30, 10 en un año, 7 entre junio, julio, agosto y septiembre y 3 en el resto.

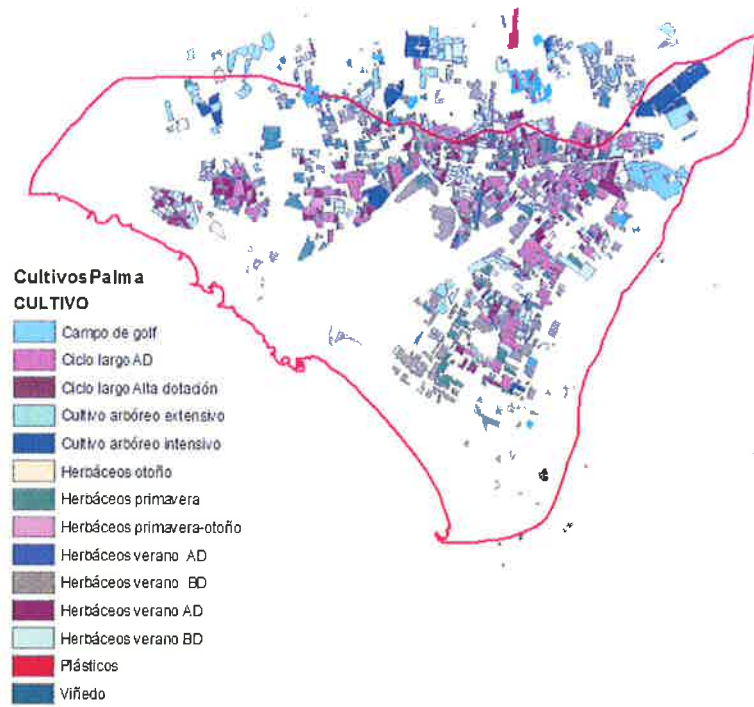


Figura 12. Mapa de cultivos en la zona de estudio.

### Otras masas de agua

Se ha evaluado la entrada desde el norte, en el contacto del acuífero con la masa de Pont d’Inca en  $2\text{hm}^3/\text{a}$ . Así mismo en la zona del Ullal de Son Mir, para poder calibrar los niveles, ha sido necesario introducir una entrada puntual de unos  $4\text{hm}^3/\text{a}$ . Por el este, desde la masa de Xorrigo, también se ha estimado en  $2\text{hm}^3/\text{a}$ . Estos valores han sido tomados inicialmente del PHIB (2013) y modificados posteriormente para poder calibrar los niveles piezométricos. La ubicación de las condiciones de contorno que representan estas entradas se puede observar en la figura 13.

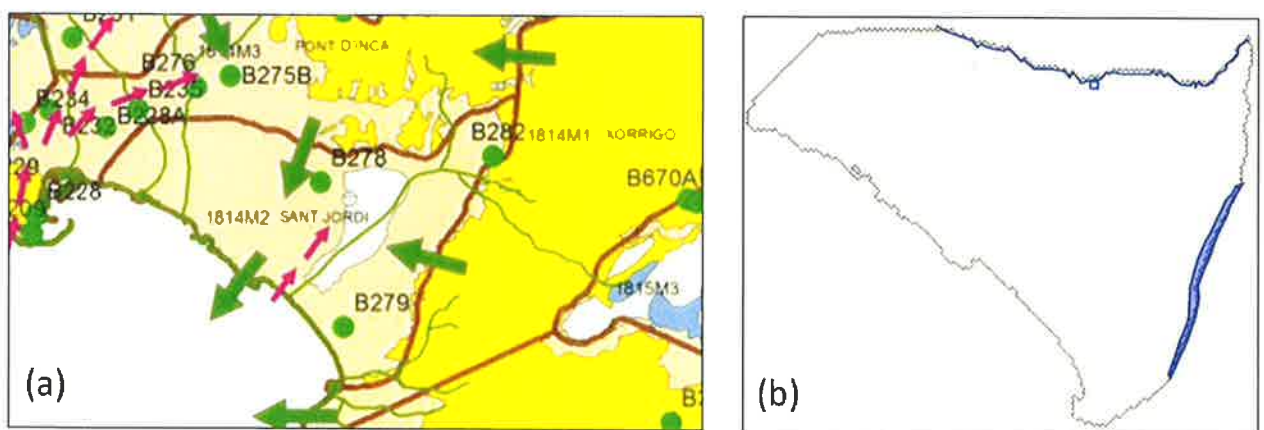


Figura 13. (a) Dirección de flujo de entradas y salidas de la masa de Sant Jordi. (b) Localización de las condiciones de contorno que aproximan numéricamente las entradas desde otras masas de agua.

## Pozos de drenaje del aeropuerto

Existe un sistema de drenes en la zona del aeropuerto. Fue construido en 1965 y ampliado por última vez en 1997. El sistema consiste en algo menos de 900 pozos de infiltración con diámetros de entre 0,8 y 1 m y profundidades de entre 1 y 2,5 m. Existen una serie de zanjas que unen los pozos, algunas de ellas revestidas, con un diámetro de entre 0,2 y 0,3 m de diámetro (información facilitada por AENA).

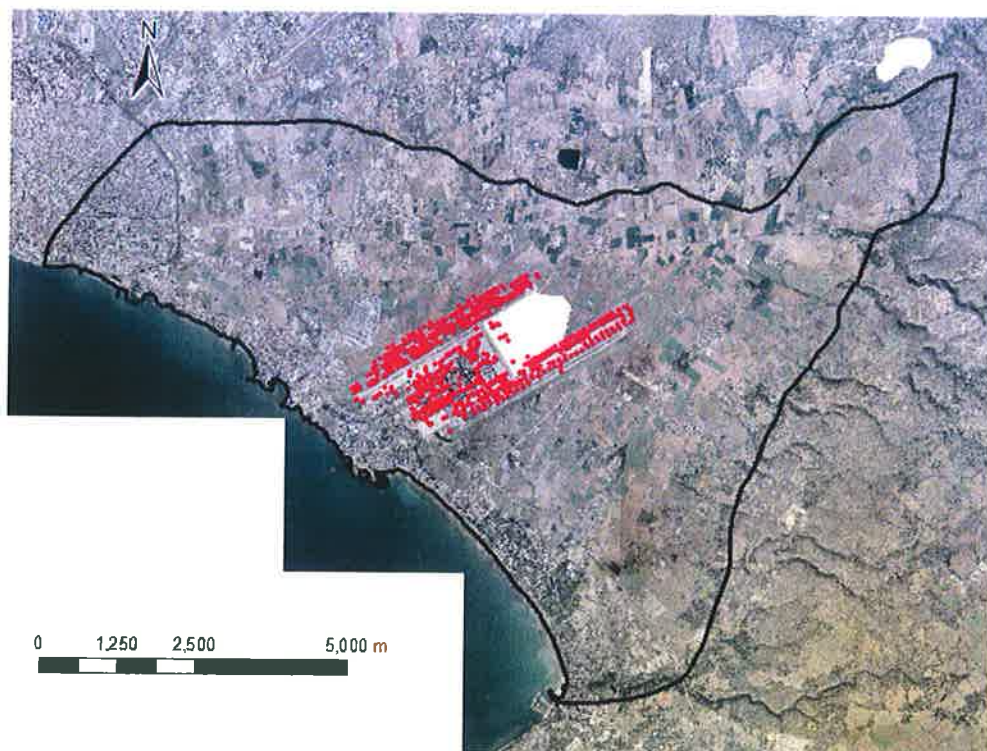


Figura 14. Localización de los pozos drenantes en la zona del aeropuerto.

La entrada por estos pozos se ha calculado teniendo en cuenta el agua que llueve sobre la zona impermeable del aeropuerto. Así, sólo entra agua al acuífero cuando llueve y según la cantidad de precipitación. Con estas hipótesis de media entran en el acuífero una media de  $0,68 \text{ hm}^3/\text{a}$ . La condición de contorno utilizada ha sido la de pozo de entrada o inyección (figura 14).

## Extracciones

Se han considerado las extracciones para los siguientes usos:

- Abastecimiento y venta en camiones ( $1,39 \text{ hm}^3/\text{a}$ )
- Usos domésticos de población diseminada (no conectada a las redes de abastecimiento) ( $0,63 \text{ hm}^3/\text{a}$ )
- Ganadería ( $0,53 \text{ hm}^3/\text{a}$ )
- Industria ( $0,16 \text{ hm}^3/\text{a}$ )



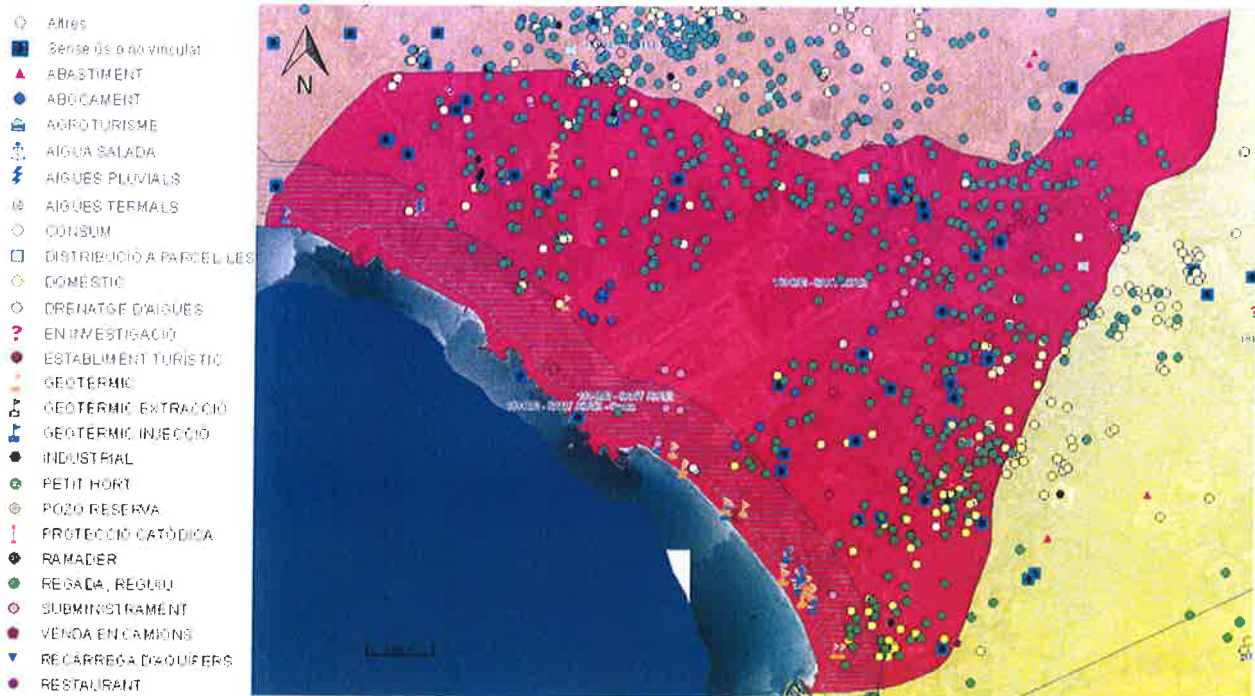


Figura 15. Ubicación de las extracciones dentro del acuífero del Pla de Sant Jordi. Extraído del SIG del cens d'aigües subterrànies de la Direcció General de Recuses Hídriques (<https://apps.caib.es/seraisubfront/>).

En el PHIB (2013) cuando se habla de abastecimiento humano se engloba todo el bombeo de los acuíferos incluyendo el de los abastecimientos urbanos (en red y venta en camiones) y la agrojardinería. Los valores de todos estos términos se han tomado del PHIB (2013). En general son algo inferiores a los del PHIB (2013) porque la zona modelada es menor a la correspondiente MAS. La ubicación de las extracciones se ha tomado de los datos de Conselleria y se puede ver en la Fig. 15 y la figura AII.1 del Anexo II. Las extracciones para regadío se distribuyen temporalmente con un peso 70/30, 10 en un año, 7 entre junio, julio, agosto y septiembre y 3 en el resto.

### Extracciones emaya

Las bombas ITV son de impulsión para superar la diferencia de cota, ITV1 e ITV2 (G1 según reza en los informe de 2012 y 2013). Las bombas de ABACUA efectivamente, mandan el agua de las pluviales al polígono de Son OMS. Es decir, ITV no cuenta como drenaje y ABACUA tampoco drena aguas subterráneas. Las bombas que efectivamente bombean el acuífero son 10 (figura. 16).

El periodo en que están en funcionamiento estas bombas se da en la tabla 2. En el modelo se han introducido 10 bombas de EMAYA con los correspondientes periodos de funcionamiento dados en la Tabla 2. La correspondencia entre los nombres de las bombas y los sondeos que considera el modelo (EMAYA del 1 al 10) se resume en la tabla 3.

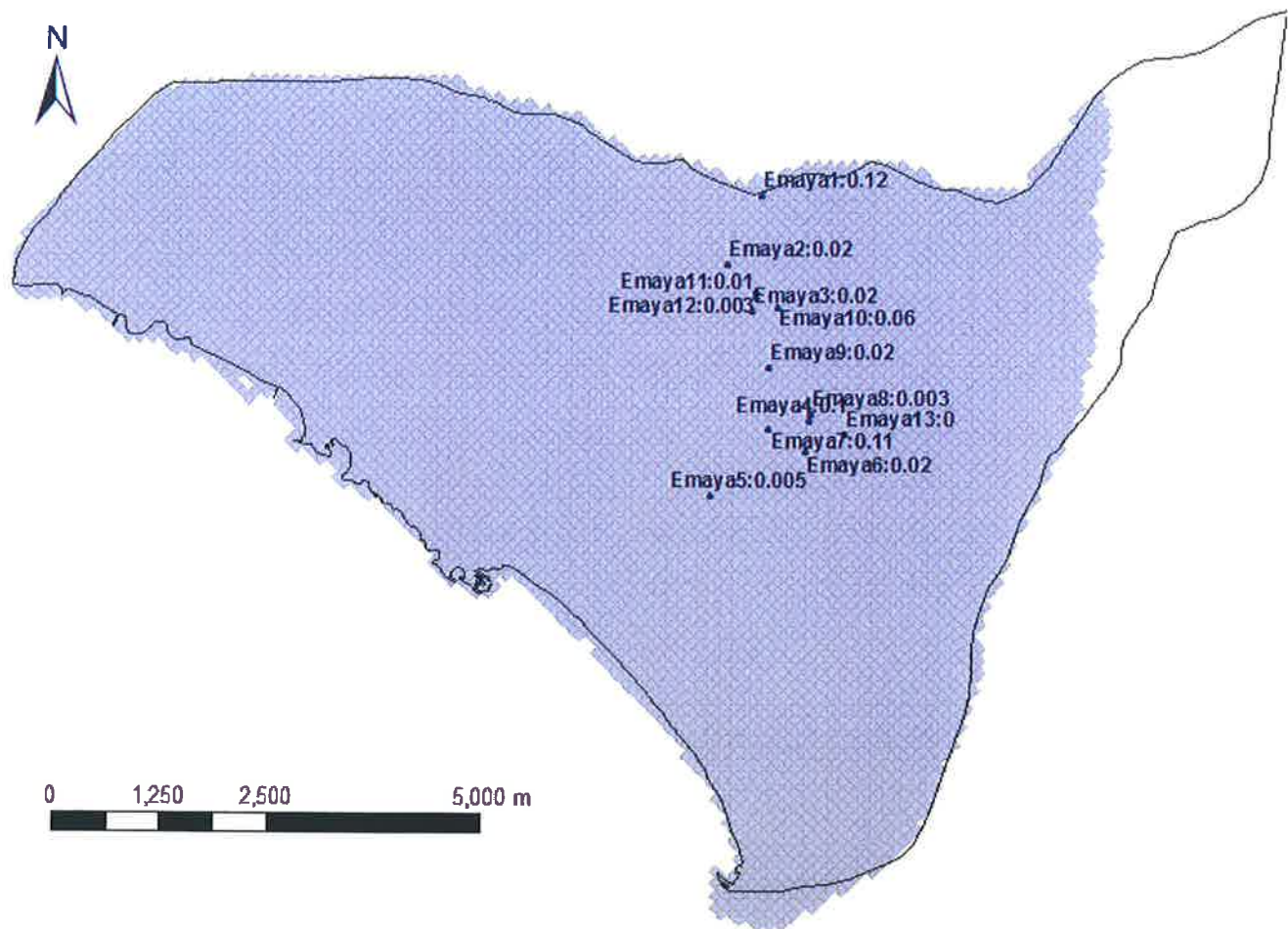


Figura 16. Bombas instaladas y mantenidas por EMAYA para el drenaje del acuífero. Junto a la denominación de la bomba aparece la cantidad anual extraída en el periodo simulado en  $hm^3/a$ .

Planos en pdf	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Camí des Prat (Bomba drenaje A1)	A1	A1	A1	A1		
Camí des Siquiá - Bomba drenaje B1	B1	B1	B1	B1		
Bomba drenaje B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
Camí Caixo - Bomba drenaje C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Bomba drenaje C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2
Camí Can Cuc - Bomba drenaje D1	C.Cuc	C.Cuc	C.Cuc	C.Cuc	C.Cuc	C.Cuc
Bomba molino nº2 - Molino C Cuc				Molino C. Cuc	Molino C. Cuc	Molino C. Cuc
Can Puig - Bomba drenaje I1	C. Puig	C. Puig	C. Puig	C. Puig	C. Puig	C. Puig
Can Prunes - Bomba drenaje H1	C. Prunes	C. Prunes	C. Prunes	C. Prunes	C. Prunes	C. Prunes
Radar - Bomba drenaje E1	Radar - Camello	Radar - Camello	Radar - Camello		Radar - Camello	Radar - Camello
Bomba molino nº8 - Molino B1				Molino B1	Molino B1	Molino B1
Bomba molino EDAR I					Molino EDAR 1	Molino EDAR 1
Ullal Son Mir (2 uds.)			Ullal S. Mir	Ullal S. Mir	Ullal S. Mir	Ullal S. Mir

Tabla 2. Periodo de extracción de las bombas de EMAYA.

Nombre modelo	Denominación EMAYA	Q anual (2006-2012)(hm <sup>3</sup> /a)	Q 2012 (hm <sup>3</sup> /a)
Emaya1	Ullal Son Mir (2 uds.)	0,12	0,67
Emaya2	Cami des Prat (Bomba drenaje A1)	0,02	0,02
Emaya3	Bomba drenaje B2	0,02	0,02
Emaya4	Cami Can Cuc - Bomba drenaje D1	0,10	0,15
Emaya5	Radar - Bomba drenaje E1	0,005	0
Emaya6	Can Puig - Bomba drenaje I1	0,02	0,02
Emaya7	Can Prunes - Bomba drenaje H1	0,11	0,16
Emaya8	Bomba molino n°2 - Molino C Cuc	0,002	0,02
Emaya9	Bomba drenaje C2	0,02	0,02
Emaya10	Cami Caixo - Bomba drenaje C1	0,06	0,06
Emaya11	Camí des Siquió - Bomba drenaje B1	0,01	0,02
Emaya12	Bomba molino n°8 = Molino B1	0,003	0,02
Emaya13	Bomba molino EDAR I	0	0

Tabla 3. Correspondencia de nombres de las bombas de EMAYA y la denominación en el modelo.

## RESULTADOS: SIMULACIÓN 2006-2012

### Calibración

Se ha realizado una calibración automática de los valores de permeabilidad por las zonas definidas en la Fig. 9, minimizando las diferencias entre los valores observados y simulados de piezometría. La comparación entre estos valores observados y simulados se ha representado con un diagrama de dispersión (figura 17).

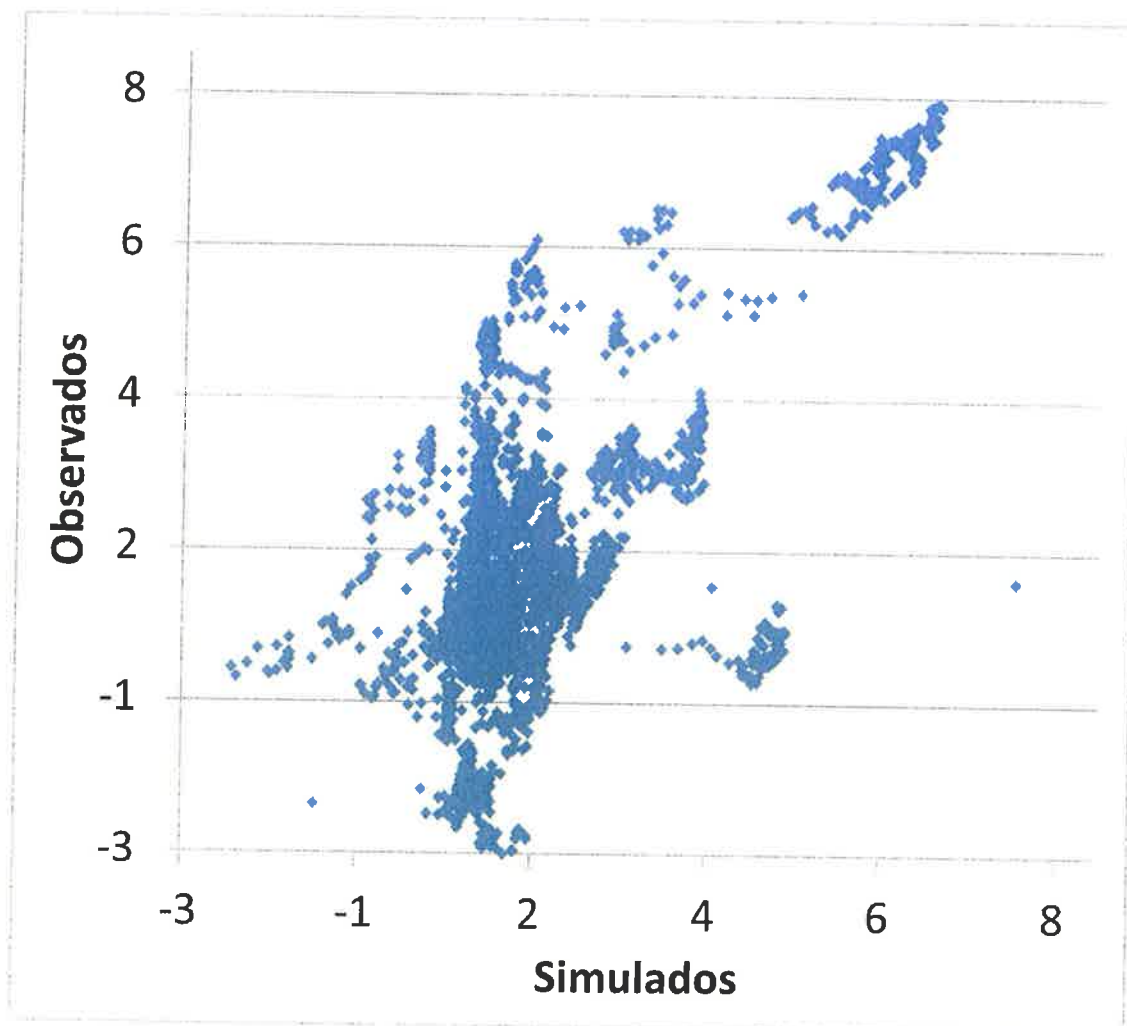


Figura 17. Valores observados versus valores simulados de piezometría.

Para evaluar la bondad de la calibración del modelo se han utilizado los estadísticos que resumen los errores de la calibración (figura 8) y que se han resumido en la tabla 4. Según Anderson y Woessner (1992) se puede considerar que los errores son aceptables y que se ha logrado una buena calibración si  $R$  y  $RN$  son inferiores a 0,5 m y 10% respectivamente. Estos estadísticos de los errores indican que la simulación es capaz de reproducir las medidas de altura piezométrica con unos errores aceptables. Teniendo en cuenta la buena calibración global dada por los parámetros que describen cuantitativamente los errores, y la distribución simétrica de los histogramas de los errores (figura 18) en torno a una media muy cercana a cero se puede concluir que la calibración es suficiente. Esto se puede ver también en las mejores calibraciones obtenidas en todo el acuífero (figura 20). En el Anexo III se han reproducido las calibraciones de todos los piezómetros que han medido durante el periodo simulado.

Valor medio (R)	-0,16 m
Valor absoluto (RA)	1,05 m
Raíz cuadrada del residual (RMS)	1,40 m
Desviación estándar (SD)	1,40 m
Valor normalizado (RN)	14%

Tabla 4. Criterios cuantitativos de la calibración 2006-2012.

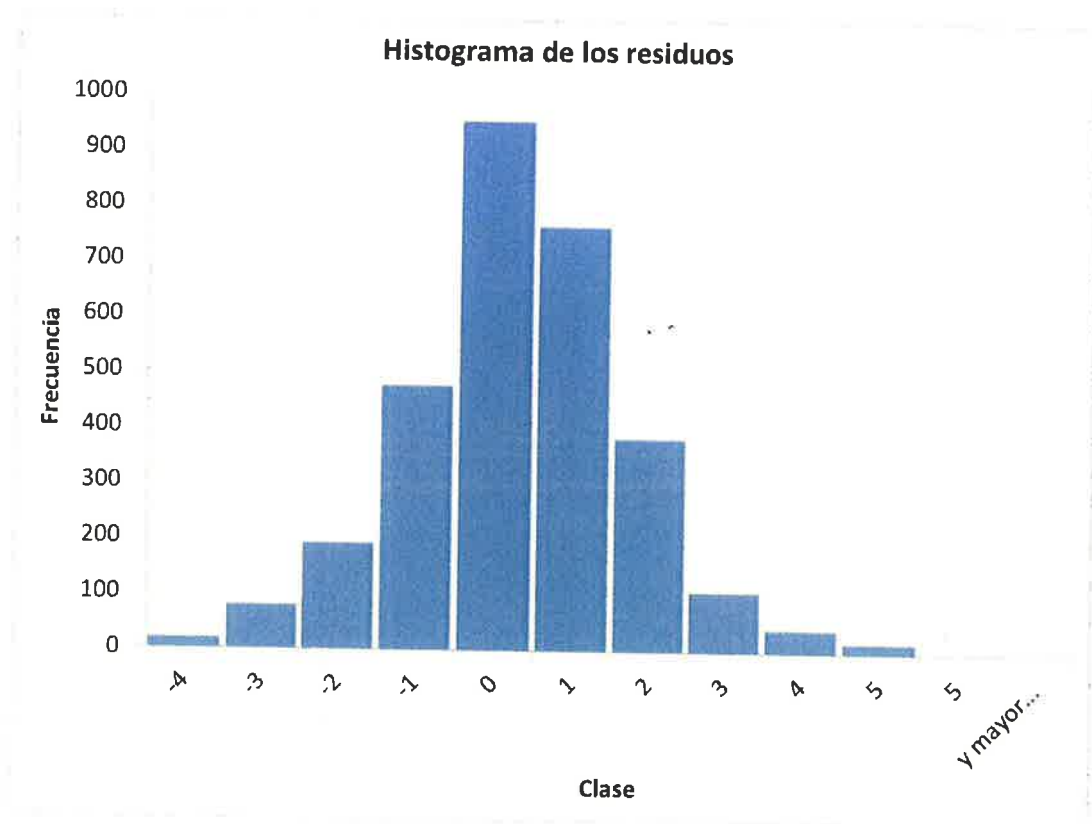


Figura 18. Histograma de los residuos del modelo 2006-2012.

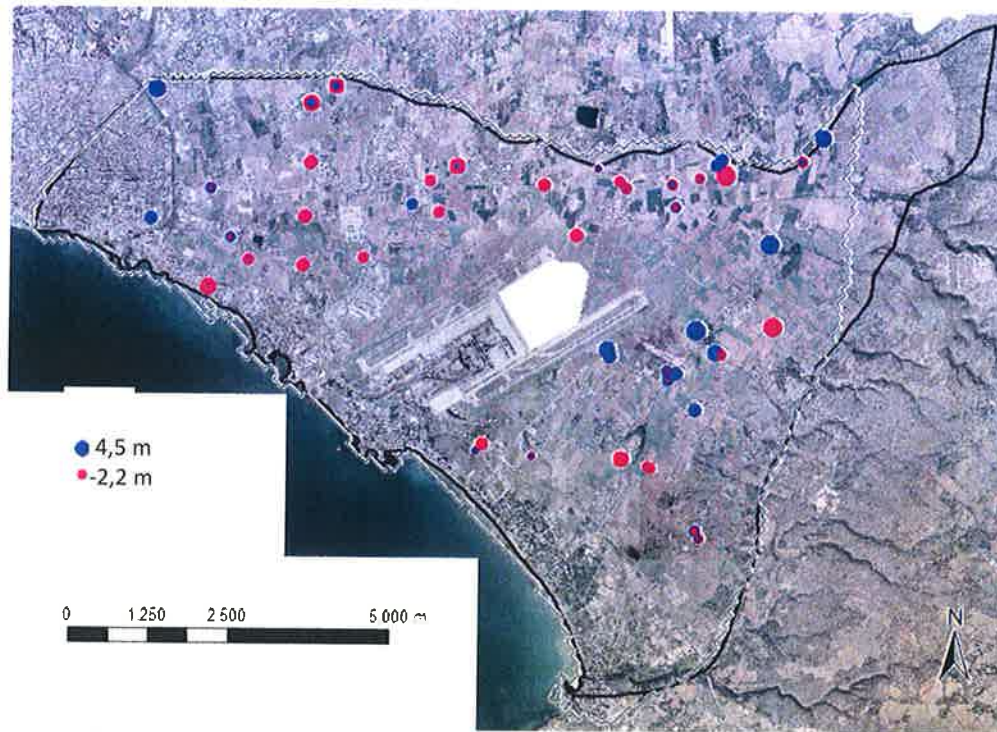


Figura 19. Distribución espacial de los errores de calibración en el modelo 2006-2012.

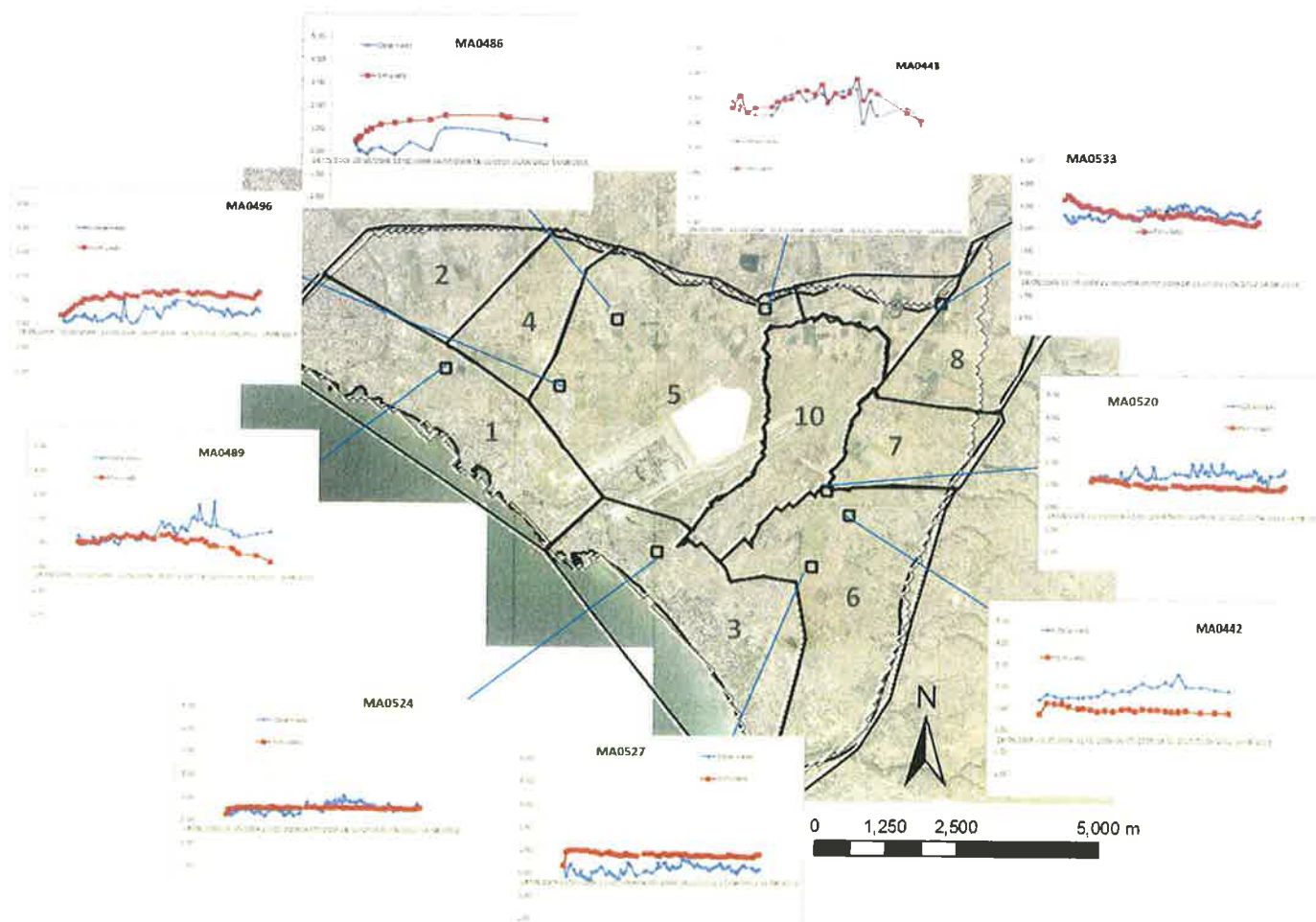


Figura 20. Mejores calibraciones obtenidas en todo el acuífero.

Para analizar la variación espacial de los errores de calibración en el estado transitorio se han representado dichos errores en la figura 19. Vemos que en la zona oeste parece que los errores son mayores mientras que no en el resto del acuífero hay tanto sobreestimación como subestimación de la piezometría.

Otra medida estadística sobre la cantidad de información que dan los datos que permite estudiar las incertidumbres del modelo es el Gráfico de Probabilidad Normal (figura 21). Si los residuos ponderados son independientes y están normalmente distribuidos el modelo se considera que representa de forma adecuada el sistema acuífero real. Para ello el Gráfico de Probabilidad Normal debe alinearse en una recta, cosa que para el presente modelo ocurre.

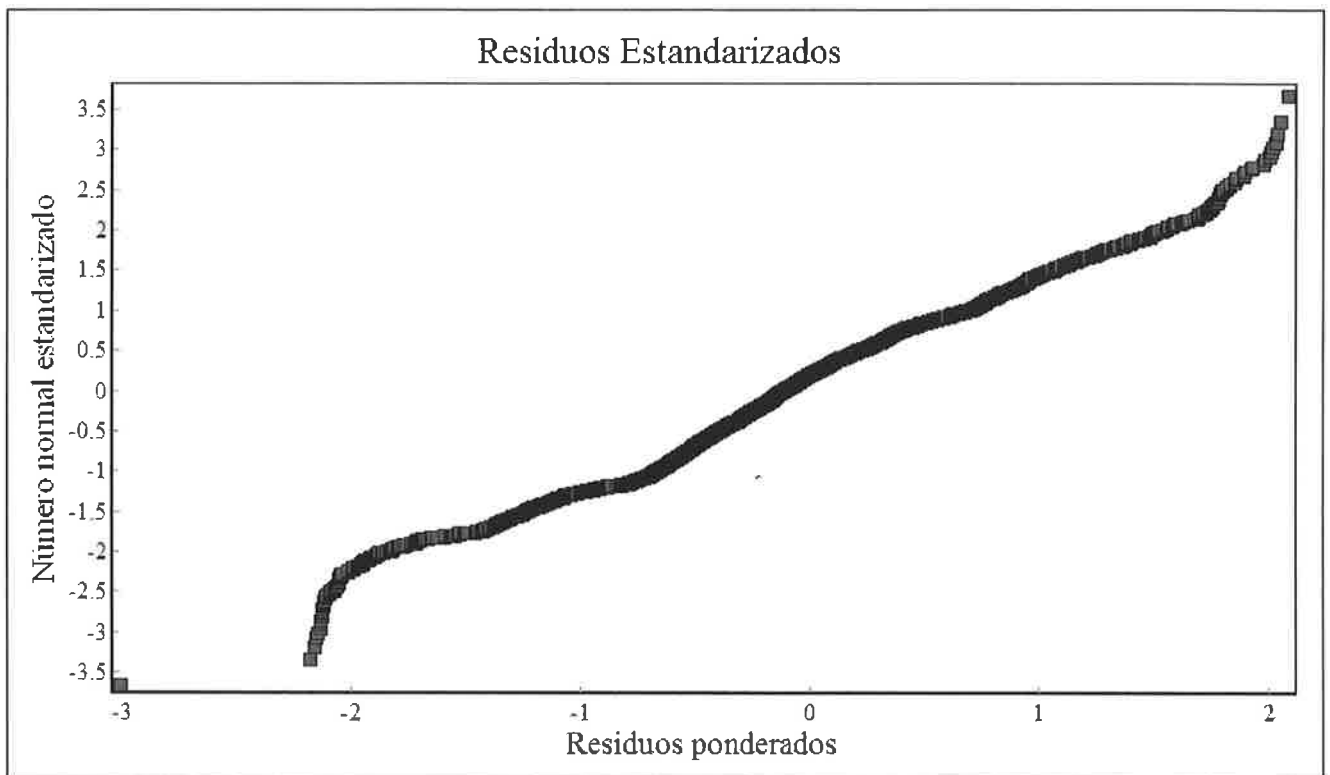


Figura 21. Gráfico de Probabilidad Normal de los Residuos.

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Tras la calibración del modelo se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar el impacto de las variaciones en los parámetros del modelo sobre la respuesta simulada del acuífero. El principal propósito es la identificación de aquellos parámetros que son más importantes en la determinación del comportamiento del acuífero. El análisis de sensibilidad se ha realizado para cada una de las zonas de permeabilidad del modelo (figura 9), el caudal de entrada en el Ullal, la altura piezométrica del límite con el mar y el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

Las sensibilidades escaladas para los parámetros estudiados han sido representadas en la Fig. 22. Estas sensibilidades indican la cantidad de información que proporcionan las observaciones para la

estimación de cada parámetro. Estas sensibilidades son independientes de los valores observados, y por tanto del ajuste del modelo. Los parámetros de permeabilidad de las zonas 9 y 8, situadas al noreste del acuífero, son las más fáciles de estimar con la calibración del modelo y la piezometría disponible. Esto viene indicado por las altas sensibilidades de estos parámetros. Por el contrario, los parámetros con muy bajas sensibilidades, las permeabilidades de las zonas 2 (noreste) y 7 (este) son las más difíciles de estimar.

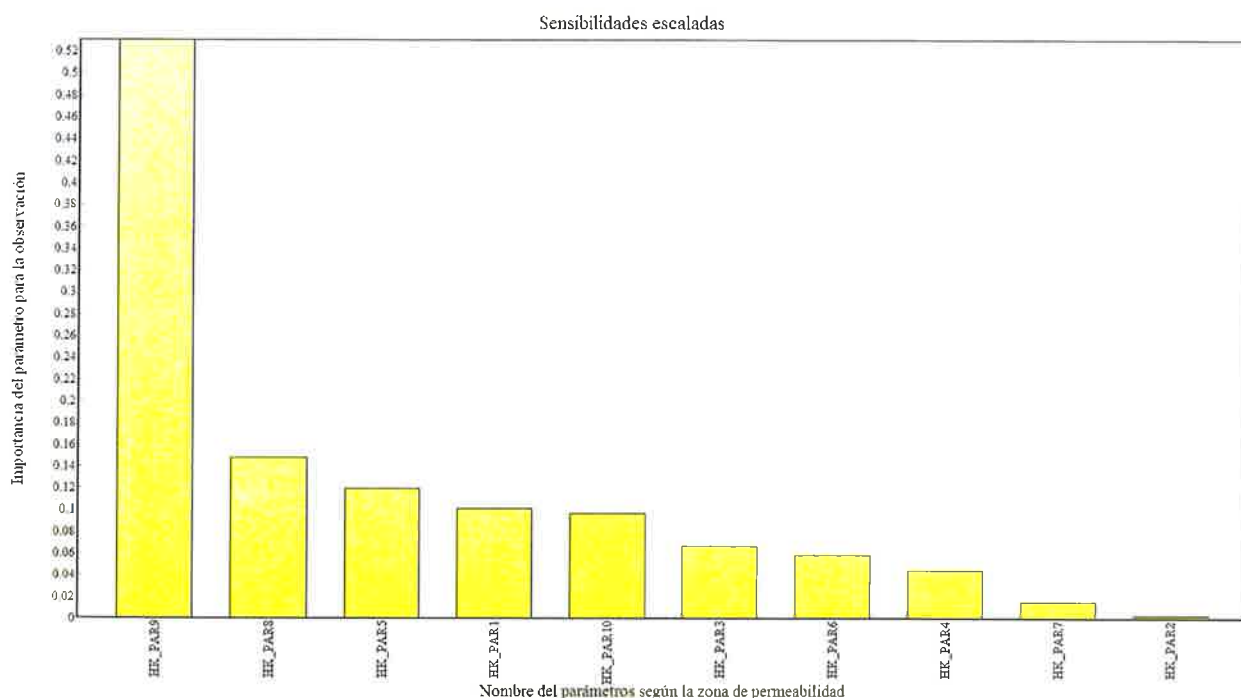


Figura 22. Sensibilidades escaladas de cada una de las zonas de permeabilidad del modelo (Fig. 9), el caudal de entrada en el Ullal, la altura piezométrica del límite con el mar y el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

En la zona 2 se ha estimado una permeabilidad muy alta. La sensibilidad escalada de este parámetro es más pequeña que 0,01 veces la sensibilidad escalada mayor. Este hecho indica que el ajuste de esta permeabilidad, con la información que se dispone, tiene problemas de convergencia. Esta zona, si fuese de especial interés, debería ser revisada en futuros modelos añadiendo información bien sobre los valores de permeabilidad bien aportando nuevas medidas piezométricas.

Para comprobar que el ajuste no tenía problemas de singularidad se han calculado los coeficientes de correlaciones entre los parámetros. Como todos los coeficientes de correlación calculados son menores que 0,95 podemos concluir que los parámetros estimados pueden ser estimados de forma única con las observaciones disponibles. Es posible estudiar qué observaciones son las que tienen más influencia en el ajuste mediante el parámetro de Leverage. En la figura 23 se puede observar que las observaciones que tienen más influencia en el ajuste, pudiéndose concluir que no hay un piezómetro en concreto cuyas medidas influyen notablemente en los resultados del ajuste.



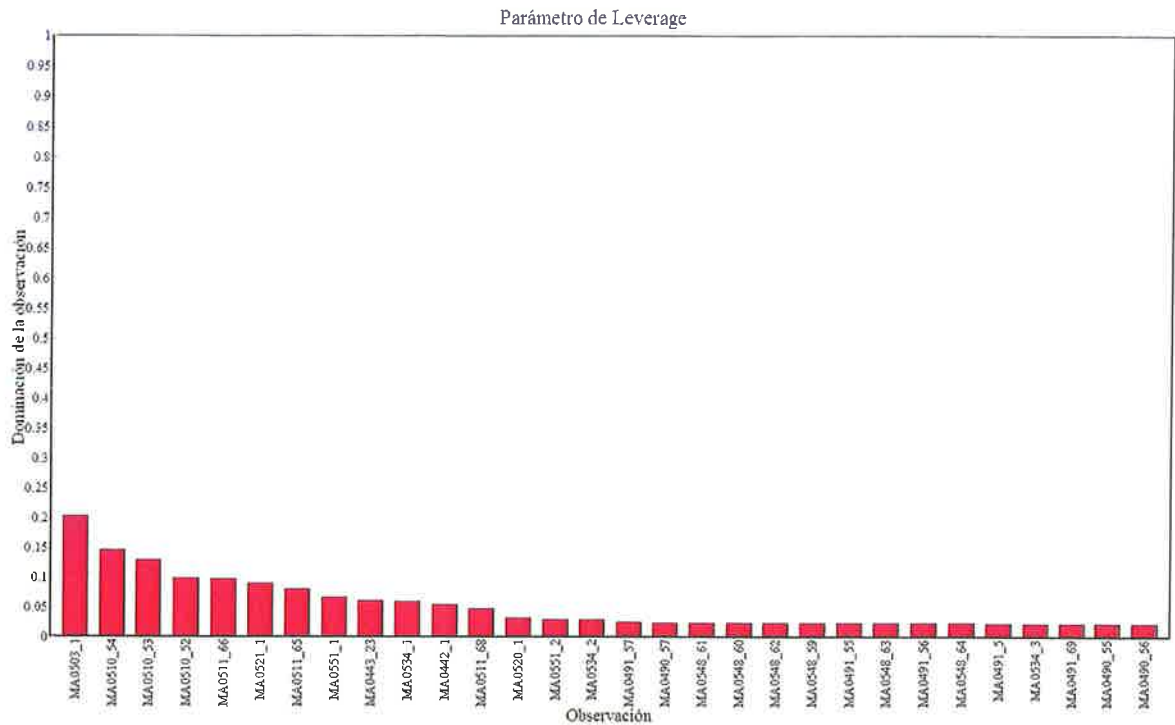


Figura 23. Parámetro de Leverage. Nos informa sobre el potencial que tenga una observación en hacer que el ajuste sea menor o peor. Identifica aquellas observaciones que son sensibles de tal modo que provocan que los valores observados puedan tener un gran efecto en los resultados del ajuste.

## PIEZOMETRÍA

Para mostrar la piezometría simulada a lo largo del periodo estudiado se muestra en la figura 24 la superficie piezométrica correspondiente a abril de 2006 (comienzo de la simulación, día 30) y octubre de 2012 (fase final de la simulación, día 2406). También se han incluido los mapas de octubre de 2008 (día 945) y marzo de 2009 (día 1096) ya que se dispone de mapas piezométricos elaborados con otra técnica matemática (interpolación a partir de las medidas) y que nos servirán para analizar el funcionamiento del modelo., 31 de diciembre de 2008, 31 de mayo de 2010 y 31 de diciembre de 2012.

La piezometría no presenta grandes gradientes piezométricos, corroborando la existencia de un flujo de norte a suroeste, aumentando ligeramente los niveles en épocas de mayores lluvias. Los bombeos de EMAYA parecen no ser lo suficientemente importantes como para afectar la piezometría.

Se disponen de dos mapas piezométricos correspondientes a octubre de 2008 y marzo de 2009, obtenidos a partir de las medidas piezométricas y con métodos de interpolación clásicos (IGME, 2012). Las diferencias entre ambos mapas (figura 25) vienen dadas por el hecho de que en la zona simulada se han descartado los niveles pertenecientes al nivel Mioceno, así como la zona este de la MAS que tiene entidad como acuífero. Si se tienen en cuenta los niveles de Mioceno la forma de las isopiezas se ve afectada en todo el acuífero. Este es el resultado más importante que arroja el modelo, la modificación de la superficie piezométrica para adecuarse a los límites más realistas del acuífero Plio-Cuaternario.

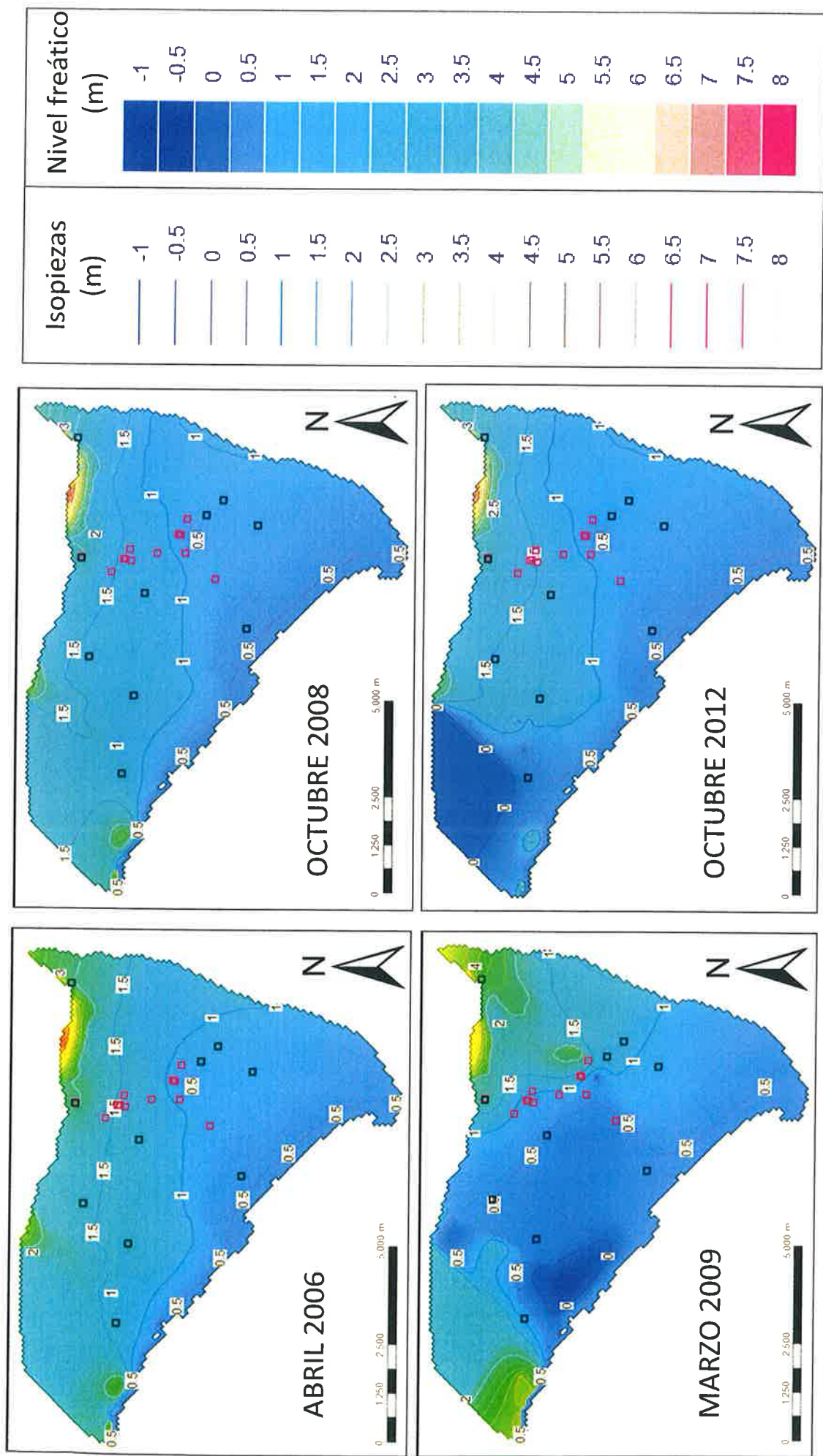


Figura 24. Superficies piezométricas simuladas con el modelo. Los cuadrados negros representan los piezómetros de la Figura 20 y los rosas los bombeos de EMAYA.

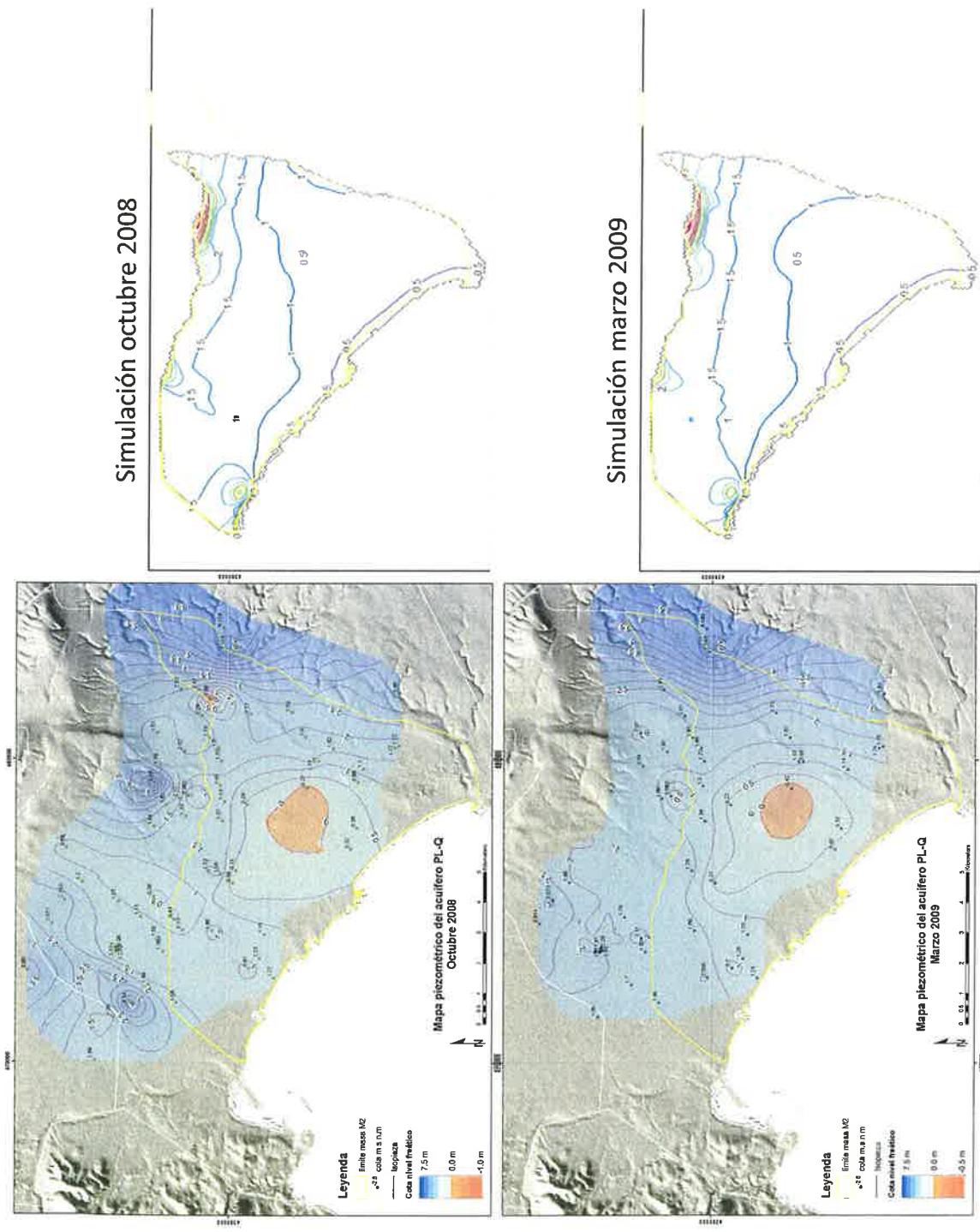


Figura 25. Comparación de la piezometría simulada con el modelo (izquierda) y la obtenida con métodos de interpolación clásicos (derecha, IGME (2012)).

**ENTRADAS (hm<sup>3</sup>/a)**

<b>Año</b>	<b>Variación de Almacenamiento</b>	<b>Mar</b>	<b>Zona Ullal</b>	<b>Drenaje aeropuerto</b>	<b>Lluvia</b>	<b>Otras masas este</b>	<b>Retornos de riego</b>	<b>Otras masas norte</b>
2006/2007	18,62	0,07	3,03	0,88	4,91	2,00	1,91	2,03
2007/2008	11,09	0,00	4,06	0,82	5,67	2,01	1,89	2,03
2008/2009	8,44	0,00	3,47	0,76	7,62	2,00	1,82	2,03
2009/2010	9,01	0,00	4,97	1,15	8,90	2,00	1,78	2,03
2010/2011	8,47	0,00	1,63	0,45	4,19	2,00	1,94	2,03
2011/2012	7,52	0,00	1,72	0,68	2,73	2,01	1,99	2,03
<b>Media anual</b>	10,52	0,01	3,15	0,79	5,67	2,00	1,89	2,03

Tabla 5. Entradas anuales al acuífero.

**SALIDAS (hm<sup>3</sup>/a)**

<b>Año</b>	<b>Variación de Almacenamiento</b>	<b>Mar</b>	<b>Pozos</b>
2006/2007	8,09	22,85	2,52
2007/2008	6,95	18,37	2,26
2008/2009	6,00	17,36	2,78
2009/2010	9,02	16,99	3,82
2010/2011	2,94	14,13	3,62
2011/2012	2,25	12,49	3,95
<b>Media anual</b>	5,87	17,03	3,16

Tabla 6. Salidas anuales al acuífero

## BALANCE DE AGUA

Las entradas y las salidas del balance de agua anual obtenido en el periodo 2006-2012 (años hidráulicos) se han resumido en las tablas 5 y 6, respectivamente. La principal entrada al acuífero viene dada por la precipitación, aunque los retornos de riego y los contactos con las masas de agua adyacentes también constituyen un aporte muy importante. De media de todas las entradas externas al acuífero (15,5 hm<sup>3</sup>) el 0,01% corresponden a entradas del mar, el 20,2% a flujos del norte en la parte del Ullal de Son Mir, el 5,1% serían drenes entrantes de los pozos del aeropuerto, el 36,5% proviene de la lluvia, el 12,9% a entradas laterales desde el este, el 13,1% a entradas laterales desde el norte y el 12,2% a los retornos de riego. Las salidas fuera del acuífero serían de unos 21 hm<sup>3</sup>, el 81,1% sale por el mar y el 15% por pozos de extracción. La descompensación existente en el balance de entradas y salidas se debe a la estimación incierta de los aportes laterales desde otras masas. Los balances mensuales de las entradas y las salidas al acuífero se han representado en las figuras 26 y 27, respectivamente.

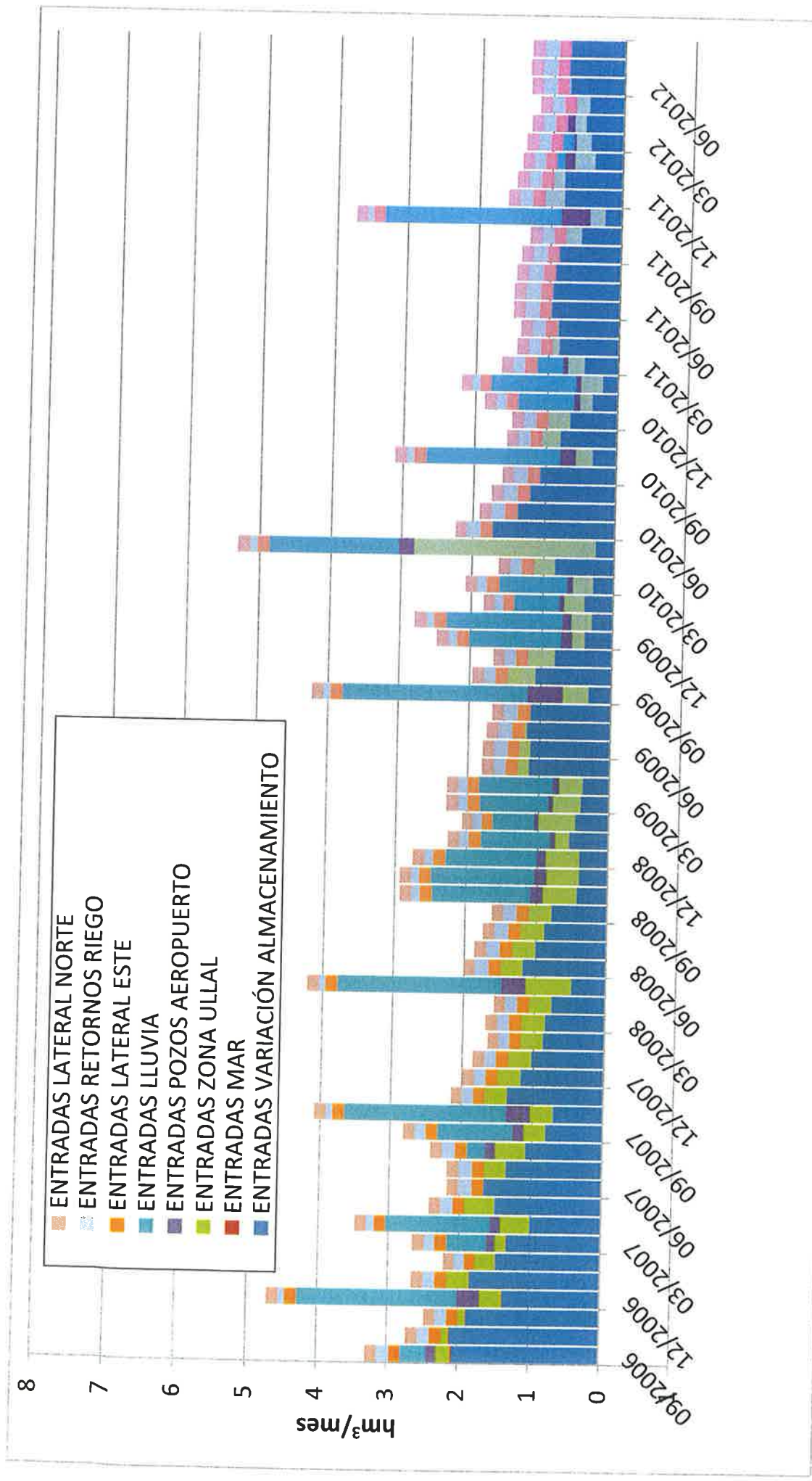


Figura 26. Entradas mensuales al acuífero.

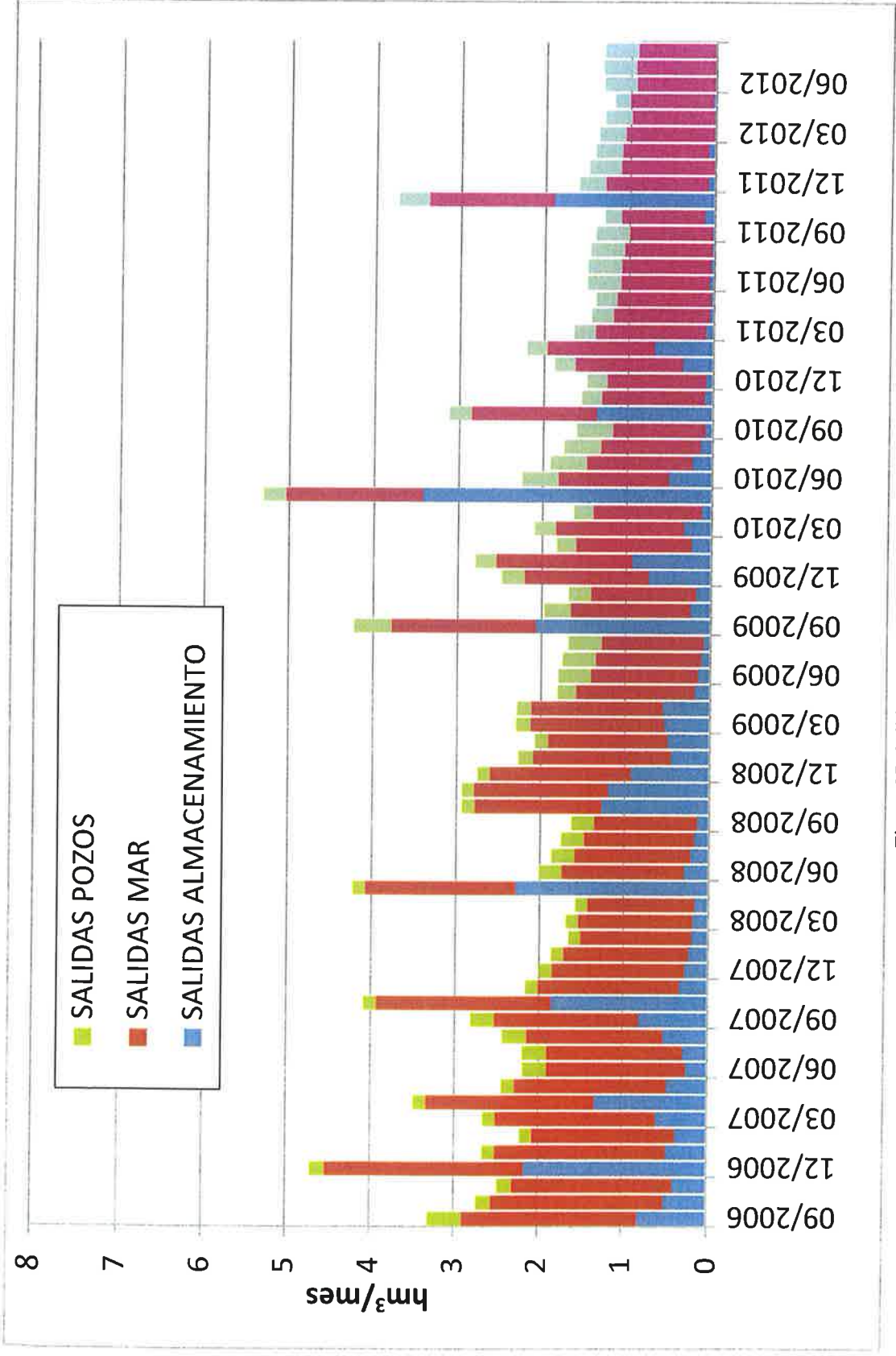


Figura 27. Salidas mensuales del acuífero.

## CONCLUSIONES. RELACIÓN DE LAS INUNDACIONES Y EL NIVEL PIEZOMÉTRICO SEGÚN EL MODELO.

Las zonas inundadas en el Pla de Sant Jordi identificadas en otras actividades del convenio en el que está encuadrado el presente trabajo se han analizado para los eventos transcurridos durante los años 2001, 2008 y 2010. Los piezómetros que deberían haber registrado estas inundaciones son: MA0487, MA0489, MA0500, MA0510, MA0508, MA0510, MA0511, MA0518, MA0520, MA0521, MA0522, MA0523, MA0524, MA0525, MA0548, MA0551 y MA0552.

Superponiendo las áreas inundadas, según el modelo y las identificadas mediante interpretación de fotografía aérea, no coinciden de manera clara. Con los errores que da el modelo (en torno a 1 m de valor medio absoluto) no es posible sacar conclusiones definitivas sobre las zonas inundadas por ascenso del nivel piezométrico por encima de la cota del terreno.

Analizando piezómetro a piezómetro, en aquellos que estaban localizados en las áreas donde ha habido inundaciones, el nivel observado está precisamente en esa franja de error de +/- 50 cm alrededor de la cota del terreno. Además, hay que tener en cuenta que el modelo se ejecuta con una discretización temporal mensual, que puede que no capte las lluvias fuertes diarias causantes de las inundaciones. En este sentido parece difícil disponer de datos diarios de extracciones para que el modelo pudiera funcionar diariamente en el futuro.

Por todo ello, se concluye que, en base al modelo matemático de aguas subterráneas que representa el comportamiento general del acuífero es difícil afirmar que haya una relación directa entre las inundaciones y la piezometría. Aun así, el modelo ha permitido cuantificar balances de agua y clarificar el modelo conceptual en muchos aspectos.



## REFERENCIAS

BANTA, E.R. (2011). ModelMate--A graphical user interface for model analysis: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. E4, 31 p.

BARÓN, A. (1987). Hidrogeología de la isla de Mallorca. Conselleria d'obres públiques i ordenació del territori. Direcció General d'obres públiques. Servei hidraulic.

COURTOIS, N., BRISSAUD F., CRESPI D., LACHASSAGNE P., LE STRAT P., XU P. (2000a)- CatchWater Project –WP3 – Mallorca modelling. Llano de Palma, Majorca: quelques elements pour le modèle hydrogéologique conceptuel (BRGM, ITGE, UMII). Version du 12/07/2000. Inédito.

COURTOIS, N., BRISSAUD F., CRESPI D., LACHASSAGNE P., LE STRAT P., XU P. (2000b). CatchWater Project –WP3 – Mallorca modelling. Cartes des isopaques et des isohypses du Néogène et du Quaternaire du bassin de Palma de Majorque (Baléares) (BRGM, ITGE, UMII). Version du 11/07/2000.

IGME (2012). Caracterización hidrogeológica del acuífero de la playa de Palma (18.14M2 Sant Jordi) para el cumplimiento de los objetivos 1 y 2 del proyecto EDASE (CGL2008-00047/BTE).

IHOBE S.A. (2006). Guía técnica para la aplicación de modelos informáticos para el transporte y el flujo de contaminantes en el agua subterránea. Ley 1/2005 para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Depósito Legal: BI- 2027-06.

MCDONALD, M.G. Y HARBAUGH, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 pp.

PADILLA Y DELGADO (2014) Manual del usuario de la Aplicación Trasero 2.0. Departamento de ciclo hídrico. Diputación Provincial de Alicante.

PHIB (2009). Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Territorio. Dirección General de Recursos Hídricos. Govern de les Illes Balears. Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación de Baleares (versión 2) 2009. Portal de l'aigua de les Illes Balears <http://www.caib.es/sacmicrofront/contenido.do?mkey=M080801112185729323&lang=CA&cont=40949>

PHIB (2013). Plan Hidrológico de les Illes Balears. Memoria. Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Terrotori, Govern de les Illes Balears.

SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS HIDRÁULICAS (1968). Estudio Hidrogeológico del Llano de Palma. Memoria y planos.

UCODE \_2014 POETER, EILEEN P., MARY C. HILL, DAN LU, CLAIRE R. TIEDEMAN, Y STEFFEN MEHL. (2014): Integrated Groundwater Modeling Center Report Number: GWMI 2014-02.

YACU (1995). Realización del modelo matemático del acuífero del Llano de Palma. Informe técnico.

## ANEXOS

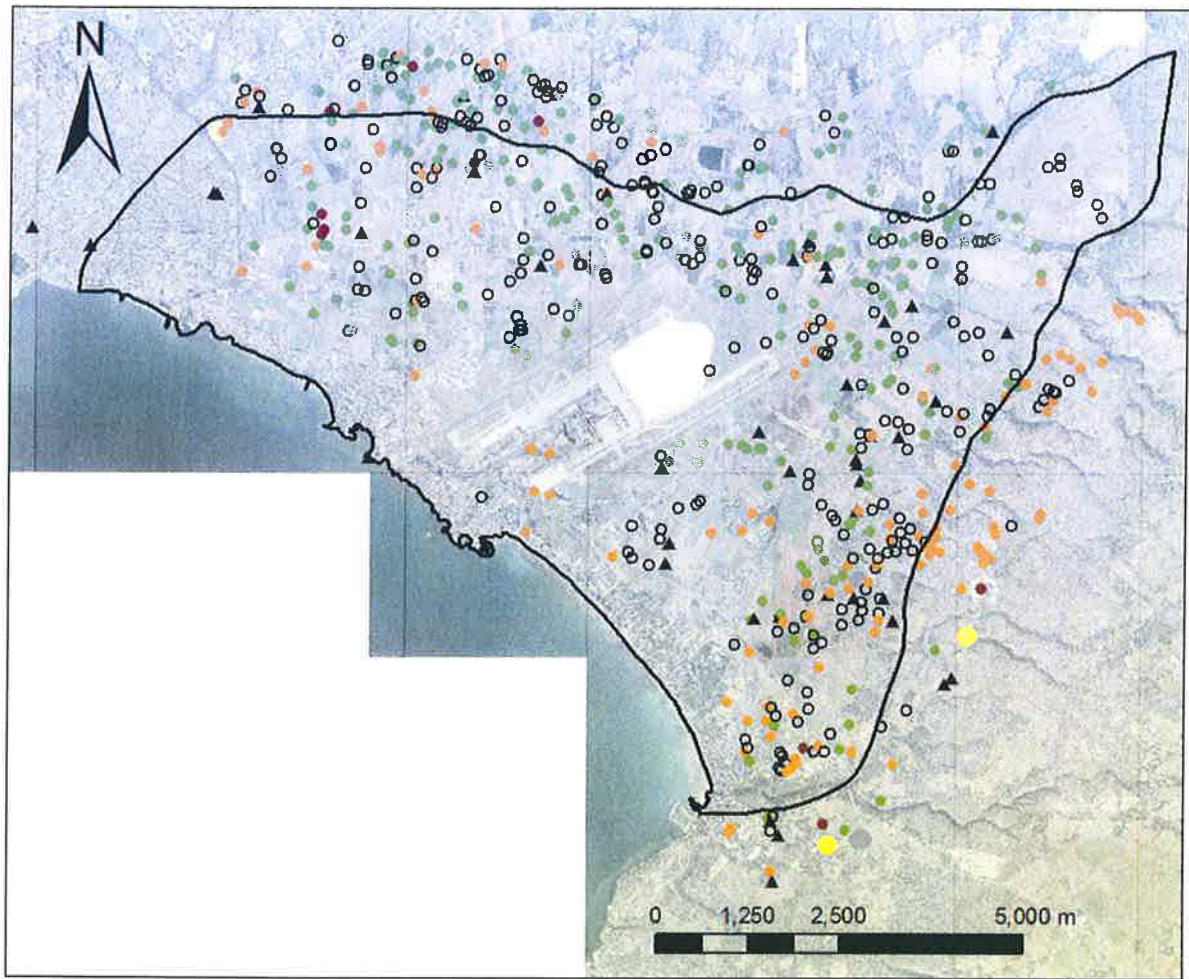
### ANEXO I. PIEZOMETRÍA

ID	x utm	y utm	ID	x utm	y utm
MA0441	476331	4379774	MA0511	479248	4380155
MA0442	480347	4376780	MA0512	479946	4380217
<b>MA0443</b>	478611	4380117	MA0513	480005	4379870
MA0444	481480	4379313	MA0514	480632	4380518
MA0451	474734	4381665	MA0515	480766	4380358
MA0485	474363	4381401	MA0517	482290	4380929
<b>MA0486</b>	476204	4380250	MA0518	479034	4377589
MA0487	474271	4379684	MA0519	478990	4377688
MA0488	472794	4378611	<b>MA0520</b>	479941	4377230
<b>MA0489</b>	473127	4379364	MA0521	479921	4377369
MA0490	471967	4381602	MA0522	480646	4377644
MA0491	471964	4381606	MA0523	477030	4376237
MA0492	472811	4380101	<b>MA0524</b>	476959	4376131
MA0493	472811	4380101	MA0525	477732	4376053
MA0494	474254	4378947	MA0526	479233	4376018
<b>MA0496</b>	475179	4379066	<b>MA0527</b>	479679	4375861
MA0498	476622	4380475	MA0528	479630	4375886
MA0499	471895	4379642	MA0529	480441	4374794
MA0500	473435	4379038	<b>MA0533</b>	481968	4380574
MA0501	473460	4378988	MA0534	480352	4377990
MA0502	480384	4374910	MA0548	474347	4380510
MA0503	481533	4378049	MA0549	475918	4379884
MA0504	480368	4380319	<b>MA0550</b>	480711	4380581

<b>ID</b>	<b>x utm</b>	<b>y utm</b>	<b>ID</b>	<b>x utm</b>	<b>y utm</b>
MA0506	477966	4380192	MA0551	480049	4377330
MA0508	478503	4379422	MA0552	480725	4377623
MA0510	479126	4380246			

Tabla AI.1. Listado de piezómetros utilizados en la modelación. En negrita los que se utilizan para analizar los resultados.

## ANEXO II. UBICACIÓN DE LAS EXTRACCIONES

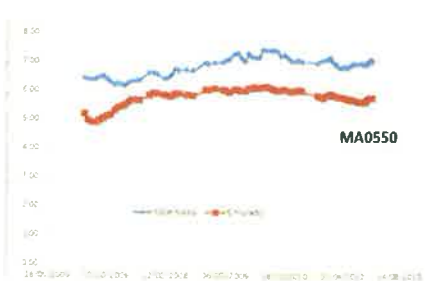
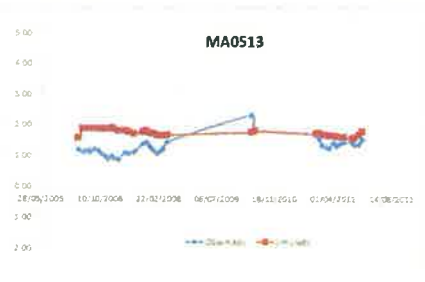
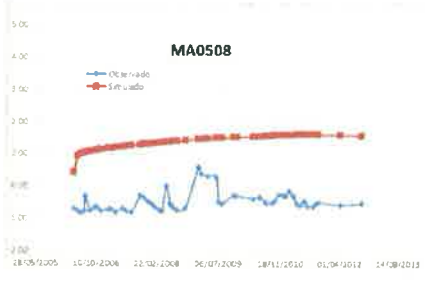
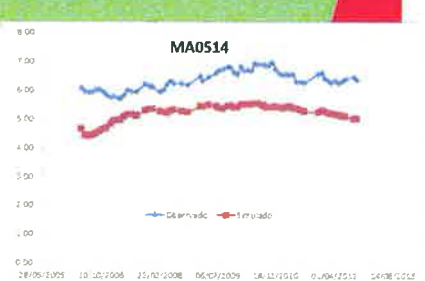
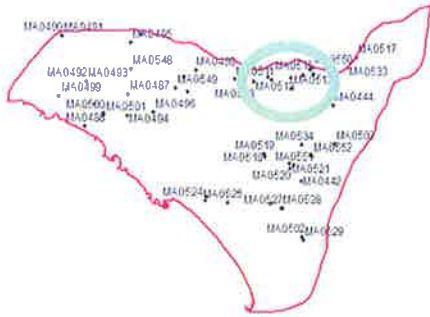


select_censo	US, DESCRIP_US		
▲	, I DOMESTIC	○	REGADA, ALTRES USOS AGRARIS I DOMÈSTIC
●	ABASTIMENT,	●	REGUIU,
●	ABASTIMENT, ABASTIMENT PÚBLIC	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS I CONSUM D'UNA GRANJA ANIMAL
●	ABASTIMENT, ABASTIMENT PÚBLIC LLUCMAJOR	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS I DOMÈSTIC
●	ABASTIMENT, ABASTIMENT PÚBLIC, EXCLUSIVAMENTE POZO DE RESERVA	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS I GRANJA ANIMAL
●	CONSUM BUGADERIA HOTEL I JARDI,	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS I PROVEÏMENT DE GRANJA
○	CONSUM, RAMADER I DOMÈSTIC	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS I PROVEÏMENT GRANJA ANIMAL
○	CONSUM, CONSUM RAMADER	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS, CONSUM GRANJA ANIMAL I DOMÈSTIC
○	CONSUM, CONSUM RAMADER I DOMÈSTIC	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS, DOMÈSTIC I CONSUM GRANJA ANIMAL
●	DISTRIBUCIÓ A PARCEL LES,	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRARIS, DOMÈSTIC I GRANJA ANIMAL
●	DISTRIBUCIÓ A PARCEL LES, 42 PARCEL LES	○	REGUIU, ALTRES USOS AGRIS, DOMÈSTIC I GRANJA ANIMAL
●	DOMÈSTIC,	○	REGUIU, CUADRA DE CABALLOS I DOMÈSTIC
○	DOMÈSTIC, I ALTRES USOS AGRARIS	○	REGUIU, DOMÈSTIC I ABASTIMENT DE LA GRANJA
○	DOMÈSTIC, I NETEJA DE MAQUINARIA I VEHICLES	○	REGUIU, DOMÈSTIC I CONSUM D'UNA GRANJA ANIMAL
○	DOMÈSTIC, I REGUIU	○	REGUIU, DOMÈSTIC I CONSUM GRANJA ANIMAL
○	DOMÈSTIC, REGUIU I ALTRES USOS AGRARIS	○	REGUIU, DOMÈSTIC, ALTRES USOS AGRARIS I PROVEÏMENT DE GRANJA
●	INDUSTRIAL,	○	REGUIU, I ALTRES USOS AGRARI
●	INDUSTRIAL 7 000 M3 USOS I RESTO PARA REGUIU	○	REGUIU, I ALTRES USOS AGRARIS
●	INDUSTRIAL, PRODUCTOS LACTEOS	○	REGUIU, I ALTRES USOS AGRARIS I DOMÈSTIC
		○	REGUIU, I ALTRES USOS AGRARIS I PROVEÏMENT GRANJA ANIMAL
		○	REGUIU, I CONSUM DOMESTIC PROPI
		○	REGUIU, I CONSUM GRANJA ANIMAL
		○	REGUIU, I DOMÈSTIC
		○	REGUIU, I DOMÈSTIC
		○	REGUIU, I RAMADER
		○	REGUIU, REGUIU FRUTALES I DOMÈSTIC
		○	REGUIU, REGUIU HUERTO I CONSUM DOMÈSTIC
		○	REGUIU, REGUIU HUERTO, PLANTAS I DOMÈSTIC
		○	REGUIU, REGUIU I DOS FINCAS COLINDANTES
		●	REGUIU, REGUIU PER SI FALLA AIGUA DE LA DEPURADORA
		○	REGUIU, REGUIU, RAMADER I DOMÈSTIC PROPI
		●	SUBMINISTRAMENT,
		●	SUBMINISTRAMENT, 7 HOTELES
		●	SUBMINISTRAMENT, BASE DE SON TOUS (UNIDAD LOGISTICA 71)
		●	SUBMINISTRAMENT, BASE DE SON TOUS (UNIDAD LOGISTICA 71)
		●	SUBMINISTRAMENT, D'EMERGENCIES DE L'AEROPORT DE PALMA
		●	SUBMINISTRAMENT, PROPI AEROPORT
		●	SUBMINISTRAMENT, SUBMINISTRAMENT MANTENIMENT PISCINES
		●	SUBMINISTRAMENT, USOS PROPIS DE L'AEROPORT
		○	VENDA EN CAMIONS,
		○	VENDA EN CAMIONS,

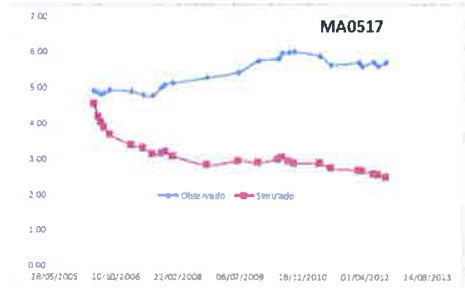
Figura AII.1. Ubicación de las extracciones en el acuífero del Pla de Sant Jordi (según el SIG del cens d'aigües subterrànies de la Direcció General de Recursos Hídrics, del Govern de les Illes Balears).

# ANEXO III. CALIBRACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS POR ZONAS

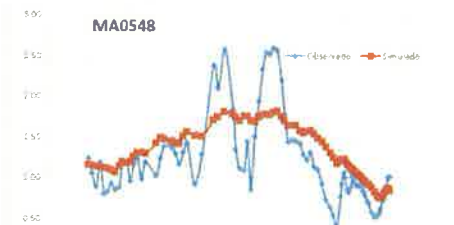
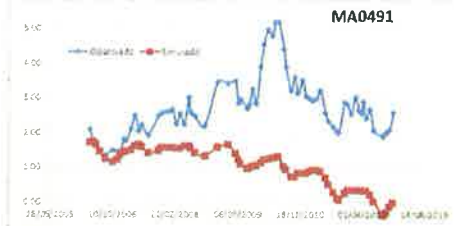
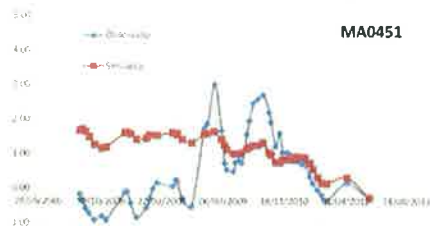
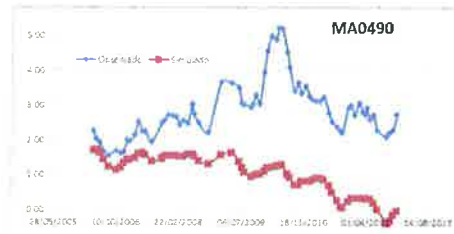
## ZONA NORTE CERCANA AL ULLAL DE SON MIR



# ZONA NORESTE

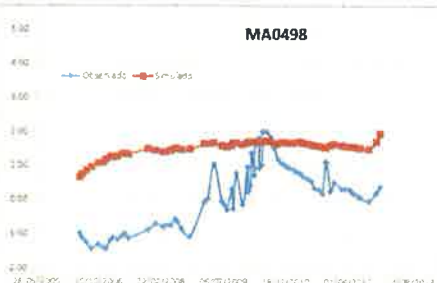
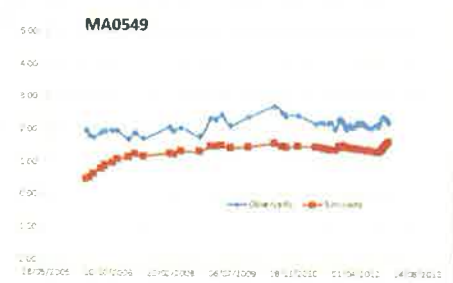
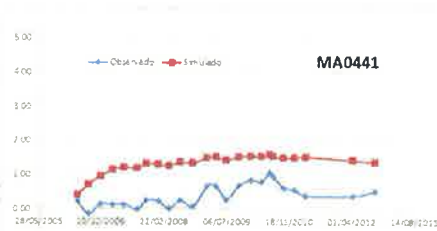
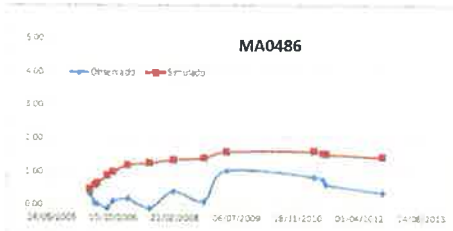


# ZONA NORESTE

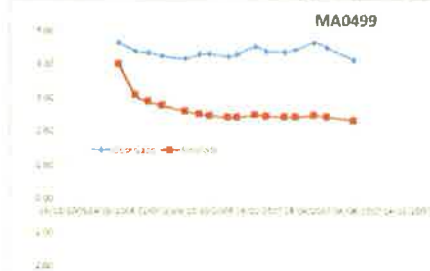
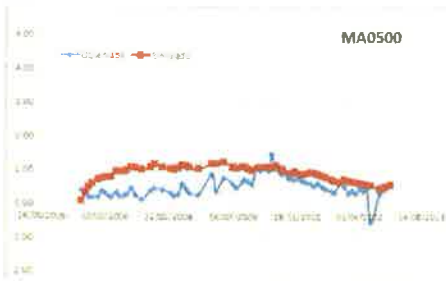
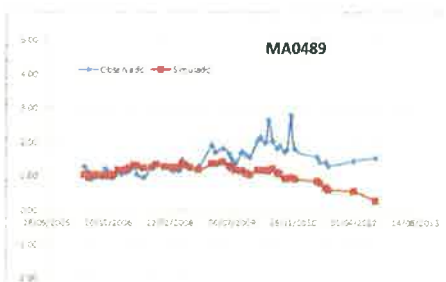
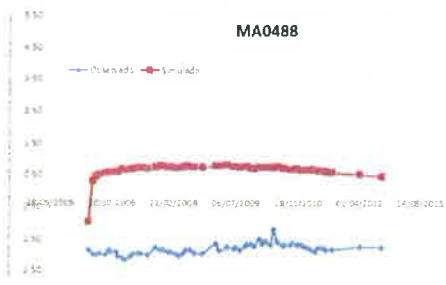
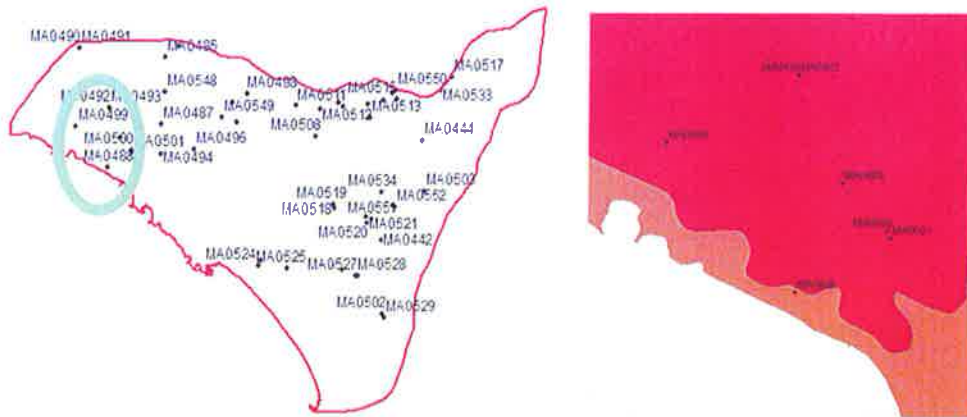




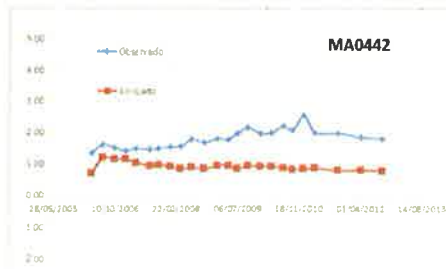
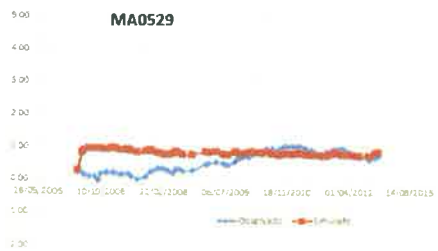
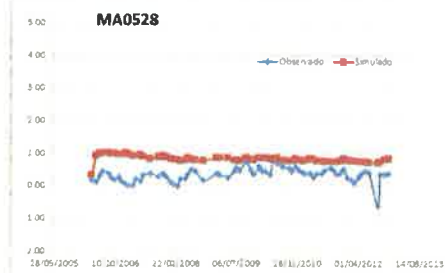
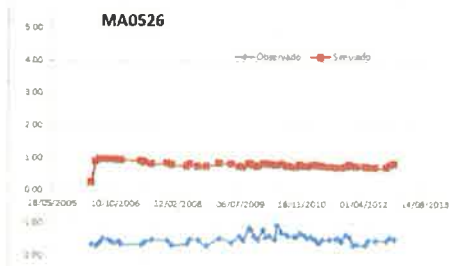
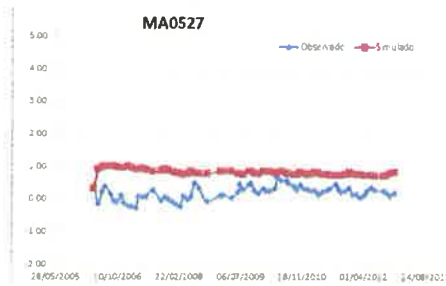
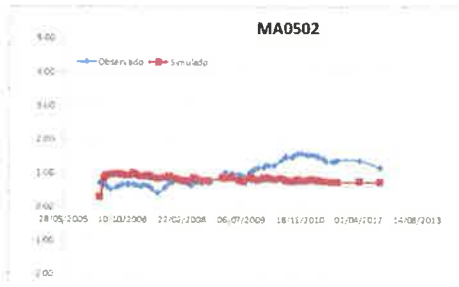
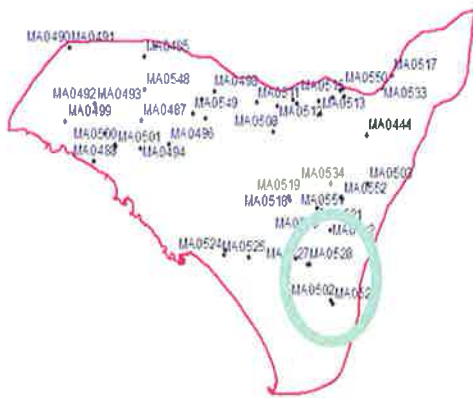
# ZONA NORTE-CENTRAL



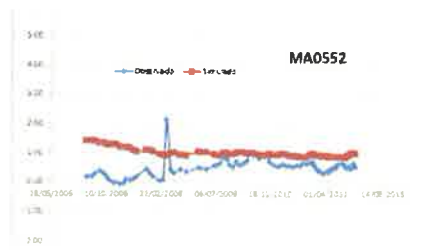
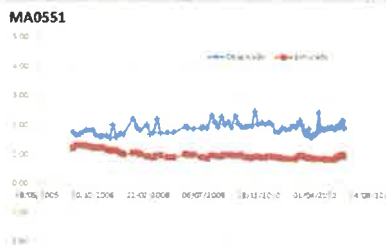
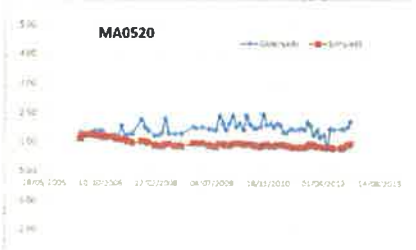
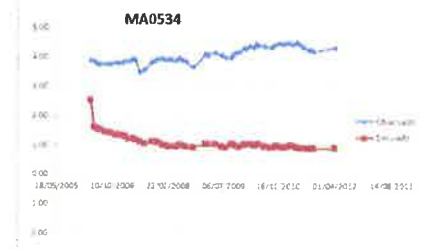
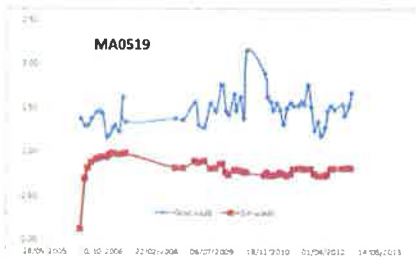
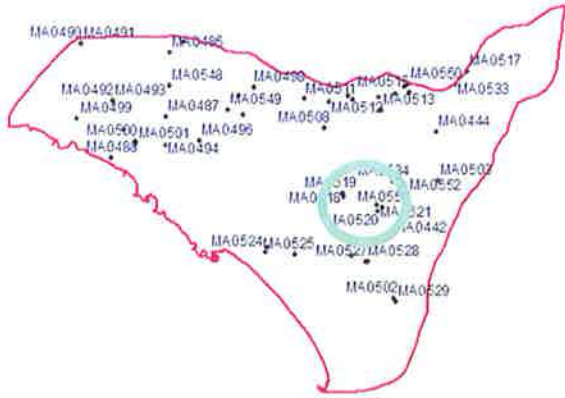
# ZONA NOROESTE SUPERIOR



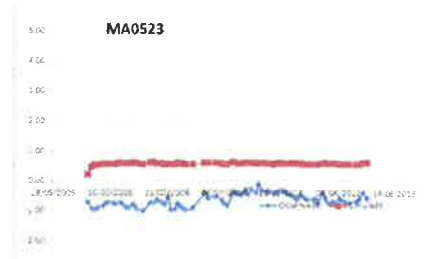
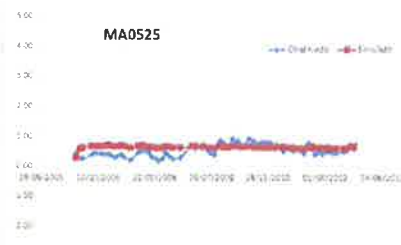
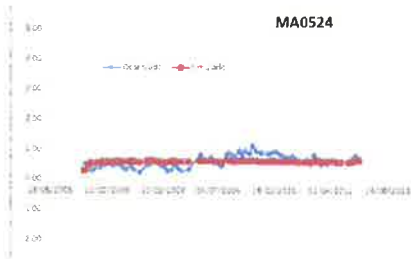
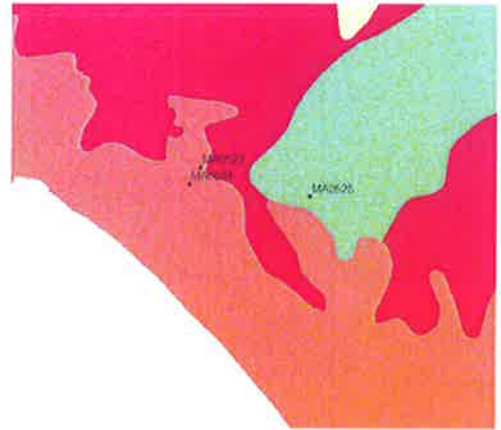
# ZONA SURESTE



# ZONA CENTRAL-OESTE



# ZONA SURESTE



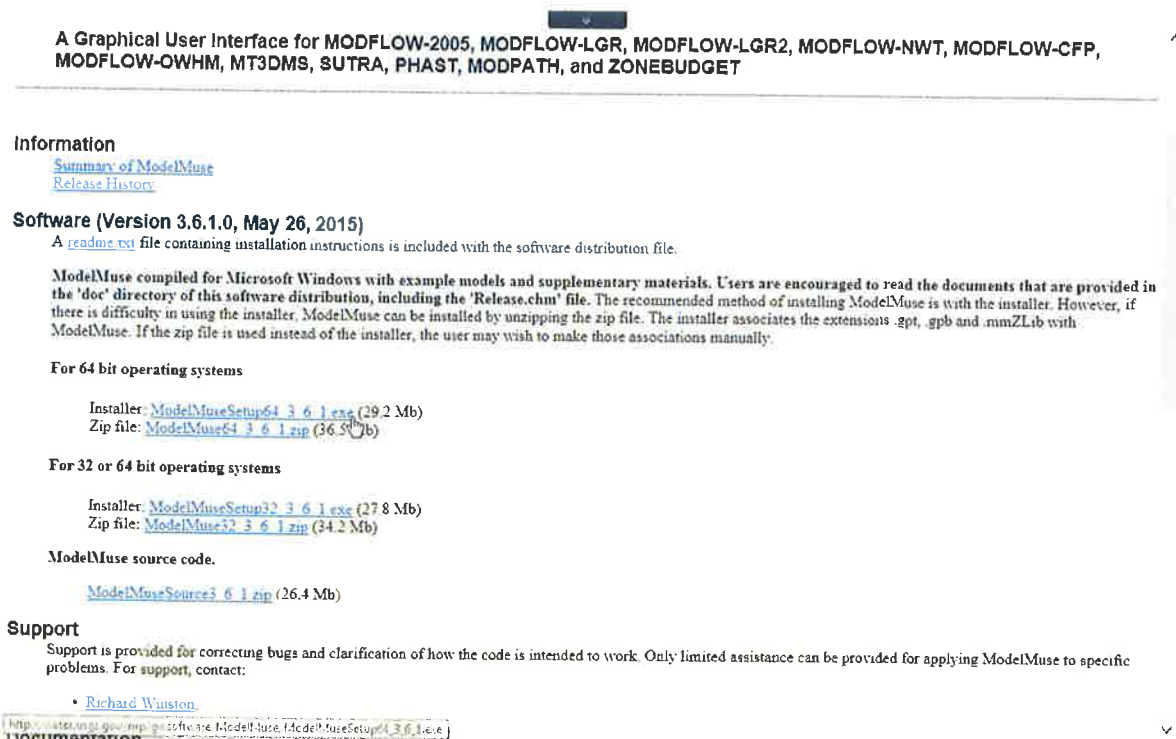
## ANEXO IV. INSTALACIÓN DEL MODELO

### INSTALACIÓN DEL PROGRAMA MODEL MUSE

MODEL MUSE es una interfaz gráfica creada por el USGS para la modelación de aguas subterráneas utilizando MODFLOW. Primero hay que descargarse el programa del siguiente link (último acceso 24/07/2015):

<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuse.html>

En dicho link buscar el instalable que se denomina ModelMuseSetup64\_6\_1.exe, para el caso de ordenadores de 64 bits:



A Graphical User Interface for MODFLOW-2005, MODFLOW-LGR, MODFLOW-LGR2, MODFLOW-NWT, MODFLOW-CFP, MODFLOW-QWHM, MT3DMS, SUTRA, PHAST, MODPATH, and ZONEBUDGET

---

**Information**

[Summary of ModelMuse](#)  
[Release History](#)

**Software (Version 3.6.1.0, May 26, 2015)**

A [readme.txt](#) file containing installation instructions is included with the software distribution file.

ModelMuse compiled for Microsoft Windows with example models and supplementary materials. Users are encouraged to read the documents that are provided in the 'doc' directory of this software distribution, including the 'Release.chm' file. The recommended method of installing ModelMuse is with the installer. However, if there is difficulty in using the installer, ModelMuse can be installed by unzipping the zip file. The installer associates the extensions .gpt, .gpb and .mmZlib with ModelMuse. If the zip file is used instead of the installer, the user may wish to make those associations manually.

**For 64 bit operating systems**

Installer: [ModelMuseSetup64\\_3\\_6\\_1.exe](#) (29.2 Mb)  
Zip file: [ModelMuse64\\_3\\_6\\_1.zip](#) (36.5 Mb)

**For 32 or 64 bit operating systems**

Installer: [ModelMuseSetup32\\_3\\_6\\_1.exe](#) (27.8 Mb)  
Zip file: [ModelMuse32\\_3\\_6\\_1.zip](#) (34.2 Mb)

**ModelMuse source code.**

[ModelMuseSource3\\_6\\_1.zip](#) (26.4 Mb)

**Support**

Support is provided for correcting bugs and clarification of how the code is intended to work. Only limited assistance can be provided for applying ModelMuse to specific problems. For support, contact:

- [Richard Winston](#)

[http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuseSetup64\\_3\\_6\\_1.exe](http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuseSetup64_3_6_1.exe)

Se ejecuta este archivo .exe y se instalará ModelMuse en un directorio elegido por el usuario. Por defecto ModelMuse se instala en C:\Archivos de Programa\USGS\ModelMuse\_6\_1 or cualquier otra versión nueva descargada. El instalador asocia los archivos de extensión .gpt, .gpb y .mmZlib al programa. Se crearan dos carpetas dentro del directorio ModelMuse\_6\_1, una llamada bin y otra llamada doc. En la primera están los programas ModelMuse, ModelMonitor y MF2005, en la segunda se incluye distinta documentación en inglés. También ModelMuse crea una carpeta dentro del directorio "Mis documentos" denominado "ModelMuse Examples", y que contiene ejemplos y datos.

El archivo del modelo que se adjunta a este documento se denomina *transitorio.gpt* y se puede abrir con el programa ya instalado.



## **PARTE 6**

### **INFORME SOBRE LOS ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN SUELOS MEDIANTE INFILTROMETRÍA DE ANILLO SIMPLE EN EL PLA DE MALLORCA**

#### **Equipo de trabajo**

Luis Moreno Merino  
Almudena de la Rosa Román  
Pedro Agustín Robledo Ardila  
Esperanza Palmer Gómez

## INDICE

1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DEL TRABAJO.....	3
2-MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	6
5- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	12
3- REFERENCIAS.....	14

## ANEXO 1. GRÁFICAS DE INFILTRACIÓN



## 1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DEL TRABAJO

El presente informe se enmarca dentro del proyecto titulado “Estudio Científico-Técnico de las inundaciones en Es Pla de Sant Jordi, Palma de Mallorca, Islas Baleares. España”. Dicho proyecto presenta un enfoque multidisciplinar, en el que se analizan las causas y los procesos ligados a las inundaciones periódicas del Pla. Los principales temas que se abordan son: el estudio de la distribución espacio-temporal de precipitaciones, la evolución de los niveles piezométricos de la masa de agua subterránea 18.14M2 Sant Jordi, la posible influencia de otros aportes hídricos naturales a la cuenca, el análisis topográfico y de drenaje-inundabilidad, etc. En el proyecto se han planteado como objetivos generales la evaluación de los procesos que dan lugar a las inundaciones intermitentes en el Pla de Santa Jordi y el análisis de la variabilidad espacial-temporal del área inundada. Se intenta en última instancia dar una respuesta técnica que permita evitar o paliar los efectos de las inundaciones.

Para cumplir con los objetivos generales se han planteado una serie de objetivos específicos, entre los cuales está el análisis de la relación entre las características geológicas y las propiedades hidrogeológicas de los sedimentos que rellenan la zona superior del acuífero y su correspondencia con la distribución espacial de las inundaciones y el proceso de drenaje posterior a las mismas. En este contexto se enmarca el presente estudio que se plantea como una primera aproximación a la caracterización hidráulica de los suelos de la Plana. Este informe es un primer estudio que ha de permitir la planificación de futuras campañas de infiltrometría y la optimización del consumo de recursos humanos, técnicos y económicos en la ejecución de las mismas.

## 2-MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se ha realizado en base a 10 ensayos puntuales en lugares seleccionados como “puntos tipo” representativos de áreas homogéneas. En la figura 1 se muestra la localización de los ensayos sobre el mapa geológico de la zona, y en la tabla 1 se muestran las coordenadas UTM de los mismos.

Punto	Coordenadas	
	UTMX	UTMY
1 (piezómetro C9)	473407	4379048
2 (CLH_Depósitos)	475121	4379747
3 (Son Banya)	476795	4378925
4 (Ullal Son Mir)	478832	4380557
5 (Sa Casa Blanca)	479412	4379863
6 (Base aérea entrada)	478407	4379498
7 (Base aérea)	477921	4378879
8 (Gasolinera C_22)	479018	4377618
9 (Parque Son Oms)	476774	4376501
10 (Pil-larí)	477635	4375920

Tabla 1. Situación de los puntos de ensayo

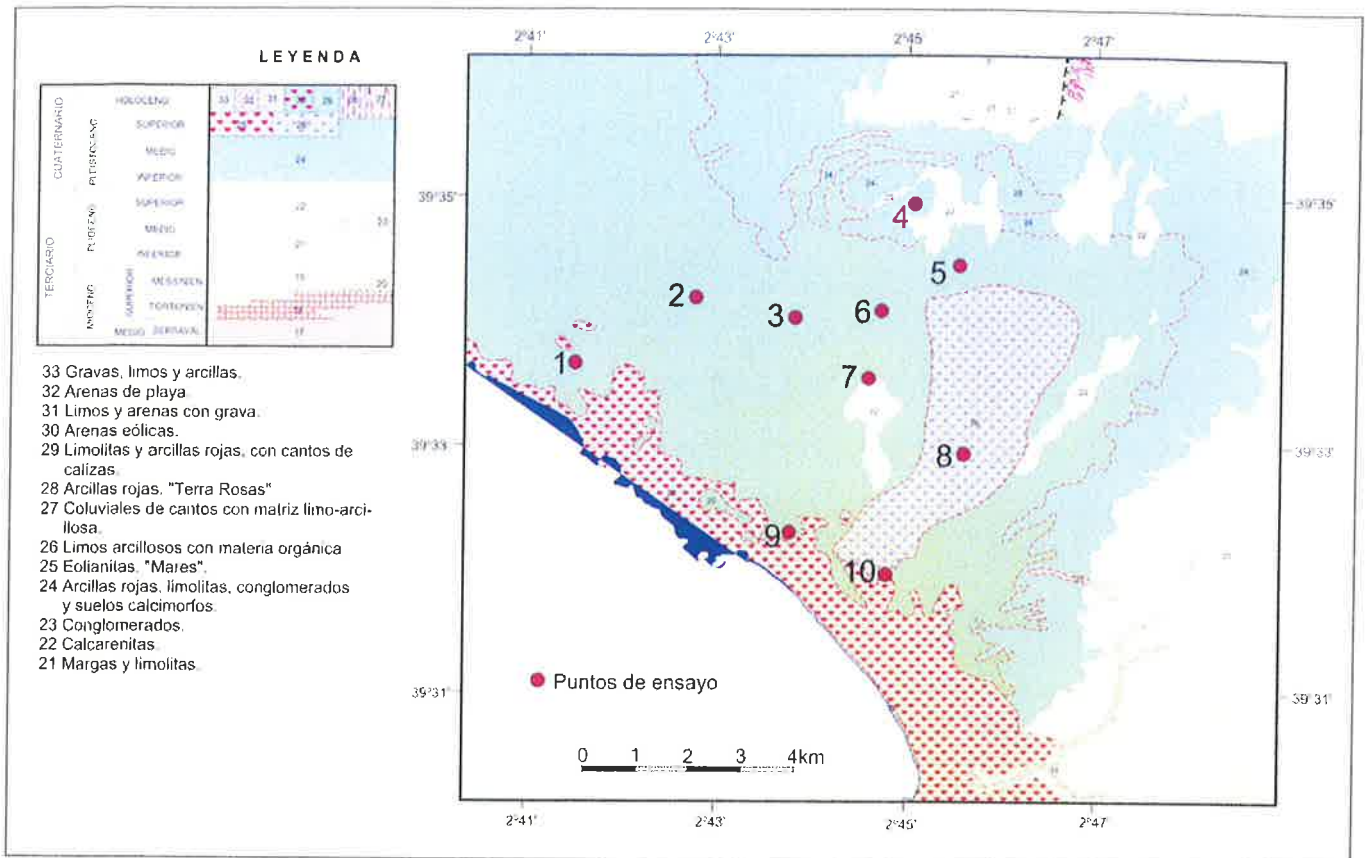


Figura 1 Situación de los puntos de ensayo sobre el mapa geológico.

Como se puede observar en la figura 1, en la que se han representado los materiales aflorantes en las zonas inundables, la mayoría de los puntos de medición (1, 2, 3, 5, 6, 7, 9) se han situado sobre los más recientes, holocenos, descritos como limolitas y arcillas rojas con cantos de calizas, aunque también se han caracterizado puntos (8 y 10) ubicados sobre limos arcillosos con materia orgánica o materiales más complejos (punto 4) que incluyen arcillas rojas, limolitas, conglomerados y suelos calcimorfos.

El método seleccionado para la determinación de la permeabilidad saturada superficial ha sido el de infiltrometría de anillo sencillo. Este método presenta, sobre los métodos de laboratorio tres ventajas principales: es relativamente rápido, proporciona resultados in situ, el diámetro del anillo con el que se realizan los ensayos permite tener en consideración el efecto de la porosidad secundaria, y el que con los datos obtenidos es posible trazar una curva de saturación. Por otra parte, su principal desventaja, inherente a cualquier método de ensayo puntual, es que puede dar resultados válidos únicamente a escala muy local, así como el limitado número de repeticiones que se pueden realizar en un tiempo razonable de ensayo (que en el presente caso han sido 2). La principal desventaja de emplear un anillo único es la posibilidad de sobreestimar los valores de infiltración si el tiempo de estabilización no es suficientemente elevado. No obstante cuando se emplea como técnica exploratoria, que es el uso que se le ha dado, sin duda las ventajas compensan los inconvenientes.

Cuando se emplea un infiltómetro de cilindro para calcular la permeabilidad se puede demostrar, aplicando la ecuación de Darcy, que el valor obtenido de la tasa de infiltración básica ( $f_0$ ) es igual a la conductividad hidráulica saturada si la filtración es estrictamente vertical y el perfil del suelo es profundo y uniforme. La verticalidad del bulbo de infiltración se garantiza, en el caso de los infiltómetros de doble anillo, mediante el efecto barrera que provoca la presencia del anillo exterior. En el caso de emplear un único anillo se puede

obtener una buena aproximación prolongando suficientemente el tiempo de medida, especialmente si la humedad del suelo al comienzo del ensayo no es suficientemente elevada.

Con el fin de ajustar los valores de la tasa de infiltración básica  $f_0$  a los de permeabilidad hidráulica saturada ( $K_s$ ) más plausibles se han recalculado los valores obtenidos mediante el ajuste de *Reynolds y Elrick*. Estos autores proponen la siguiente fórmula para ensayos a carga constante:

$$K_s = \frac{i}{\left[1 + \frac{\lambda + D}{C_1 d + C_2 b}\right]}$$

donde:

**i** Es la tasa de infiltración final ( $f_c$ )

**D** Es la carga de agua en el cilindro

**d** La profundidad de inserción del anillo

**b** El radio de infiltración

**$C_1$  y  $C_2$**  Son constantes empíricas para las que Reynolds y Elrick recomiendan los valores 0,993 y 0,578, respectivamente

**$\lambda$**  Es un parámetro que indica la longitud de capilaridad macroscópica en un determinado suelo. Los autores recomiendan un valor de “ $\lambda$ ” de 0,08 m para la mayoría de suelos que presenten un desarrollo estructural, 0,03 m para suelos de textura muy gruesa, y 0,25 m para suelos de textura fina sin macroporos.

También se han ajustado los valores de permeabilidad mediante la aproximación de Wu que está específicamente diseñada para la interpretación de ensayos realizados mediante anillos simples. Este método permite determinar la conductividad hidráulica representando los valores de infiltración acumulada de un ensayo de infiltración controlada con respecto al tiempo, y ajustando el tramo final a una recta (condición de saturación del medio). El modelo matemático desarrollado por estos autores permite calcular los valores de  $K_s$  a partir de la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{A}{af}$$

donde:

**A** Pendiente de la recta de ajuste

**a** Constante adimensional determinada empíricamente

**f** Factor que depende de las dimensiones del hueco de infiltración que se calcula mediante la siguiente expresión para el caso de un hueco cilíndrico:

$$f = \frac{H + \frac{1}{\alpha}}{d + \frac{r}{2}} + 1$$

Donde:

- d** Profundidad de inserción del cilindro
- r** Radio del anillo de infiltración
- H** Carga de agua en el cilindro
- $\alpha$**  Parámetro que depende del tipo de material que forma el lecho de infiltración y que puede estimarse

Por último, se han estimado las características hidráulicas de los perfiles mediante el programa Rosetta (versión 1.2) Rosetta emplea los parámetros hidráulicos del modelo de van Genuchten y la conductividad hidráulica saturada a partir de datos básicos del suelo mediante funciones de edafotransferencia basadas en análisis de redes neuronales. Las funciones se desarrollaron sobre una base de datos de más de 2000 muestras. De esta forma se pueden estimar la retención de agua y la conductividad hidráulica saturada a partir de datos como la clase textural (% arena, % limo y % arcilla), la densidad aparente y uno o dos puntos de la curva de retención (a 33 kPa y a 1.500 kPa). Adicionalmente, Rosetta permite estimar los parámetros de conductividad hidráulica no saturada a partir de parámetros estimados y ajustados de la curva de retención. En el presente estudio se ha empleado la aproximación más sencilla que utiliza el análisis textural.

Simultáneamente a la realización de los ensayos de infiltración se han tomado muestras del terreno con el objeto de hacer una serie de determinaciones complementarias (clasificación textural, densidad real, contenido en materia orgánica) necesarias para la mejor interpretación de los ensayos de infiltración.

### **3-PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **a) Clasificación Textural**

En la tabla 2 y en la figura 2 se presentan los resultados analíticos obtenidos en la caracterización textural de la fracción fina. Como se puede observar todas las muestras corresponden a texturas equilibradas finas. Las más finas son de naturaleza arcillosa limosa (puntos 6, Base Aérea Entrada y punto 8, Gasolinera C\_22) y las más gruesa (muestra 10 Pil-lari), franco arenosa. En general se puede decir que son texturas concordantes con los suelos ricos en arcillas que tienen como material original calizas y dolomías que sufren un intenso proceso de descarbonatación; este tipo de materiales se caracterizan además por la abundancia de fragmentos grandes, de centimétricos a decimétricos, lo que se observa claramente en campo. De manera habitual, En general este tipo de materiales muestran permeabilidades bajas que se ven incrementadas, a veces en varios órdenes de magnitud, ante la presencia de

porosidad secundaria, ya sea por procesos de bioturbación, o debido a la presencia de expansivas en proporciones suficientes.

Punto	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación USDA
1 (Piezómetro C9)	17.22	64.30	18.48	Franco limoso
2 (CLH_Depósitos)	27.19	42.65	30.16	Franco arcilloso
3 (Son Banya)	10.90	52.00	37.10	Franco arcillo-limoso
4 (Ullal Son Mir)	16.62	56.50	26.88	Franco arcillo-limoso
5 (Sa Casa Blanca)	19.96	53.39	26.65	Franco limoso
6 (Base aérea entrada)	5.08	41.69	53.23	Arcillo limoso
7 (Base aérea)	34.36	42.40	23.24	Franco
8 (Gasolinera C_22)	12.35	44.40	50.43	Arcillo limoso
9 (Parque Son Oms)	29.07	50.43	20.50	Franco Limoso
10 (Pil-lari)	55.09	31.55	13.36	Franco arenoso

Tabla 2. Análisis textural (según normas USDA)

#### **b) Composición de la fracción fina, contenido en materia orgánica y densidad**

La composición de la fracción tamaño arcilla condiciona las características determinantes de la permeabilidad saturada y no saturada, como son el tamaño de poro, el potencial mátrico, la porosidad total y efectiva y sobre todo la estructura secundaria del suelo.

Como se puede ver, en los materiales estudiados la mayor parte de la fracción fina está compuesta por calcita y dolomita, siendo significativo el contenido en cuarzo en únicamente dos de las muestras (9 Parque Son Oms y 6 Base Aérea Entrada), muestras que probablemente procedan de rellenos con material exógeno. La presencia de Aragonito es testimonial e irrelevante desde el punto de vista de la permeabilidad.

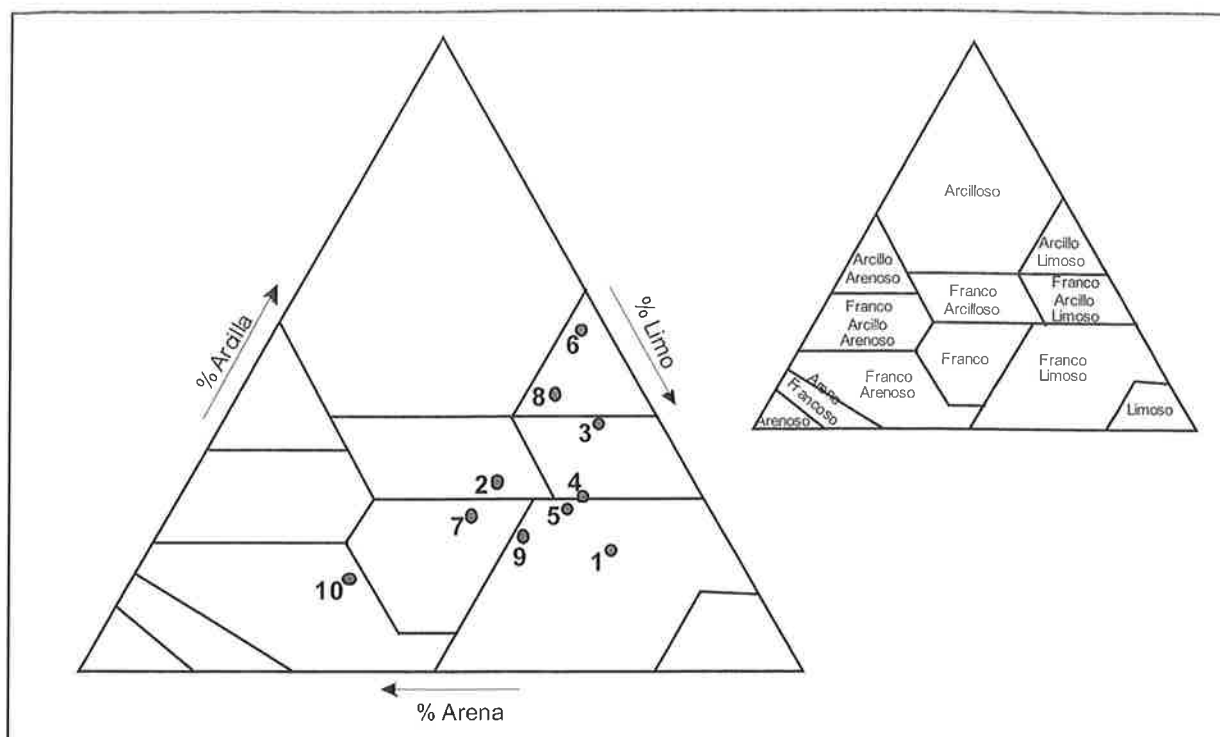


Figura 2. Triángulo de clases texturales (según norma USDA)

Muestra	Filosilicatos								
	Calcita	Aragonito	Dolomita	Cuarzo	Feldespatos	Illita	Caolín	Vermiculita	Clorita
1 (Piezómetro C9)	47		25	12	4	8	4	(I)	
2 (CLH_Depósitos)	69		11	8	3	7	2	(I)	
3 (Son Banyá)	47		22	6	6	11	13		
4 (Ullal Son Mir)	47		12	8	3	26	4		
5 (Sa Casa Blanca)	61		3	17	6	10	3		
6 (Base aérea entrada)	20		20	28	4	20	8	(I)	
7 (Base aérea)	63	3	8	13	4	8	1		(I)
8 (Gasolinera C_22)	42		2	10	4	37	5		(I)
9 (Parque Son Oms)				55	14	22	10		
10 (Pil-lari)	68	8	8	7	2	5	2		

Tabla 3. Análisis de RX de la fracción arcilla

Por otra parte, el filosilicato dominante es la Illita, una arcilla micácea no expansiva que da lugar a suelos con escasa tendencia a la formación de porosidad secundaria por agrietamiento dependiente de la presencia de arcillas. El segundo filosilicato en abundancia es el Caolín, un silicato estratificado que al igual que la illita no tiende a formar grietas de retracción. Vermiculita y clorita se han detectado en cantidades no relevantes.

Punto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Materia orgánica (%)
1 (piezómetro C9)	2.56	5.59
2 (CLH Depósitos)	2.63	2.66
3 (Son Banya)	2.58	4.24
4 (Ullal Son Mir)	2.55	5.12
5 (Sa Casa Blanca)	2.61	3.22
6 (Base aérea entrada)	2.59	2.64
7 (Base aérea)	2.63	2.47
8 (Gasolinera C_22)	2.65	2.05
9 (Parque Son Oms)	2.69	3.25
10 (Pil-larí)	2.66	2.26

Tabla 4. Contenido en materia orgánica y densidad real

Los contenidos en materia orgánica son elevados, entre el 2,05% en la zona del punto 8 (Gasolinera C\_22) y el 5,59% del piezómetro C9, y corresponden a suelos que desde una perspectiva agrícola pueden ser considerados como óptimos. Desde la perspectiva de la permeabilidad, este tipo de suelos en los que concurren elevados contenidos en calcio, humedad y materia orgánica también elevadas, suelen mostrar a su vez elevados niveles de bioturbación, mediada por ejemplo por la presencia de lombrices y raíces abundantes, que aumentan la permeabilidad esperada del análisis textural. El elevado contenido en materia orgánica también suele ser responsable de valores de densidad real menores a los esperables para el material parenteral del suelo.

La densidad real de suelos minerales de composición típica (aluminio silicatos, sílice) varía en el rango de 2,6 a 2,7 g/cm<sup>3</sup>, estas densidades descienden algo en suelos salinos dado el menor peso específico de las sales más solubles (halita 2,165 g/cm<sup>3</sup>; yeso 2,33 g/cm<sup>3</sup>). Por su parte, la introducción de materia orgánica en el perfil, cuyas densidades reales generalmente se sitúan por debajo de 1 g/cm<sup>3</sup> hace que las densidades observadas disminuyan drásticamente.

En los materiales en estudio, las densidades observadas se mueven en el rango entre 2,55 y 2,69 g/cm<sup>3</sup>, netamente por debajo de los 2,711 g/cm<sup>3</sup> del carbonato cálcico, de los 2,94 g/cm<sup>3</sup> del aragonito o incluso en su mayoría por debajo de los 2,65 g/cm<sup>3</sup> de cuarzo. El valor más elevado corresponde a la muestra tomada en el Parque Son Oms la única muestra en cuya composición mayoritaria no están presentes los carbonatos sino material cuarcítico con otros minerales pesados asociados. La correlación encontrada entre la densidad real y el contenido en materia orgánica de las muestras carbonáticas es muy elevada ( $r^2 = 0.8179$ ), como era de esperar lo que muestra claramente la homogeneidad de los materiales y la dependencia de la densidad del contenido en materia orgánica.

### c) Ensayos de infiltración y estimación de tasa de infiltración y conductividad hidráulica saturada

En condiciones teóricas ideales, la capacidad de infiltración final estimada en los ensayos mediante anillos sería igual a la conductividad hidráulica saturada (Ks) del suelo. Sin embargo, la tasa de infiltración depende de muchos factores tales como la compactación, el efecto del aire comprimido por el agua que se infiltra en el interior del suelo (que se ve potenciado por el llenado rápido del anillo de infiltración), el lavado de partículas finas en los

poros superficiales, la presencia de grietas y fisuras (macroporos) y, en general, de la heterogeneidad a diferentes escalas. Por ello, la capacidad de infiltración en realidad proporciona una idea integrada de la velocidad del flujo saturado en condiciones reales de campo, mientras que la  $K_s$  generalmente se refiere a la permeabilidad intrínseca de la matriz del suelo sin tener en cuenta ninguno de los efectos descritos anteriormente.

En las tablas 5a, 5b y 5c se recogen los resultados obtenidos en el ensayo y los valores calculados después de aplicar las correcciones de Elrick y Wu. Como se puede ver las tasas de infiltración básica ( $f_0$ ) varían en el rango entre  $177 \text{ cm día}^{-1}$  en el punto muestreado en el Parque Som Oms y el máximo de  $5299 \text{ cm día}^{-1}$  medido en la base aérea (este último valor se posiblemente afectado por las construcciones adyacentes). La corrección de Wu (tabla 5.c) apenas tiene un efecto significativo sobre los valores de  $f_0$ . **Tabla 5(a)** Resultados de los ensayos de infiltración.

La aplicación de la corrección de Elrich (tabla 5.b) proporciona valores de permeabilidad saturada ( $K_s$ ) en los alrededores del 50% de  $f_0$ . Si comparamos los valores extremos de  $K_s$ (Elrich) (93 y  $1338 \text{ cm día}^{-1}$  respectivamente) con los de referencia (tabla 6) propuestos por Whitlow, observamos que los suelos ensayados se caracterizan por presentar unas permeabilidades medias e incluso en el rango superior de las consideradas como bajas. Esto es compatible con la naturaleza arcillosa de la mayoría de los suelos muestreados, incluso valores algo mayores a los que se podrían esperar en base al escaso desarrollo observado en la porosidad secundaria.

**Tabla 5(a)** Resultados de los ensayos de infiltración.

Punto	Ensayo a ( $\text{cm día}^{-1}$ )	Ensayo a ( $\text{cm sg}^{-1}$ )	Ensayo b( $\text{cm día}^{-1}$ )	Ensayo b ( $\text{cm sg}^{-1}$ )
1(Piezómetro C9)	1100	1.273E-02	1268	1.468E-02
2 (CLH_Depósitos)	998	1.155E-02	1021	1.182E-02
3 (Son Banya)	3241	3.751E-02	2572	2.977E-02
4 (Ullal Son Mir)	1633	1.890E-02	356	4.120E-03
5 (Sa Casa Blanca)	2523	2.920E-02	1627	1.883E-02
6 (Base aérea entrada)	426	4.931E-03	906	1.049E-02
7 (Base aérea)	5299	6.133E-02	1742	2.016E-02
8 (Gasolinera C_22)	1729	2.001E-02	1251	1.448E-02
9 (Parque Son Oms)	177	2.049E-03	259	2.998E-03
10 (Pil-larí)	386	4.468E-03	447	5.174E-03

**Tabla 5(b)** Corrección de Elrick

Punto	Ensayo a ( $\text{cm día}^{-1}$ )	Ensayo a ( $\text{cm sg}^{-1}$ )	Ensayo b( $\text{cm día}^{-1}$ )	Ensayo b ( $\text{cm sg}^{-1}$ )
1 (Piezómetro C9)	583	6.753E-03	672	7.785E-03
2 (CLH_Depósitos)	529	6.127E-03	541	6.268E-03
3 (Son Banya)	1719	1.990E-02	1364	1.579E-02
4 (Ullal Son Mir)	866	1.003E-02	188	2.186E-03
5 (Sa Casa Blanca)	1338	1.549E-02	863	9.989E-03
6 (Base aérea entrada)	225	2.615E-03	480	5.562E-03
7 (Base aérea)	2810	3.253E-02	924	1.069E-02
8 (Gasolinera C_22)	917	1.061E-02	663	7.680E-03



9 (Parque Son Oms)	93	1.087E-03	137	1.590E-03
10 (Pil-larí)	204	2.370E-03	237	2.744E-03

**Tabla 5(c)** Corrección de Wu

Punto	Ensayo a (cm día <sup>-1</sup> )	Ensayo a (cm sg <sup>-1</sup> )	Ensayo b (cm día <sup>-1</sup> )	Ensayo b (cm sg <sup>-1</sup> )
1 (Piezómetro C9)	1099	1.272E-02	1263	1.462E-02
2 (CLH_Depósitos)	973	1.126E-02	1019	1.179E-02
3 (Son Banya)	3214	3.720E-02	2574	2.979E-02
4 (Ullal Son Mir)	1622	1.877E-02	355	4.113E-03
5 (Sa Casa Blanca)	2517	2.913E-02	1629	1.885E-02
6 (Base aérea entrada)	423	4.895E-03	904	1.046E-02
7 (Base aérea)	391	4.520E-03	1745	2.020E-02
8 (Gasolinera C_22)	1725	1.997E-02	973	1.126E-02
9 (Parque Son Oms)	177	2.047E-03	258	2.991E-03
10 (Pil-larí)	386	4.468E-03	440	5.094E-03

Tabla 6. Grado de permeabilidad del suelo según Whitlow

Grado de permeabilidad	Conductividad hidráulica saturada (cm/s)
Elevada	$> 10^{-1}$
Media	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente impermeable	$< 10^{-7}$

Tabla 7. Grado de permeabilidad del suelo según el criterio FAO

Clases de permeabilidad de los suelos	Coeficiente de permeabilidad (K en m/s)	
	Límite inferior	Límite superior
Permeable	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-1}$
Semipermeable	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$
Impermeable	$1 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-7}$

La variabilidad encontrada en los valores de permeabilidad dentro de cada suelo tipo caracterizado, toma un valor promedio del 34,29%, con máximos del 67% en la muestra de la base aérea y 78.2% en la muestra 4 (Ullal Son Mir), y un mínimo del 2,3% en la muestra Depósitos\_CLH. Hay que hacer notar que estas variabilidades son relativamente elevadas aunque dentro de los valores esperables en suelos no naturales, en los que la acción del hombre (manejo agrícola reciente, extracción de sedimentos o rellenos, etc) impide el proceso natural de asentamiento y estabilización de la estructura del sedimento. Esta elevada variabilidad hace recomendable incrementar el número de ensayos en cada uno de los puntos a caracterizar con el fin de obtener datos de mayor fiabilidad.

A modo de referencia, en la tabla 7 se presenta el criterio de permeabilidad simplificado propuesto por la FAO para su uso en obra civil. En base a este todos los materiales estudiados pueden ser englobados dentro de la categoría de "Permeables".

Por último, en la tabla 8 se muestran los valores de permeabilidad saturada  $K_s$  calculados mediante Rosetta. El programa se ha corrido empleando como datos de entrada los valores de textura de la fracción fina, dejando que el resto de parámetros fueran ajustados con la información contenida en la base de datos del mismo. Puede resultar llamativo que los valores de permeabilidad saturada  $K_s$  hallados sean tan bajos, entre 1,54 y 8,70 cm/día. Esto se debe a que el programa ha calculado la porosidad en función de la distribución granulométrica de la fracción fina, sin considerar ni la abundancia de clastos de orden centimétrico, tan abundantes en muchas de las muestras, ni la presumible presencia de porosidad secundaria, para lo cual habría que disponer de datos de densidad aparente.

**Tabla 8.** Parámetros de van Genuchten, permeabilidad y humedades críticas calculados mediante Rosetta para la matriz.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10
$\theta_r$	0.06	0.08	0.09	0.07	0.07	0.18	0.06	0.09	0.06	0.04
$\theta_s$	0.43	0.44	0.48	0.44	0.44	0.51	0.41	0.48	0.42	0.38
$\log_{10}(\alpha)$	-2.32	-2.03	-2.00	-2.19	-2.18	-1.82	-2.07	-1.91	-2.21	-1.71
$\log_{10}(N)$	0.21	0.16	0.16	0.19	0.19	0.11	0.17	0.13	0.20	0.15
$\log_{10}(K_s)$	1.20	1.07	1.10	1.09	1.09	1.30	1.09	1.15	1.19	1.38
$\log_{10}(K_o)$	0.18	0.39	0.38	0.24	0.25	0.55	0.40	0.47	0.27	0.93

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10
$\theta_r$	0.06	0.08	0.09	0.07	0.07	0.18	0.06	0.09	0.06	0.04
$\theta_s$	0.43	0.44	0.48	0.44	0.44	0.51	0.41	0.48	0.42	0.38
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0.004	0.009	0.009	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
N	1.65	1.47	1.45	1.56	1.55	1.30	1.51	1.38	1.58	1.41
$K_s$ (cm/d)	16.14	11.93	12.77	12.36	12.55	20.33	12.43	14.30	15.73	24.53
$K_o$ (cm/d)	1.54	2.46	2.44	1.75	1.79	3.59	2.51	2.95	1.86	8.70

#### 4-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dada la extensión relativamente grande de la zona en estudio, la heterogeneidad de los materiales caracterizados y la abundancia de zonas de relleno, los datos presentados en este informe han de ser entendidos como una primera aproximación a la caracterización de las propiedades hidráulicas de los suelos presentes en las zonas inundables de la Plana de Mallorca.

Se trata de materiales de textura franca, franco arcillosa o franco limosa, sin presencia de arcillas expansibles, y predominio de la calcita entre los minerales de tamaño arcilla. Los valores de permeabilidad corregida media en su mayor parte se encuentran entre los 500 y 1000 cm día<sup>-1</sup> aunque no son infrecuentes valores por debajo de 300 cm día<sup>-1</sup> y picos de más de 2000 cm día<sup>-1</sup>.

El contenido en materia orgánica es elevado, casi siempre sobre el 2,7% lo que confiere a estos suelos unas características agronómicas muy buenas desde esta perspectiva, y disminuye los valores de densidad real claramente por debajo de los correspondientes al material original.

Es importante resaltar que en varias de las muestras analizadas, por ejemplo la muestra 9 (Son Oms) y la muestra 6 (Base Aérea Entrada), que además coinciden con las más permeables, se tiene la sospecha de que puedan tratarse, total o parcialmente, de rellenos traídos de zonas más o menos alejadas del punto de muestreo. Será necesario, en futuros muestreos o ensayos, tomar las medidas oportunas para aclarar si los puntos muestreados están formados por los sedimentos originales, por rellenos de la zona o por rellenos con aporte de materiales extraños a la zona.

Del análisis de los datos presentados se pueden deducir las siguientes recomendaciones a la hora de planificar una campaña intensiva de medidas de permeabilidad de los suelos de la Plana de Mallorca:

- Prolongar la duración de los ensayos ajustando de forma estricta el criterio de estabilización de la velocidad de infiltración.
- Hacer medidas de densidad aparente. En los análisis realizados sorprende una cierta incongruencia entre la presencia de una matriz muy fina, arcillosa, un desarrollo de porosidad secundaria no observado en las muestras de campo, y sin embargo unas tasas de infiltración relativamente elevadas que no son congruentes con los datos proporcionado por Rosetta.
- Por similares razones a las expuestas se recomienda tomar muestras para la determinación de la capacidad de campo. Esto además permitirá ajustar, si es necesario, modelos de ZNS.
- La elevada variabilidad en los valores de la tasa de infiltración básica  $f_0$  hacen recomendable que al menos se hagan tres repeticiones en cada punto.

## 5-REFERENCIAS

ELRICK, D.E. Y REYNOLDS, W.D. (1992). Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. P. 1-24 en C.G. Topp et al. (eds.). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. SSSA Spec. Publ. 30 SSSA, Madison, WI.

FAO:[ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_training/FAO\\_training/general/x6706s/x6706s09.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm).

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., (1990). Poned infiltration from a single ring. I. Analysis of steady flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1233-1241.

SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J. Y VAN GENUCHTEN, M.T. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of hydrology, 251: 163-176.

SMITH, R.E. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. Journal of Hydrology. 17, 1-21.

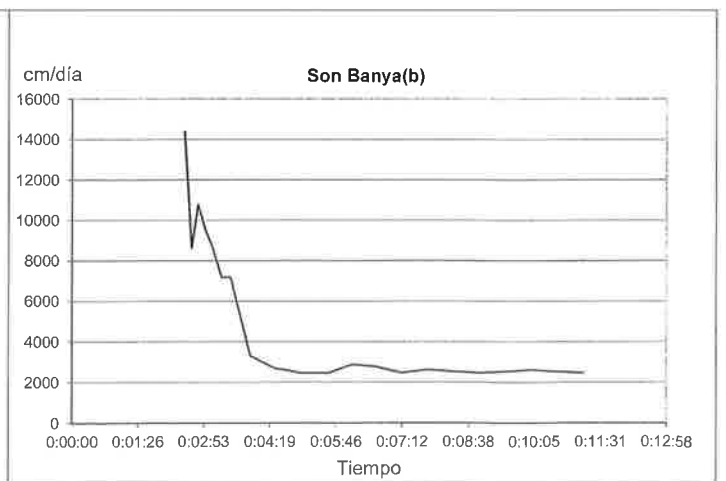
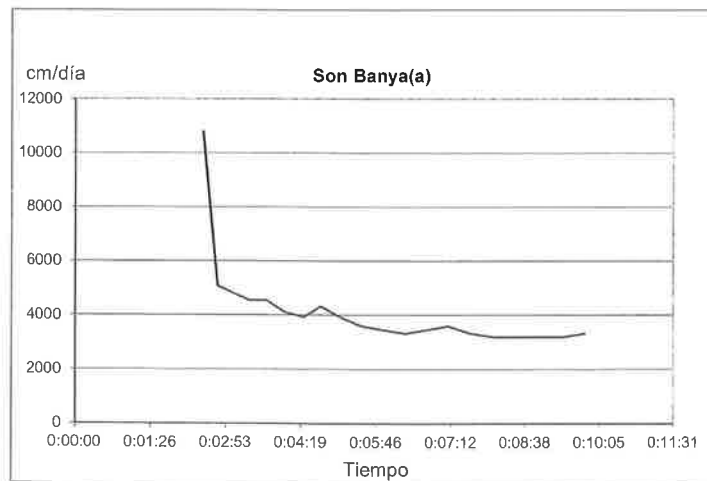
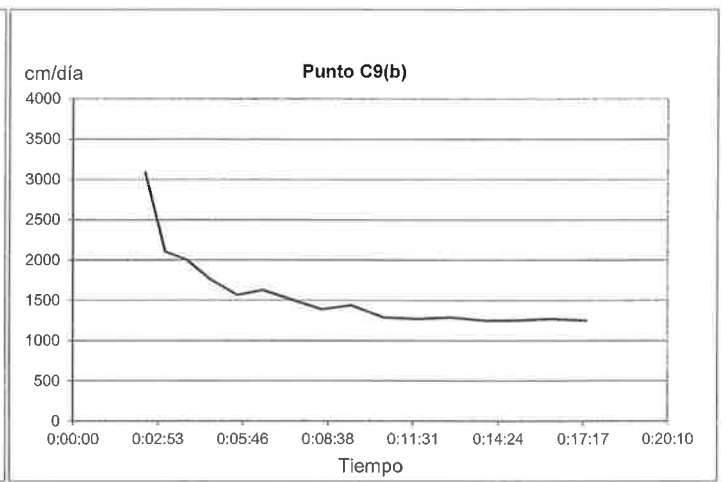
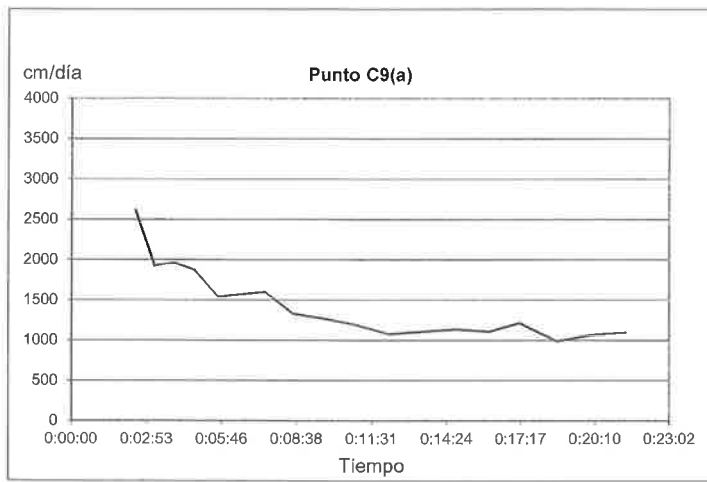
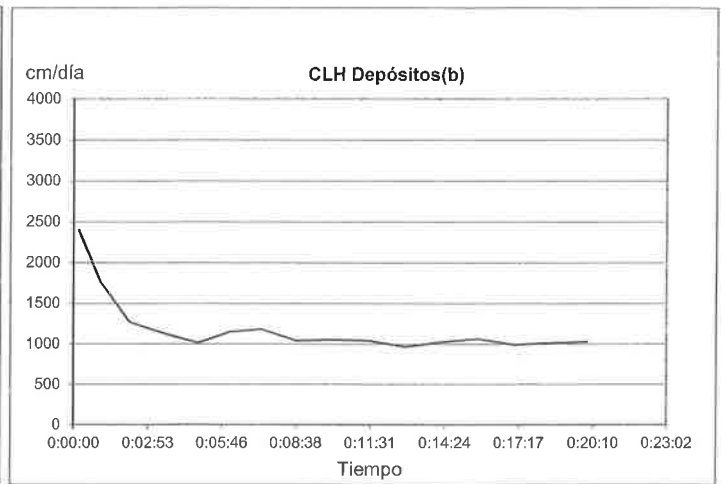
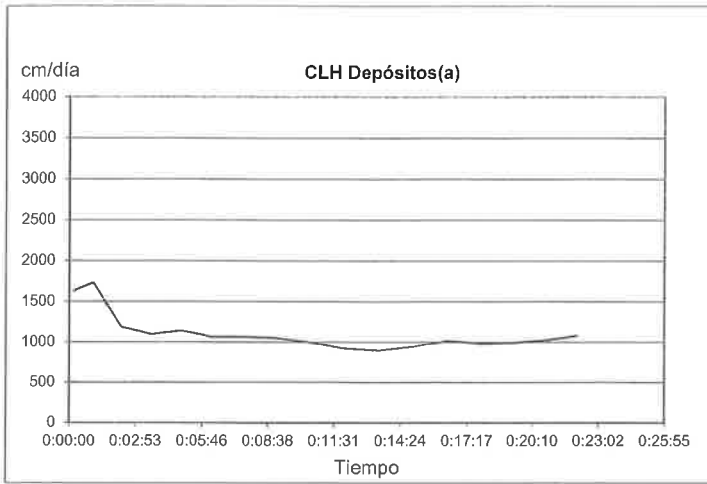
PHILIP, J.R., (1957). Theory of infiltration. Soil Science 83(5): 345-357.

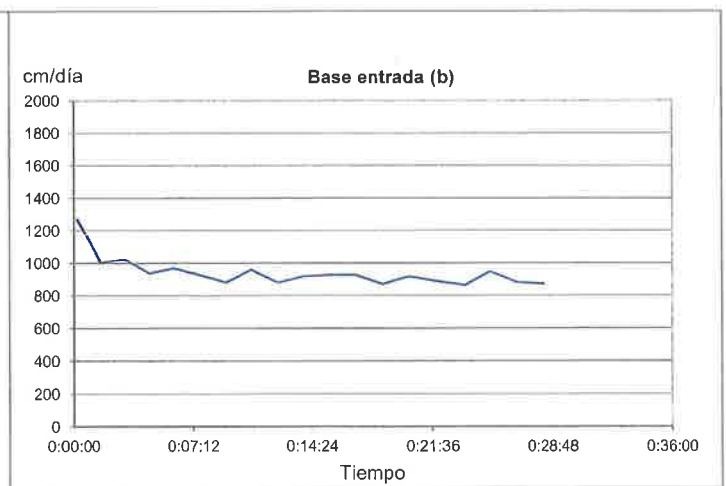
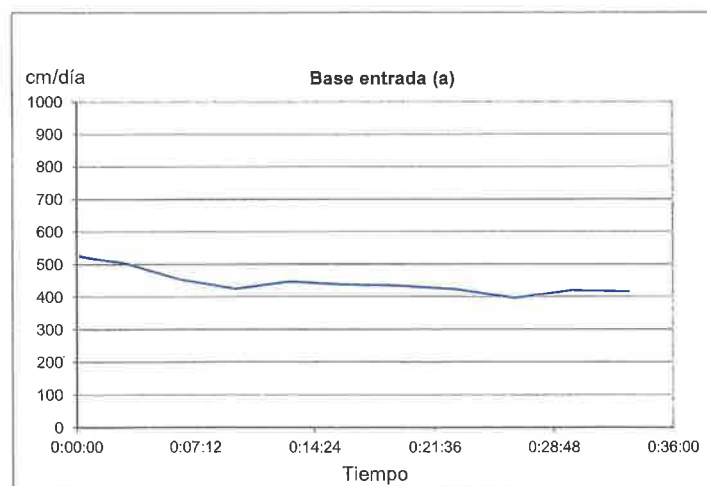
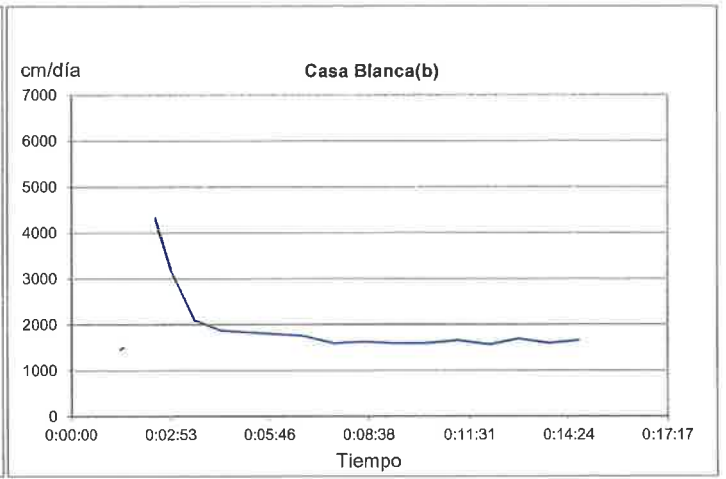
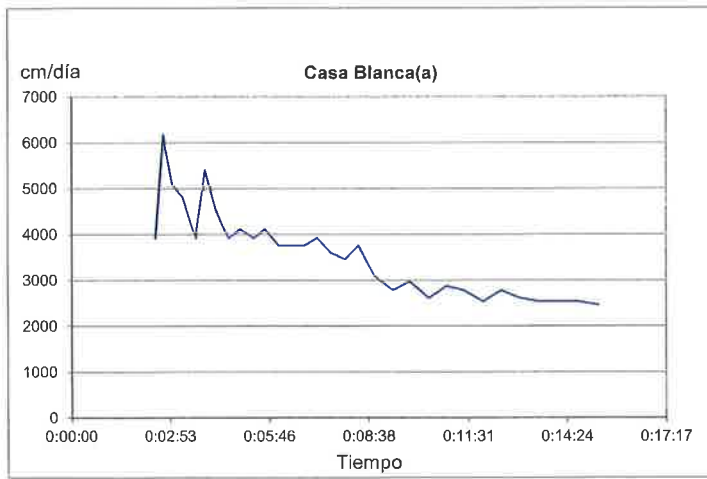
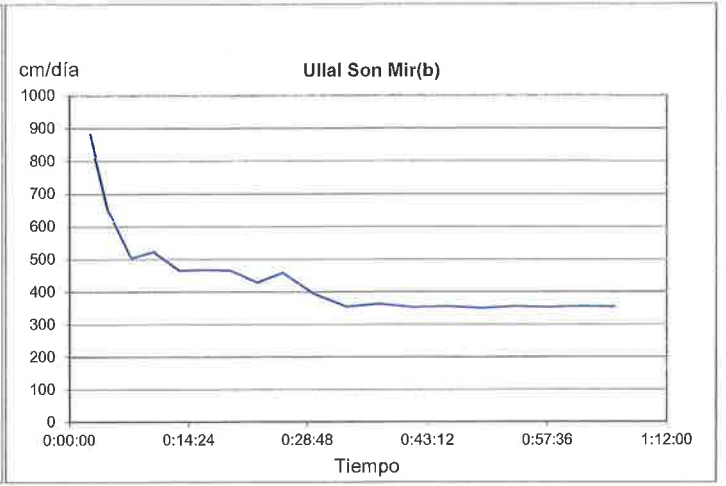
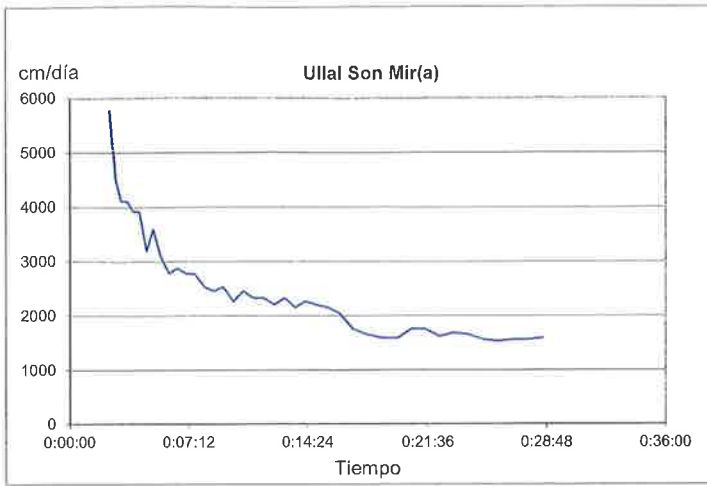
VAN GENUCHTEN, M.T., (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

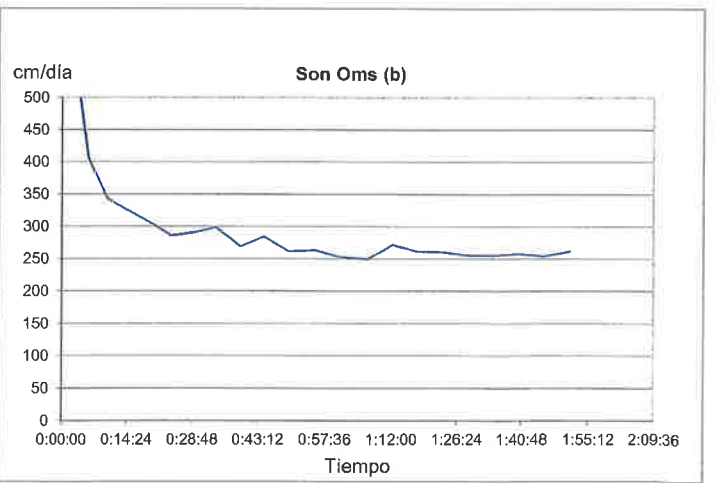
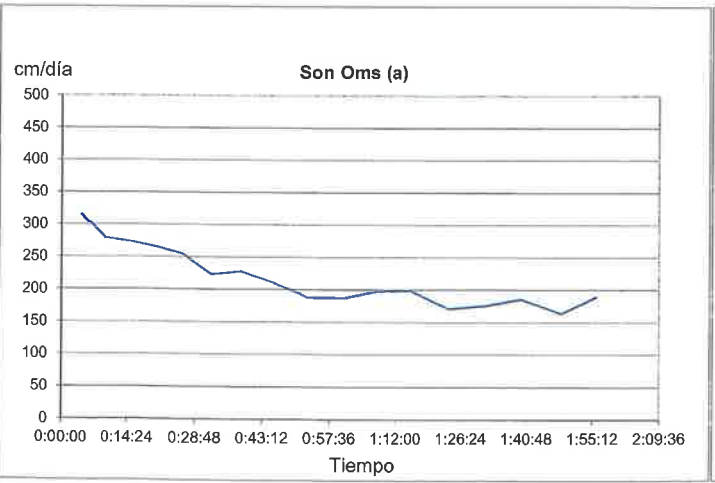
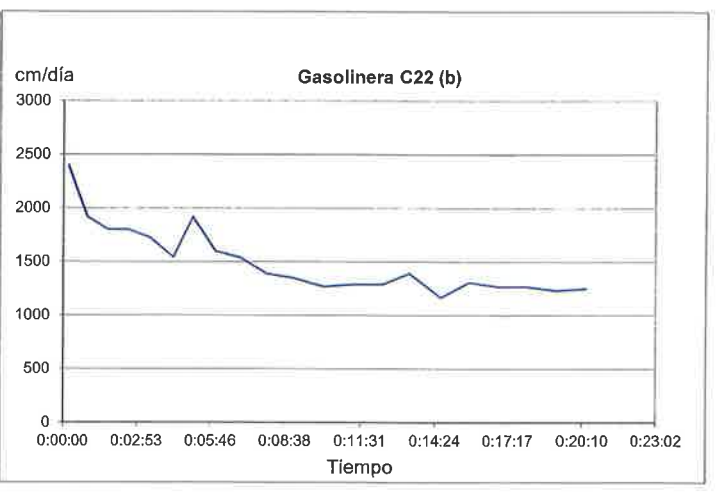
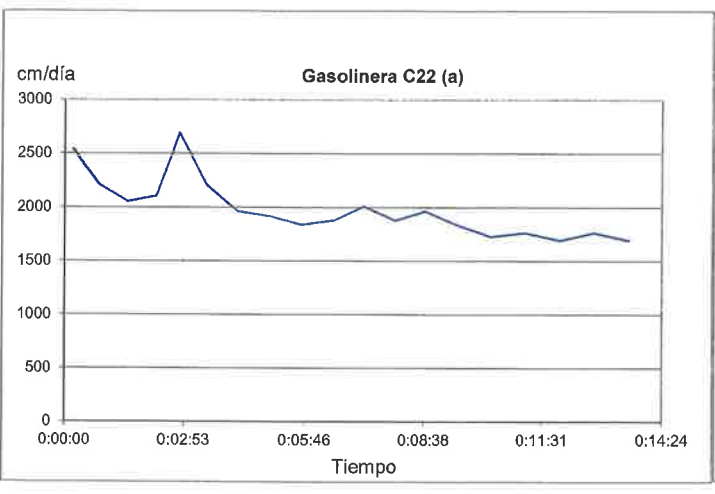
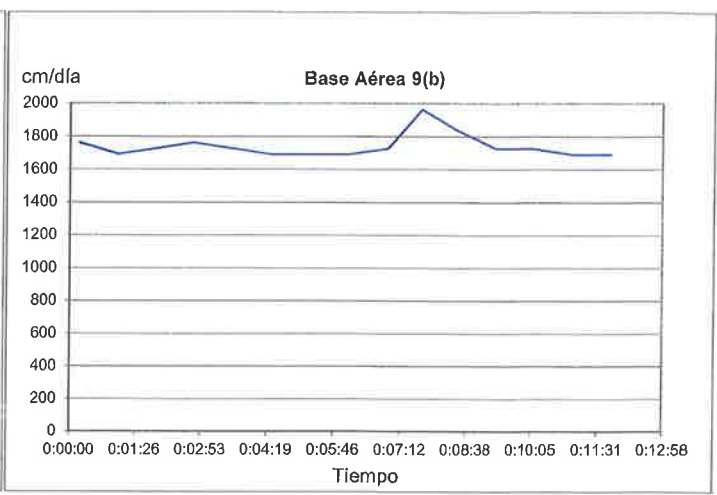
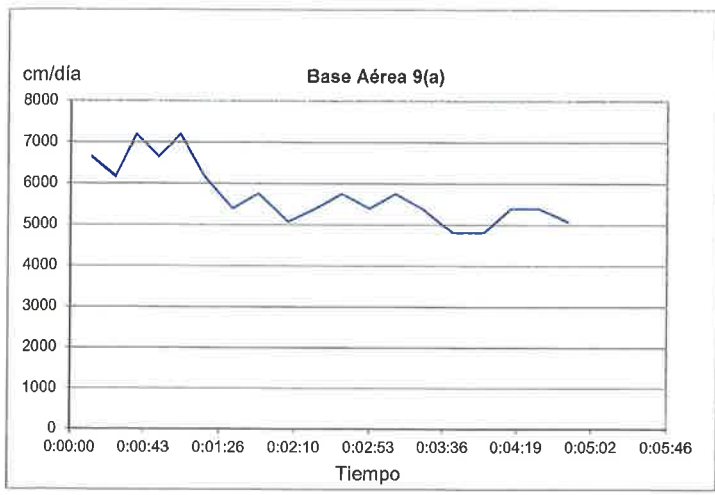
WU, L., PAN, L., MITCHELL, J. Y SANDEN, B. (1999). Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 788 - 792.

## **Anexos**

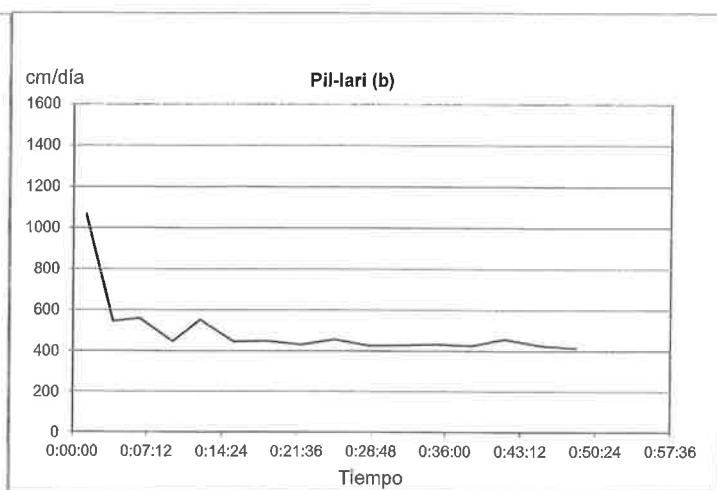
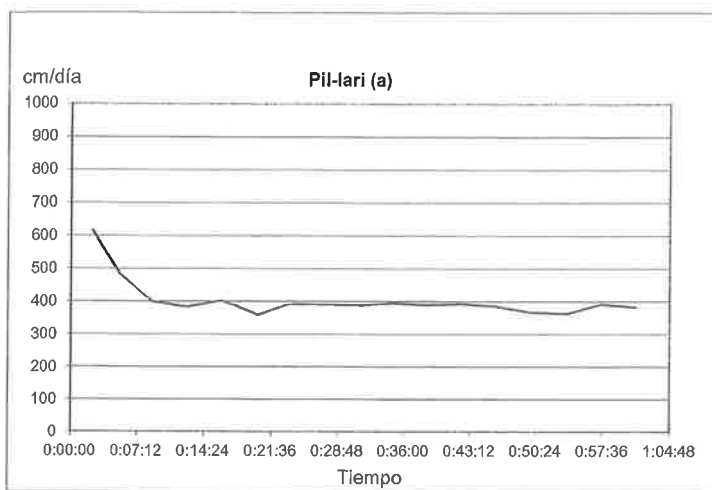
### **Gráficas de infiltración**













## PARTE 7

### ESTUDIO DE LA PELIGROSIDAD POR INUNDACIONES EN EL PLA DE SANT JORDI (MALLORCA, ISLAS BALEARES) Y PROPUESTA PARA LA RENATURALIZACIÓN HIDROMORFOLÓGICA ESTABLE DE SU DRENAJE SUPERFICIAL

#### Equipo de trabajo

Andrés Díez-Herrero  
Manuel Bernat Rebolat  
M<sup>a</sup> Ángeles Perucha Atienza  
Cristina Morello Martín  
Virginia Díaz de la Cruz  
Néstor Hernando Rodríguez, Carlos Manzanares Román  
Leticia Portuondo Seijo  
José Francisco Martín Duque

## ÍNDICE

1- INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Las inundaciones en el Pla de Sant Jordi	
1.1.1. Evolución geológica reciente	
1.1.2. Configuración geomorfológica actual	
1.1.3. Configuración geomorfológica actual	
1.1.4. Características climatológicas y de precipitación	
1.1.5. Actuaciones antrópicas recientes	
1.2. Problemática socioeconómica asociada a las inundaciones en el Pla de Sant Jordi	
1.2.1. Problemática por anegamiento de campos agrícolas	
1.2.2. Problemática de salubridad pública	
1.2.3. Problemática por inundación de áreas construidas	
1.2.4. Problemática por afección a infraestructuras de transporte	
1.3. Antecedentes en el estudio y mitigación de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi	
2- METODOLOGÍA.....	16
2.1. Planteamiento metodológico general en el marco del proyecto Poseidón	
2.2. Metodología de análisis de la peligrosidad por inundaciones	
2.2.1. Metodologías de análisis hidrológico	
2.2.1.1. Análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias	
2.2.1.3. Modelo de Cuenca	
2.2.1.3.1. Delimitación de sub-cuencas mediante la extensión HEC-GeoHMS	
2.2.1.3.2. Asignación del parámetro número de curva (NC) a cada sub-cuenca	
2.2.1.4. Modelo hidrometeorológico mediante <i>software</i> HEC-HMS	
2.2. Metodología de Análisis hidráulico	
2.2.2.1. Análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS	
2.2.2.1.1. Pre-proceso en ArcGis mediante la extensión HEC-GeoRAS	
2.2.2.1.2. Preparación del modelo hidráulico con HEC-RAS	
2.2.2.1.3. Post-procesado en ArcGIS. Visualización de resultados	
2.2.2.2. Análisis hidráulico bidimensional IBER 2D	
2.2.2.2.1. Crear o importar una geometría (topografía)	
2.2.2.2.2. Asignación de condiciones de contorno y caudales	
2.2.2.2.3. Generar la malla	
2.2.2.2.5. Asignación de las opciones del cálculo (tiempo de cálculo)	
2.2.2.2.6. Consulta de resultados (módulo post-proceso)	
2.3. Metodología de estudio de una configuración hidrogeomorfológica para la red de drenaje	
2.3.1. El método GeoFluv <sup>TM</sup> y el <i>software</i> Natural Regrade	
2.3.2. Fundamentos teóricos	
2.3.2.1. Tipología de canales fluviales con potencialidad para su reconstrucción	
2.3.2.2. Perfiles transversales de los canales fluviales naturales: el <i>bankfull</i>	
3- RESULTADOS.....	56
3.1. Resultados del análisis de la peligrosidad por inundaciones	
3.1.1. Resultados del análisis hidrológico	
3.1.1.1. Resultados del análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias	
3.1.1.4. Resultados del modelo de cuenca mediante HEC-GeoHMS	
3.1.2. Resultados del análisis hidráulico	
3.1.2.1. Resultados del análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS	
3.1.2.2. Resultados del análisis hidráulico bidimensional IBER 2D	
3.2. Resultados de la propuesta de renaturalización hidromorfológica de la red de drenaje	

3.2.1. Características del medio físico relevantes para el diseño de la reconstrucción geomorfológica	
3.2.1.1. Geología	
3.2.1.2. Geomorfología	
3.2.1.3. Hidrología	
3.2.2. Análogo natural y sistema geomorfológico de referencia	
3.2.2.1. Sistema empleado como referente	
3.2.2.2. Parámetros obtenidos para aplicar el modelo	
3.2.3. Diseño conceptual	
3.2.3.1 Esquema general	
3.2.3.2. Detalles de los canales (trazados y perfiles)	
3.2.3.3. Secciones transversales de los canales fluviales diseñados	
4- DISCUSIÓN.....	89
4.1. Discusión de los resultados del estudio hidrológico-hidráulico	
4.1.1. Discusión de los resultados del análisis hidrológico	
4.1.2. Discusión de los resultados del análisis hidráulico	
4.2. Discusión sobre la metodología y resultados de la propuesta de renaturalización	
5- CONCLUSIONES.....	93
5.1. Conclusiones sobre el análisis de la peligrosidad por inundaciones	
5.2. Conclusiones sobre la propuesta de renaturalización de la red de drenaje	
6- AGRADECIMIENTOS.....	94

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de una década, y sobre todo a partir de la aprobación y publicación de la denominada 'Directiva de Inundaciones' (2007/60/CE) y su transposición a la legislación española (R.D. 9/2008 y R.D. 903/2010), el enfoque de los análisis y la gestión de los riesgos por inundación ha sufrido una revolución. Los estudios de inundaciones han pasado de tener el foco exclusivamente puesto en los aspectos hidrológico-hidráulicos en relación con unos periodos de retorno de diseño, a incorporar otras fuentes de datos y metodologías, como las histórico-documentales y las geológico-geomorfológicas, que hacen hincapié en el río como un sistema natural dinámico. Por su parte, las medidas de mitigación han pasado de estar prácticamente restringidas a actuaciones de índole estructural (diques y motas, dragados, embalses de laminación etc.), a potenciar las medidas preventivas no estructurales ambientalmente sostenibles (ordenación territorial y urbanística, sistemas de seguros, educación en el riesgo, planificación de protección civil etc.).

Este mismo cambio en el planteamiento global se ha trasladado a los estudios locales de la peligrosidad y el riesgo de inundación, y en la propuesta de soluciones puntuales: de los estudios de inundabilidad asociada a periodos de retorno limitados a la modelación hidrológica e hidráulica de los cauces, se ha pasado a trabajos integrales de la corriente fluvial y su cuenca; y a soluciones novedosas e imaginativas para mitigar los riesgos asociados.

En esta línea de pensamiento, el estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones llevado a cabo para el Pla de Sant Jordi (Mallorca, Islas Baleares) ha tratado de emplear diferentes fuentes de información, no solo hidrológicas (aforos, precipitaciones...) e hidráulicas (topografía, rugosidad, condiciones de contorno), sino también histórico-documentales (manuscritos, impresos, fotografías, mapas, videgrabaciones, imágenes de satélite...) y geológico-geomorfológicas (formas, depósitos, marcas de paleoniveles etc.); y no se limita a la modelación hidrológica del proceso precipitación-aportación y la simulación hidráulica de la hidrodinámica, sino que tiene en cuenta aspectos de la evolución morfodinámica de los cauces y sus márgenes. Igualmente, las medidas de mitigación de las inundaciones propuestas no solo serán de índole estructural, como el bombeo artificial de aguas subterráneas en pozos y sondeos o la construcción de diques y motas; sino también la reconstrucción del drenaje natural con un diseño estable acorde a la configuración geomorfológica actual y basada en la vocación natural del territorio.

Todo ello teniendo en cuenta que el ciclo hidrológico es un sistema único y con sus subsistemas (aguas superficiales, aguas subterráneas, agua atmosférica) interconectados; a pesar de que, para facilitar los análisis de los almacenamientos temporales, procesos y flujos, sea preciso compartimentar el ciclo y centrar el análisis en una sola faceta, en nuestro caso, las aguas superficiales.

### 1.1. Las inundaciones en el Pla de Sant Jordi

Diversos sectores del Pla de Sant Jordi pueden considerarse desde el punto de vista científico-técnico y legal (según la Ley de Aguas y los RR.DD. 9/2008 y 903/2010) como zonas inundables, por su evolución geológica reciente (Cuaternario), su configuración geomorfológica actual, por las características meteorológicas y climáticas, y las actuaciones antrópicas en este territorio. Buena prueba de ello son los numerosos eventos de inundación que, sobre todo después de la década de 1970, se han producido con el anegamiento recurrente de algunos sectores, y que están recopilados y documentados en este informe.

### 1.1.2. Evolución geológica reciente

Durante el Cuaternario, la cuenca donde se sitúa el Pla de Sant Jordi sufrió varios movimientos tectónicos que la llevaron a tener su configuración geológica actual.

Del análisis de las series estratigráficas holocenas se deduce que la línea de costa no siempre estuvo en la posición actual, sino que un brazo de mar entraba hacia dentro de la bahía; hay incluso escritos históricos 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 las aguas subterráneas. En la zona existen bastantes formaciones acuíferas kársticas favorecidas por la naturaleza calcárea de las rocas, y el nivel freático subió hasta aflorar en superficie y formar el humedal (Roselló i Verger, 1959).

### 1.1.3 Configuración geomorfológica actual

Las unidades geomorfológicas que más destacan en el Pla son aquéllas que corresponden a materiales sedimentados recientemente (Cuaternario; figura 1).

Los torrentes son formas típicas de incisión-sedimentación en el paisaje insular. Se debe destacar que Mallorca no tiene una red hidrográfica perenne (no tiene apenas ríos que lleven agua permanentemente) debido fundamentalmente a dos factores: el tipo de litología predominantemente calcárea, que favorece la infiltración, mermando la circulación de escorrentía superficial; y la distribución irregular de sus precipitaciones por toda la isla. Los depósitos aluviales más recientes se asocian a flujos de aguas ligados a lluvias torrenciales, capaces de desbordar el cauce del torrente o riachuelo por donde circulan y dejar depósitos de mantos detríticos, compuestos por texturas que van de finos a gruesos (dependiendo de la intensidad de la corriente): arcillas, margas, limos, arenas, gravas, cantos rodados y bolos, bloques, etc.

Cuando estos depósitos se producen al pie de una ladera, dan formas características de los depósitos de vertiente, 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 del área fuente, y de tamaños texturales variables.

Otro elemento geomorfológico bastante típico del llano mallorquín 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 aluvial. Su composición es básicamente de arenas bien seleccionadas (Goy *et. al.*, 1997).

El resto de formaciones superficiales 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, las Salinas de Fontanelles, se sitúa cercana a la playa de El Arenal, entre los cordones de dunas.

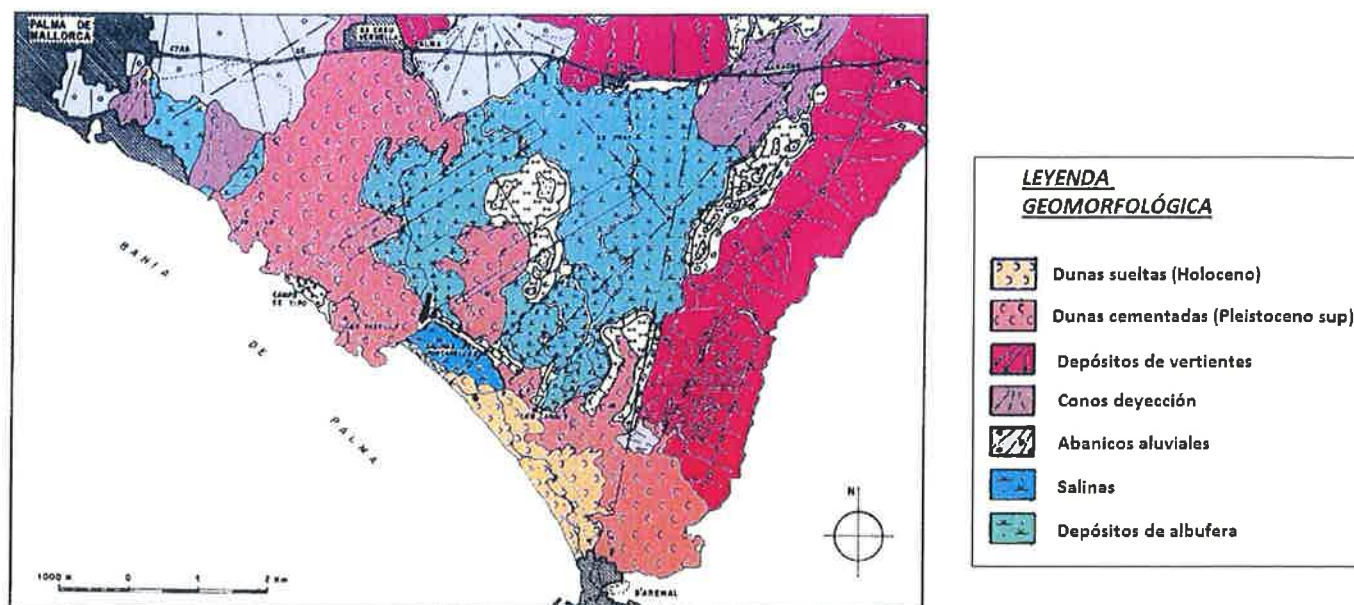


Figura 1. Mapa geomorfológico de la zona de Pla de Sant Jordi (Goy et. al., 1997).

#### 1.1.4.. Características climatológicas y de precipitación

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 se producen, 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 se sitúa la Sierra de Tramuntana, donde se pueden llegar a registrar valores de 1500 mm de precipitación. Los valores medios normales de precipitación para todo el territorio están entre los 450 mm y 650 mm 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 (como señala el Plan Director del Aeropuerto de Mallorca, BOE núm. 221 de 14 de Septiembre de 2001).

En la Figura 2 se muestran los valores medios de precipitación mensual para Palma en un periodo de 30 años (1980-2010); se aprecia un 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).

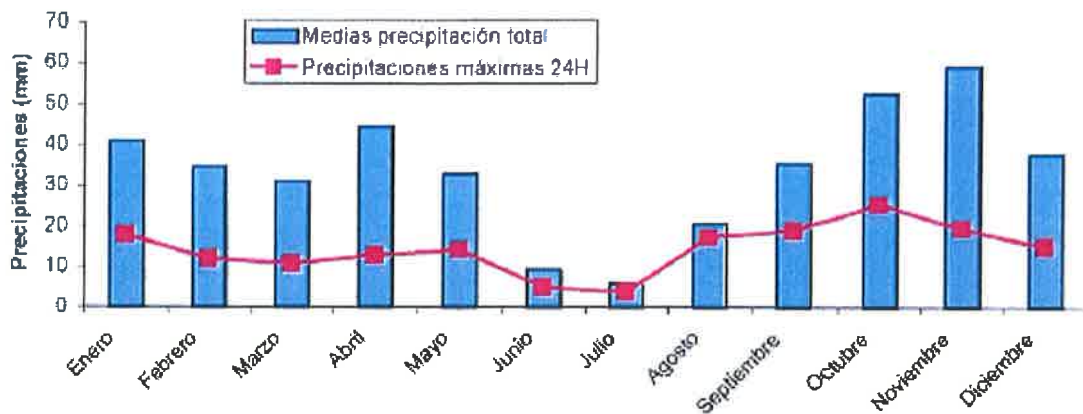


Figura 2. Gráfico representativo de los valores medios mensuales y máximos diarios de precipitación en Palma. (Plan Director del aeropuerto de Palma de Mallorca, 2001).

### 1.1.5. Actuaciones antrópicas recientes

Las actuaciones antrópicas recientes (últimos dos siglos, fundamentalmente) han condicionado y condicionan la inundabilidad del Pla. Según fue aumentando la población en la bahía de Palma, fueron aumentando los problemas sanitarios, ya que el humedal era fuente de insalubridad, sobre todo cuando se dieron los primeros casos de malaria y paludismo.

En 1814 se produjo una gran inundación que causó varias víctimas mortales y grandes pérdidas. Fue entonces cuando se formó la Comissió del Prat, que impulsó varias propuestas para desecar el Pla; o al menos construir acequias que canalizaran el agua y drenaran la zona. Algunas de esas propuestas se recogen en comunicados oficiales, como se puede observar en los extractos del comunicado que hizo la Comissió del Prat al Ayuntamiento (Rosello i Verger, 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»*.

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, propuso un método por el cual, mediante una serie de molinos de viento situados estratégicamente en zonas potencialmente inundables (figura 3), 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 humedal ubicado en Sant Jordi en su mayor parte y poder así, aprovechar esa zona fértil para el desarrollo de cultivos, cereales en su mayor parte.





Figura 3. Antiguos molinos de viento en el Pla, diseñados por el ingeniero Paul Bouvij.

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 las rediseño e incluyó muchas nuevas acequias, que permitieron una evacuación del agua más eficiente (figura 4). La acequia maestra era capaz de desaguar caudales de hasta  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

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, desaguaban bastante bien la zona. El proyecto parecía ser un éxito. Pero con el paso del tiempo, su eficacia fue disminuyendo debido principalmente al abandono y poco mantenimiento de las acequias (Rosselló i Verger, 1959). 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 éstas, ya que las atravesaban desmoronando 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 la capacidad de desagüe. Esa zona debía dragarse de arenas periódicamente; pero la mala ejecución del mantenimiento de las acequias impedía un funcionamiento satisfactorio de éstas, provocando algunas inundaciones en zonas cercanas a ese punto.

Poco a poco todas esas acequias fueron revestidas (antes muchas de ellas estaban 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.

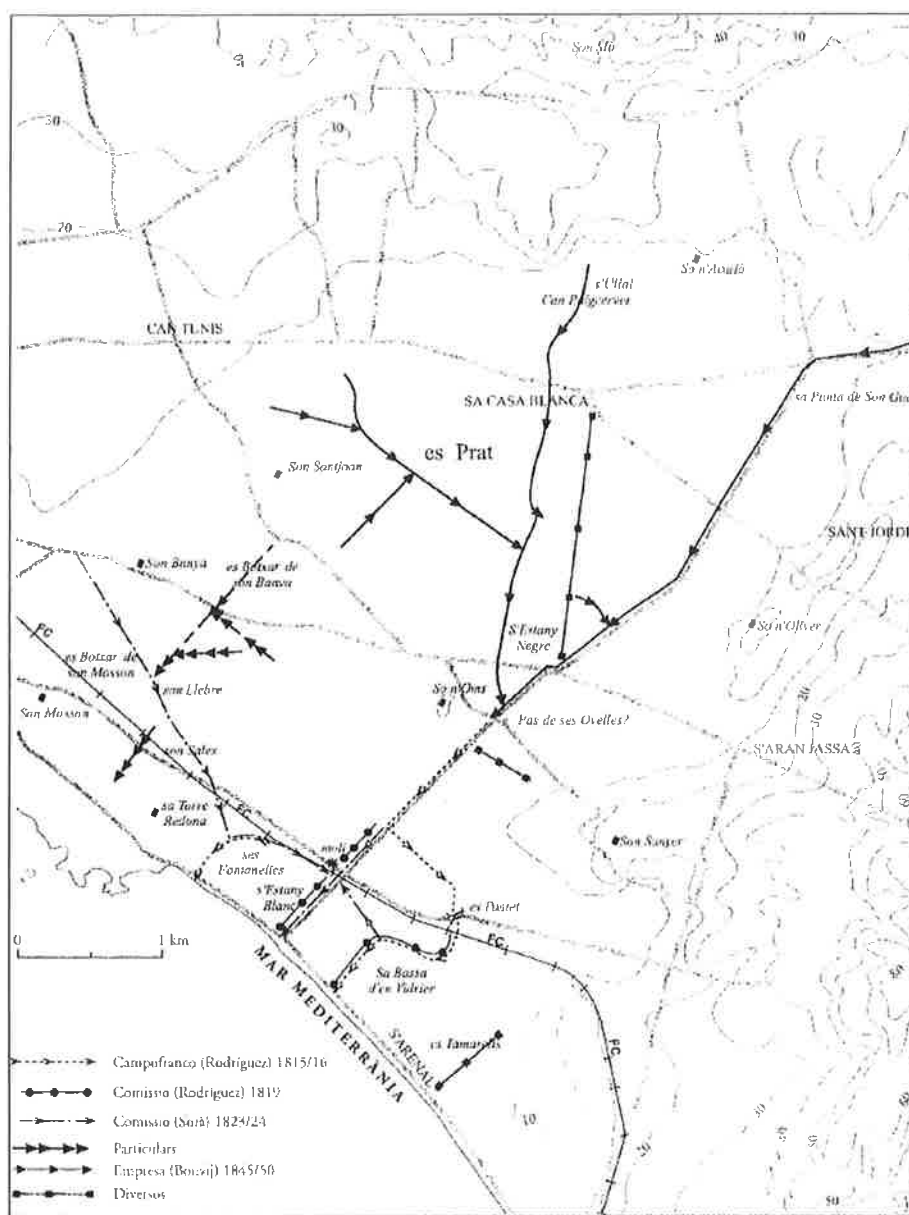


Figura 4. Fases de construcción de las acequias del Pla de Sant Jordi (Rosselló y Verguer, 1959).

Cuando la zona estuvo lo suficientemente seca como para poder cultivar, los molinos siguieron bombeando el agua ya que en ese momento era necesaria para regar esos nuevos campos de cultivos. Esta actividad local de regadío permitió el control del nivel freático del acuífero, lo que a su vez permitió 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, ya que debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos del acuífero se produjo 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 Municipal de Aguas y Alcantarillado de Palma (EMAYA) empezaron a suministrar las aguas residuales depuradas a los agricultores del Pla, quienes las pasan a utilizar para regadío de sus cultivos. Las plantas de tratamiento de aguas

residuales EDAR-Palma I y EDAR-Palma II son capaces de depurar entre 80.000-90.000 m<sup>3</sup>/día. Las aguas que usan los agricultores se almacenan en una gran balsa situada en la zona NO del Pla (figura 5).



Figura 5. Imágenes de la central depuradora EDAR – Palma I y II, afectadas por inundaciones. Se aprecia la balsa donde se almacenan las aguas que usan los agricultores para regar sus cultivos.

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 un aumento en la frecuencia y severidad de las zonas inundables en el Pla.

## **1.2. Problemática socioeconómica asociada a las inundaciones en el Pla de Sant Jordi**

Los problemas socioeconómicos asociados al fenómeno de las inundaciones en el Pla de San Jordi se pueden agrupar en cuatro ámbitos:

### **1.2.1. Problemática por anegamiento de campos agrícolas**

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 (figura 6). El anegamiento periódico de los campos agrícolas (principalmente cultivos forrajeros) supone, no solo la pérdida de la cosecha del año en el que ocurre, sino también la inhabilitación de esos terrenos para ser cultivados durante los dos o tres siguientes años (según declaraciones de los agricultores), por quedar el suelo colmatado por limos y arcillas en condiciones anóxicas. El anegamiento de sus campos de cultivo, una y otra vez, hace casi imposible la práctica de la agricultura de forma rentable y el sector reclama indemnizaciones y soluciones al Gobierno Insular continuamente. El problema viene de antiguo, ya que, como se ha comentado, en el siglo XIX toda esta zona fue desecada y ganada al mar para aumentar la superficie de cultivos de la isla; su potencial agrícola fue tal, que llegó a conocerse como “la despensa de Palma”.



Figura 6. Campos de cultivos del Pla inundados.

### **1.2.2. Problemática de salubridad pública**

No solo la pérdida de cultivos preocupa a la población del Pla, ya que de las inundaciones derivan en cuestiones de salubridad que afectan directamente a la vida cotidiana de los vecinos y turistas. Cada primavera, se producen importantes plagas por la proliferación de mosquitos debido a las aguas estancadas y cada año están siendo más acentuadas; agravadas por la aparición de especies exóticas, como el mosquito tigre. Este problema es ancestral en 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.

Las molestias se han agravado con la proliferación de instalaciones turísticas, en las que los visitantes y clientes se ven afectados por las plagas de insectos y reclaman actuaciones que, de no ser atendidas y solventadas, pueden redundar en la reducción de la demanda como destino turístico de sectores consolidados como El Arenal.

Son frecuentes las protestas, denuncias y concentraciones por parte de las asociaciones de vecinos (Figura 7) exigiendo al Ayuntamiento y al Gobierno Insular soluciones definitivas a este problema de salud pública que pone en peligro no solo a la población (residentes y turistas), 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 7. 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).

### 1.2.3. Problemática por inundación de áreas construidas

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 del siglo XX). 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 (figura 8). La consecuencia directa de esto fue que se cambiaron los drenajes naturales del territorio, se impermeabilizaron suelos (al ser asfaltados o construidos) y por lo tanto el terreno ya no tenía la misma capacidad de infiltración, aumentando así la escorrentía superficial.

A su vez, los drenajes múltiples del Pla se redujeron a muy pocas salidas al mar (figura 9), que concentran la escorrentía y los problemas de desbordamiento y anegamiento de las márgenes urbanizadas.



Figura 8. Fotos de la zona de Can Pastilla, el antes y el después del *boom* turístico de mediados del siglo XX, que urbanizó y modificó el sistema de drenaje del cordón de dunas que cerraba el Pla.



Figura 9. Desagüe de las acequias, en su desembocadura, bajo el paseo marítimo, en la zona urbanizada de El Arenal.

#### 1.2.4. Problemática por afección a infraestructuras de transporte

Las infraestructuras lineales que cruzan el Pla (autovías, carreteras, caminos, líneas de transporte de energía y redes de comunicaciones) y el aeropuerto de Son San Joan son elementos afectados por las inundaciones que preocupan especialmente a sus gestores (Govern Balear, AENA, empresas privadas, agricultores y otros actores ubicados en el Pla)

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 el mismo trazado 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 dichos drenajes 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 10. Tramos de la Autovía del Levante Ma-19 anegados por el agua.

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 (figura 11). Estas zonas de aguas estancadas son un problema para la navegación aérea, ya que los pilotos se quejan de los reflejos de las balizas de iluminación nocturna en el agua estancada, que dificultan las maniobras de aterrizaje; y del aumento de aves en la zona, atraídas por los mosquitos que proliferan gracias al agua acumulada, que pueden suponer un problema de seguridad aérea por las posibles colisiones con las aeronaves.



Figura 11. Imágenes de zonas inundadas cercanas a las pistas del aeropuerto de Son San Joan.

### 1.3. Antecedentes en el estudio y mitigación de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi

La zona del Pla de Sant Jordi antes de que se desecara artificialmente en el siglo XIX, estaba considerada como una zona “pantanososa”; cada vez que se producían lluvias intensas, provocaban problemas a los habitantes de los municipios y casas cercanas, pues en estas zonas se estancaba el agua y traía consigo concentraciones de insectos y enfermedades como paludismo y malaria (Roselló i Verger, 1959)

Por ello, ya en 1770, se tiene constancia en archivos del intento de impulsar un proyecto de desecación del Pla con el objetivo de sembrar trigo en toda la zona inundada permanentemente. La iniciativa del proyecto fue tomada por un grupo de propietarios y el Ayuntamiento. Pero este proyecto no se llevó a cabo, hasta que alrededor de 1814 se produjo una gran inundación con varias víctimas. Con el objetivo de minimizar el daño que las inundaciones tenían para la vida de las personas y sus bienes, años más tarde (entre los años 1845 y 1849; ver apartado 1.1.3) se realizaron una red de acequias y una batería de sondeos para controlar el nivel freático y que no se produjeran grandes inundaciones (Bestard Cladera, 2014).

Roselló i Verger realizó en 1959 un estudio del Prat de Sant Jordi y su desecación, publicado en Boletín de la Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Palma de Mallorca. En este estudio se aborda la situación del Pla de Sant Jordi antes y después de su desecación.

También, se han realizado diversos estudios por el antiguo Ministerio de Obras Públicas: en 1968 el Estudio Hidrogeológico del Llano de Palma y en 1972 un Informe Hidrogeológico del Llano de Palma. Estos dos estudios abordan la interpretación de sondeos de investigación geológica e hidrogeológica de detalle sobre la cuenca del Pla de Sant Jordi.

Finalmente, la Conselleria de Medi Ambient, la Agència Balear de l’Aigua i de la Qualitat Ambiental, realizó un estudio hidrológico de la cuenca del Pla de Sant Jordi, llevado a cabo por EMAYA (Empresa Municipal d’Aigües i Clavegueram) en 2012. Salió a contratación y la empresa HQA (Hidrologia i Qualitat de L’Aigua SL) fue la encargada de realizar dicho estudio, centrándose el trabajo en la modelización hidráulica superficial en dos dimensiones y el modelo piezométrico de las aguas subterráneas.



Posteriormente a este estudio, EMAYA firmó un convenio con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para investigar y abordar los problemas de inundaciones que se dan en la cuenca, con el fin de realizar unas medidas correctoras para minimizar las consecuencias de las inundaciones (proyecto Poseidón, del que forma parte este estudio).

Otros antecedentes técnicos de estudios hidrológicos e hidrogeológicos del Pla de San Jordi y sus inmediaciones son:

- Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio. Servicio Hidráulico. 1987. Hidrogeología de la Isla de Mallorca.
- 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.
- 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).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Planteamiento metodológico general en el marco del proyecto Poseidón

El proyecto científico-técnico Poseidón, financiado a través del convenio entre EMAYA y el IGME, tiene un complejo esquema metodológico (figura 12) que contempla tareas y acciones en áreas interdisciplinarias para la búsqueda de soluciones al problema de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi. Dentro de ellas, este estudio emplea metodologías para el análisis de la peligrosidad por inundaciones generadas por escorrentía superficial; y para la propuesta de renaturalización del drenaje.

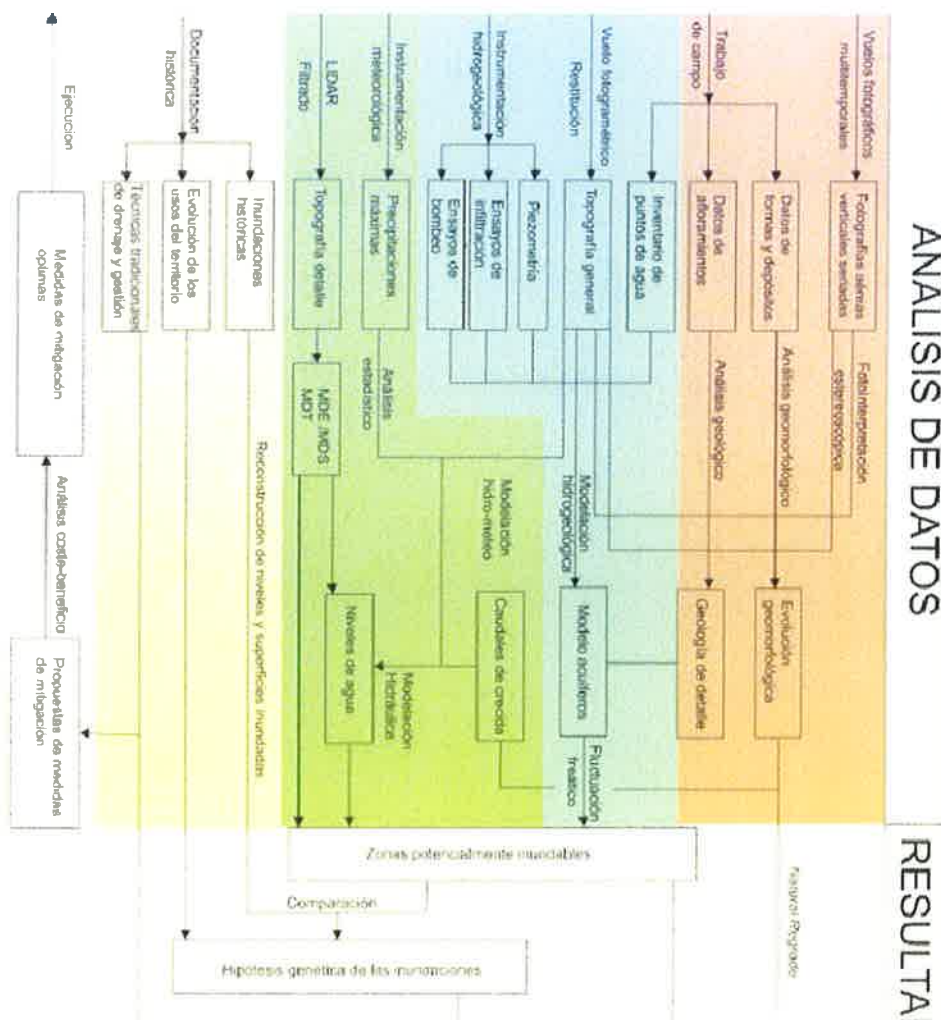


Figura 12. Diagrama de flujo general del proyecto Poseidón, desde las fuentes de datos a los resultados, pasando por el análisis de datos, en el que aparecen coloreados los procedimientos comprendidos en la tarea de análisis de la peligrosidad (fondo verde) y propuesta de renaturalización del drenaje (salmón). Tomado de Robledo *et al.* (2014).

## 2.2. Metodología de análisis de la peligrosidad por inundaciones

El estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones asociadas puede abordarse desde muy diferentes planteamientos metodológicos, que abarcan desde los métodos directos de análisis de eventos pretéritos, hasta los métodos indirectos de estimación de eventos futuros (inundaciones de diseño). Además, dentro de estos planteamientos, se pueden emplear muy diferentes fuentes de datos y técnicas de análisis, que comprenden desde aspectos hidrológicos e hidráulicos, hasta aspectos paleohidrológicos e histórico-documentales (Figura 13).

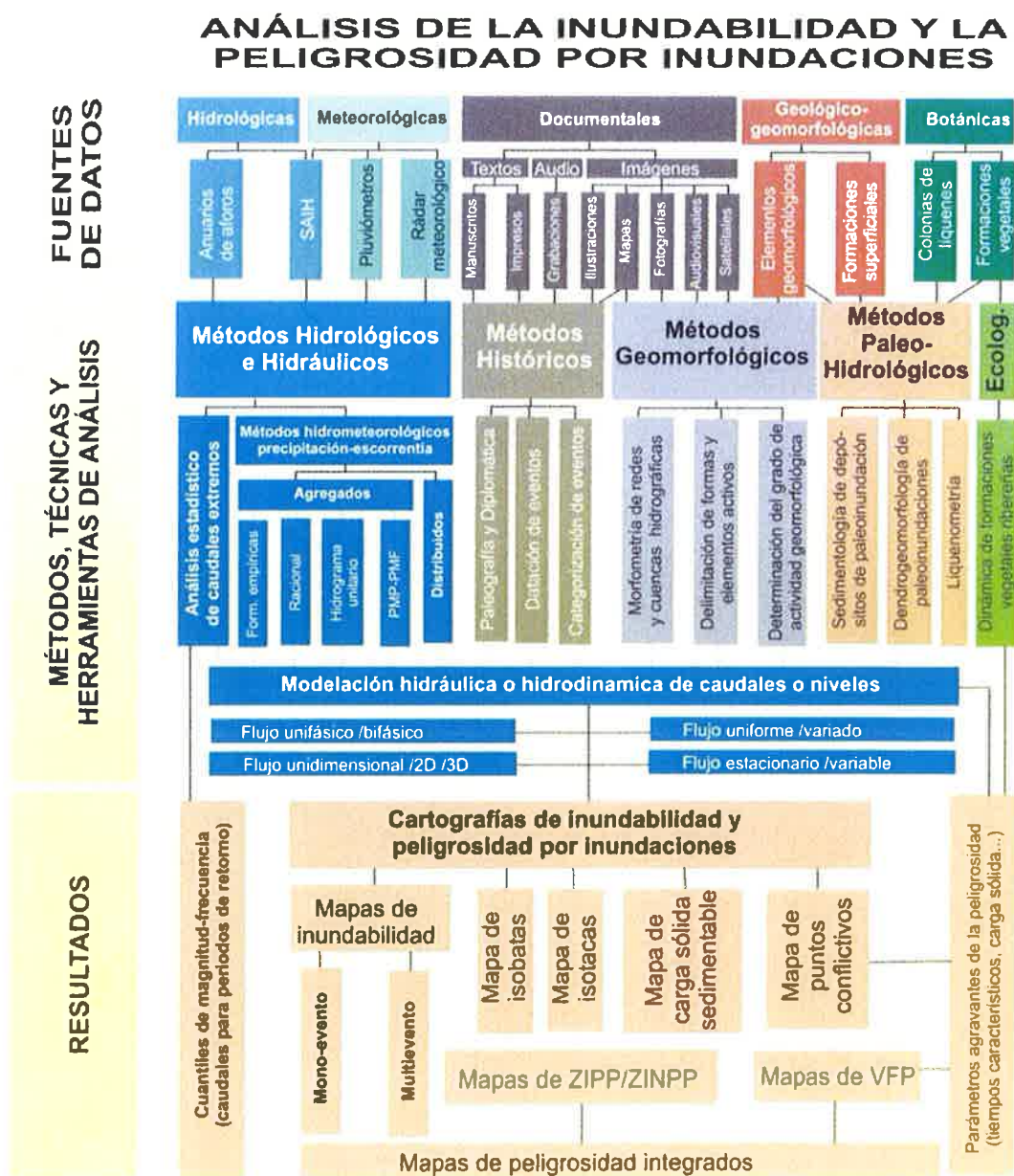


Figura 13. Cuadro sintético de las diferentes fuentes de datos y métodos a emplear para la elaboración de estudios de la peligrosidad por inundaciones, y cartografías que se generan como resultado final (Díez-Herrero y García, *in press*; modificado de Díez-Herrero et al., 2008).

Para el presente estudio de la peligrosidad por inundaciones en el Pla de Sant Jordi se han combinado e integrado buena parte de ellos, si bien con mayor énfasis en los métodos hidrológico-

hidráulicos, geomorfológicos e histórico-documentales, ya que el alto grado de antropización y la ausencia de vegetación arbórea idónea impidieron el uso de métodos paleohidrológicos.

### 2.2.1. Metodologías de análisis hidrológico

Ante la ausencia de estaciones de aforo en las corrientes fluviales de la zona de estudio y, por tanto, de datos de caudales útiles para el análisis estadístico de datos de flujos máximos, se ha recurrido a los denominados métodos hidrometeorológicos, o métodos hidrológicos de transformación de precipitación en escorrentía (lluvia a caudales). Su función es convertir las variables hidrometeorológicas en escorrentía superficial; en este caso, se convierten valores de precipitaciones máximas en forma de lluvia, en caudales. Como para los parámetros hidrológicos esenciales se puede considerar la cuenca de estudio como una zona homogénea (con respuesta hidrológica homogénea) y la disponibilidad de información territorial detallada (parámetros hidrológicos y texturales de los suelos) es muy limitada, se empleó una aproximación agregada (no totalmente distribuida) pero con carácter semiagregado en subcuencas; y se usaron las formulaciones del método del hidrograma unitario (Sherman, 1932; en Díez-Herrero *et al.*, 2008). Para ello, se comenzó por el análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias, su distribución temporal intradiaria (hietogramas), la definición del modelo de cuenca y la estimación de las abstracciones iniciales (número de curva).

#### 2.2.1.1. Análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias

Una vez delimitada la cuenca de estudio con el trazado de la divisoria hidrográfica de aguas, se localizaron las estaciones meteorológicas (completas, termo-pluviométricas y pluviométricas) que se encuentran dentro de la misma o en sus proximidades, resultando representativas de la precipitación que se produce en la cuenca; y se realizó un análisis estadístico de los datos pluviométricos disponibles, centrado en los valores máximos o extremos. Se han elegido un total de nueve estaciones meteorológicas que se encuentran espacialmente bien distribuidas por toda la cuenca, cubriendo así la mayor parte del área de ésta (tabla 1).

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

Tabla 1. Datos básicos de las estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio y sus proximidades, con denominación, código, situación geográfica (coordenadas  $X_{UTM}$ ,  $Y_{UTM}$ , y longitud de la serie de registro disponible de precipitación). Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

El objetivo fue hacer, no solo un estudio pluviométrico para analizar la cantidad de precipitación total diaria para diferentes frecuencias o probabilidades de ocurrencia, sino también analizar cómo es su distribución temporal y su valor areal sobre la cuenca de estudio. Se optó por seguir el modelo estadístico con métodos paramétricos, el cual usa series anuales donde sólo se considera el mayor valor de precipitación de cada uno de los años. Dicho modelo estadístico se definió por la combinación de tres elementos (Cunnane, 1987):

- Función de distribución de frecuencia de valores extremos.
- Método de estimación de parámetros y cuantiles de la función de distribución.
- Esquema de uso combinado de datos locales y regionales.

Para realizar este análisis se optó por usar la aplicación informática CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas), desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX con fines específicos aplicados a hidrología de superficie. Se pretendía ceñir esas series temporales de precipitaciones (en este caso, 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 CHAC 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 (situación de la 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 para el análisis numérico, ya que corresponde al valor anual, que será diferente en función del tipo de variable que se esté considerando (figura 14).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda															
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	105.4	280.4	43.4	358.0	121.0	104.9	68.0	73.2	59.0		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	463.2	227.3	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	142.9	135.1	72.7	116.6	41.5	113.3	44.0		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	287.2	69.8	-100.0	-100.0	193.8	213.8	346.6	5.0	68.8	126.4	53.4	153.1	42.5		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	435.6	241.2	392.0	-100.0	89.4	263.5	216.2	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	34.0	
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	145.9	77.5	257.7	61.3	12.6	67.6	261.8	38.2		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	121.7	259.0	188.5	180.2	72.3	259.4	112.6	333.2	71.3	42.5	120.0	4.5	43.0		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	66.9	147.0	111.4	497.8	160.1	212.1	372.3	62.8	84.5	49.1	82.6	172.7	52.2		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	120.7	212.7	311.2	183.4	252.8	150.9	122.4	83.6	141.2	80.1	60.0	33.6	60.5		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	216.2	331.6	61.4	436.4	226.8	241.7	171.5	95.8	160.0	94.6	62.0	20.8	29.8		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	42.1	36.5	137.3	53.5	260.3	101.2	362.0	43.3	42.6	79.4	59.7	108.4	42.3		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	52.8	181.0	32.6	132.9	129.1	56.9	423.3	119.0	98.8	60.1	50.0	155.6	66.8		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	185.3	284.3	298.4	89.1	96.2	186.7	292.2	247.0	69.3	86.8	62.9	251.8	68.2		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	117.9	356.0	55.3	88.7	46.2	239.5	243.5	115.0	202.1	152.2	165.2	173.9	45.2		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	492.8	197.6	252.9	18.2	62.6	64.7	232.7	97.5	107.2	154.0	102.5	237.5	37.8		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	183.4	91.8	344.8	190.3	285.9	95.4	447.4	124.7	146.6	33.6	53.7	246.3	53.2		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	178.3	100.3	249.7	300.1	183.1	261.9	86.4	125.9	19.4	73.6	79.0	179.0	52.4		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	22.0	81.0	207.1	114.6	316.9	104.0	89.1	112.4	69.9	126.4	142.3	132.3	24.0		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	152.2	462.2	196.0	212.3	55.1	43.7	86.8	159.1	218.6	196.2	219.5	61.3	30.8		
606695	4792990	01010-U	PMT	1971-72	109.9	326.9	230.5	92.3	56.4	121.9	256.4	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	38.7		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	19.3	56.6	55.5	-100.0	-100.0	52.2	213.6	8.6	42.7	11.2	41.3	69.5	55.9		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	9.9	73.9	164.5	111.8	177.4	67.6	16.7	12.1	65.9	41.5	8.6	10.6	43.5		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	23.2	57.8	2.9	227.3	179.7	21.4	36.2	34.4	36.7	41.3	8.7	20.8	34.6		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	5.1	3.1	24.5	9.2	101.6	22.7	222.9	16.0	11.1	51.6	25.8	22.4	45.8		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	4.7	96.2	2.3	89.6	88.5	6.6	364.0	21.8	20.3	8.4	18.9	52.9	55.7		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	42.2	104.6	120.5	29.7	15.9	113.0	168.8	218.2	25.8	-100.0	24.0	126.5	38.7		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	58.5	401.2	8.6	30.0	8.0	157.1	195.5	79.2	167.8	128.4	146.0	154.0	25.2		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	460.0	167.0	236.0	13.0	71.8	40.5	202.5	85.5	95.5	130.5	77.0	192.5	33.7		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	148.5	75.5	323.0	166.5	262.0	63.8	429.5	110.0	130.0	26.0	47.5	215.5	29.2		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	-100.0	113.0	226.0	278.5	173.0	187.5	63.0	108.5	17.5	65.0	54.5	147.5	43.8		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	7.0	64.5	179.0	112.0	274.5	99.5	64.5	111.0	70.0	119.5	143.5	98.0	55.6		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	147.5	456.0	185.5	183.0	40.0	51.5	87.0	157.5	214.5	175.0	230.0	73.0	47.4		
606445	4793200	01010-V	PMT	1971-72	60.0	351.0	231.0	97.0	56.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	36.3		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	-100.0	-100.0	-100.0	120.3	101.6	298.6	39.7	287.2	124.2	85.1	63.0	69.9	38.4		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	447.1	239.6	372.0	-100.0	195.1	85.4	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	35.2		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	3.1	58.0	94.9	41.6	-100.0	-100.0	88.0		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	282.4	164.8	87.1	298.3	69.7	10.1	79.4	240.3	49.5		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	134.1	256.1	165.7	163.7	79.7	254.6	82.4	271.1	61.8	54.2	102.7	6.3	68.7		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	57.4	131.8	100.2	441.3	123.8	167.0	-100.0	53.7	75.6	43.6	56.8	117.5	39.4		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	101.4	177.9	276.7	151.1	235.3	139.1	123.0	72.9	120.7	50.4	76.7	29.7	106.7		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	183.9	299.9	51.3	380.6	166.2	230.5	163.5	96.2	140.9	78.6	63.7	95.8	33.7		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	29.1	30.7	131.8	49.8	183.6	88.7	336.5	53.0	37.5	92.4	62.7	90.3	56.3		
605205	4788955	01011-I	PMT	1971-72	32.8	142.0	11.4	98.9	70.4	55.6	351.2	130.5	83.2	75.1	52.1	101.7	21.0		

Figura 14. Ejemplo de fichero LEMA con los datos de precipitaciones máximas diarias de la estación de Son San Joan; el valor -100.0 indica la falta de dato en el registro de la serie.

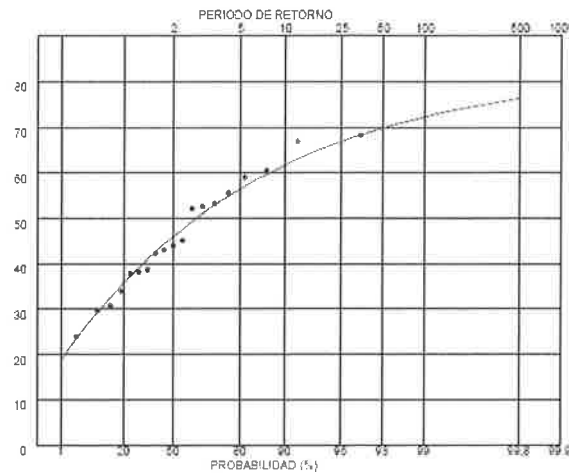
Como resultado del cálculo, CHAC reporta una serie de gráficos binarios (precipitación vs. probabilidad/periodo de retorno) con los puntos muestrales y el ajuste gráfico de la función de distribución, donde se puede observar qué función de distribución se ajusta mejor los datos de las series analizadas. También genera una serie de resultados numéricos, como la probabilidad muestral y los cuantiles para diferentes periodos de retorno. Ambos tipos de resultados (gráficos y numéricos; figura 15) utilizan las combinaciones posibles que se dan entre cada función de distribución de frecuencias (GEV, LP3, TCEV, Gumbel y SQRT) y sus métodos de

estimación/ajuste de parámetros (PWM, MOM y ML), siempre con el empleo únicamente de datos locales.

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	24.	.0293	41.83	12.03	.291
44.	2	30.	.0816			
56.	3	31.	.1339			
34.	4	34.	.1862			
38.	5	38.	.2385			
43.	6	38.	.2908			
52.	7	39.	.3431			
61.	8	42.	.3954			
30.	9	43.	.4477			
42.	10	44.	.5000			
67.	11	45.	.5523			
68.	12	52.	.6046			
45.	13	53.	.6569			
38.	14	53.	.7092			
53.	15	56.	.7615			
53.	16	59.	.8138			
24.	17	61.	.8661			
31.	18	67.	.9184			
39.	19	68.	.9707			

PERIODO DE 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 15: Ejemplo de las salidas de resultados gráficos y numéricos que genera CHAC para los datos de precipitación diaria de la estación meteorológica de Son San Joan (aeropuerto de Palma de Mallorca); en este caso, la combinación de función de distribución de frecuencias y método de estimación de parámetros es la GEV + ML.

Una vez que se calcularon los diferentes resultados para cada modelo estadístico (función de distribución+método de estimación de parámetros), se pasó a comprobar cuál de los modelos produce mejor ajuste mediante un test de bondad del ajuste. Hay varios tipos de test de bondad aplicables a este tipo de datos, de los que 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 de estudio.

- 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 pudo utilizar en el trabajo.
- Test de errores cuadráticos mínimos: calcula para cada función su error cuadrático, y selecciona la de menor error.

Para este estudio se ha seleccionado este último método, el test de errores cuadráticos mínimos (Martínez y Navarro, 1991). Se calculó el error cuadrático de cada función de distribución ajustada por CHAC, para lo que se utilizó una hoja de cálculo con MS Excel (Figura 16), que contiene las fórmulas matemáticas de las funciones de distribución programadas (las mismas que usa CHAC); de forma que el resultado que menor cifra de error tenga entre los datos muestrales y la función estimada, se seleccionará como el mejor ajuste del test de bondad.

X0	ALFA	BETA				
41.83	12.03	0.291				
GEV ML					Probabilidad	xi
-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 16. Ejemplo de extracto de la hoja de cálculo sobre MS Excel programada con el test de bondad de ajuste por errores cuadráticos mínimos, para la función GEV+ML y datos de la estación meteorológica de Son San Juan.

### 2.2.1.2 Análisis de los hietogramas de precipitaciones máximas diarias

El análisis de la distribución temporal de las precipitaciones máximas diarias requiere definir una distribución de las intensidades intradiaria, o sea, unos hietogramas de discriminación horaria característicos para los eventos susceptibles de causar inundaciones.

La situación geográfica de la cuenca de estudio es muy importante, ya que define el clima predominante en ésta y, por lo tanto, cómo será su régimen de precipitaciones. En nuestro caso de estudio, las Islas Baleares (y más concretamente la isla de Mallorca), se sitúan en el Mediterráneo occidental, cerca de 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). 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 lo más detallado posible.

Se solicitaron a la AEMET los 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; Tabla 2), ya que eran los únicos que tenían datos completos hora a hora (las 24 h del día) y que además encajaban cuantitativamente con la serie anual de precipitaciones máximas diarias analizada estadísticamente en sus valores máximos.

Tabla 02. Cuadro resumen de los cuatro eventos excepcionales estudiados: fecha, precipitación diaria y precipitación horaria media.

<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

Se ha analizado la duración y distribución horaria de cada evento. Para realizar los cálculos y obtener el hietograma en forma de gráfico de barras donde se refleje la distribución de la intensidad de las precipitaciones en mm/h durante un periodo de tiempo determinado (horas o días), se ha elaborado una hoja de cálculo en MS Excel con las fórmulas requeridas. Se generaron cuatro tablas con los datos de cada evento, en las cuales (Figura 17):

- La primera columna enumera las 24 horas del día (PH1, PH2, PH3, etc.).
- Además del día de máxima precipitación a analizar, 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 registrados en la misma).



		Año			
		1991			
Mes	Día				
Enero	24	25			26
		dcm	mm	%	
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
			27.4	100	

Figura 17. Ejemplo de tabla generada para la estimación de la intensidad de precipitación de un evento analizado y su distribución temporal.

### 2.2.1.3. Modelo de cuenca

El paquete informático seleccionado para llevar a cabo el modelo hidrometeorológico fue HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del USACE, EE.UU.) 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 disponible, para lo que se puede utilizar la extensión HEC-GeoHMS en conjunto con el sistema gestor de sistemas de información geográfica ArcGIS (ESRI Geosystems).

#### 2.2.1.3.1. Delimitación de sub-cuencas mediante la extensión HEC-GeoHMS

La simulación del proceso de transformación de lluvia en escorrentía en un modelo hidrológico requiere la delimitación previa de las subcuencas (trazando las divisorias entre ellas) y de red de drenaje. Tradicionalmente esta tarea se ha realizado de forma manual a partir de la información proporcionada por los mapas topográficos, con limitaciones en la precisión y subjetividad del proceso. Pero el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido automatizar y objetivizar este proceso. Estos sistemas utilizan como información de entrada modelos digitales del terreno (MDT, que almacenan la información en formato matricial o ráster) en los que los parámetros morfométricos 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 obtenido 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, que en este estudio simplemente van a ser los puntos donde la red de drenaje cambia de subcuenca y el punto de desagüe final (figura 18). Estos puntos de control tienen una gran utilidad si se trabaja en áreas grandes ya que permiten comprobar los parámetros de cada subcuenca y modificarlos para la calibración y validación, si es preciso.

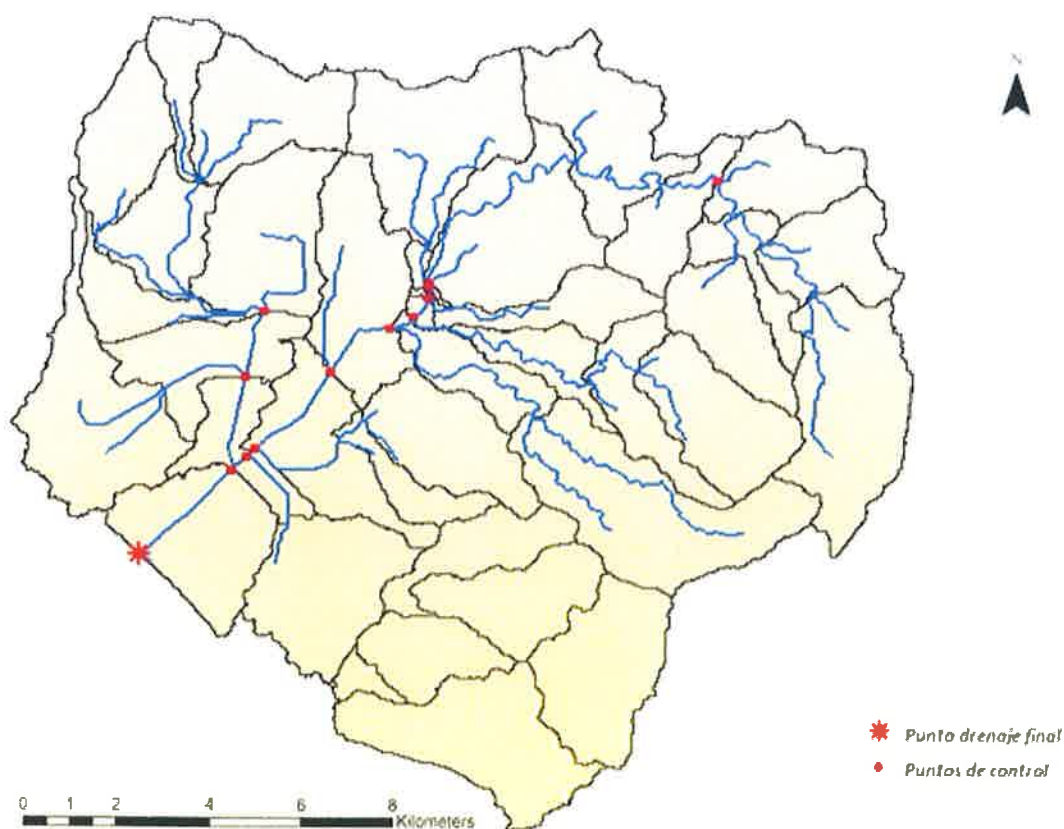


Figura 18. Modelo de cuenca, red de drenaje y puntos de control, obtenidos mediante las funciones "*Terrain Preprocessing*" y "*Watershed preprocessing*" de HEC-GeoHMS.

#### 2.2.1.3.2. Asignación del parámetro número de curva (NC) a cada sub-cuenca

Una vez se tienen las subcuencas definidas, se debe atribuir a cada una de ellas su número de curva (NC) correspondiente, como parámetro indicador de las abstracciones iniciales en la generación de la escorrentía. Este parámetro se calculó siguiendo la metodología del *Soil Conservation Service* de la USDA (EE.UU.), para lo que se generaron tres capas de información: pendientes, texturas del suelo y usos del suelo.

El software usado para ello fue 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 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50 del IGN. 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 utilizó un MDT (2x2) del suroeste de la isla de Mallorca que se recortó con una máscara booleana para que se ajustase a la parte correspondiente de la cuenca hidrográfica drenante al Pla de Sant Jordi. Con este proceso se eliminaron datos innecesarios que demoran bastante el tiempo de cálculo de los procesos en ArcGIS. Una vez acotada el área de estudio en el MDT, se elaboró automáticamente el mapa de pendientes (Figura 19) mediante el uso del módulo de análisis espacial y las herramientas disponibles en ArcGIS (*ArcToolbox* > *Slope*).

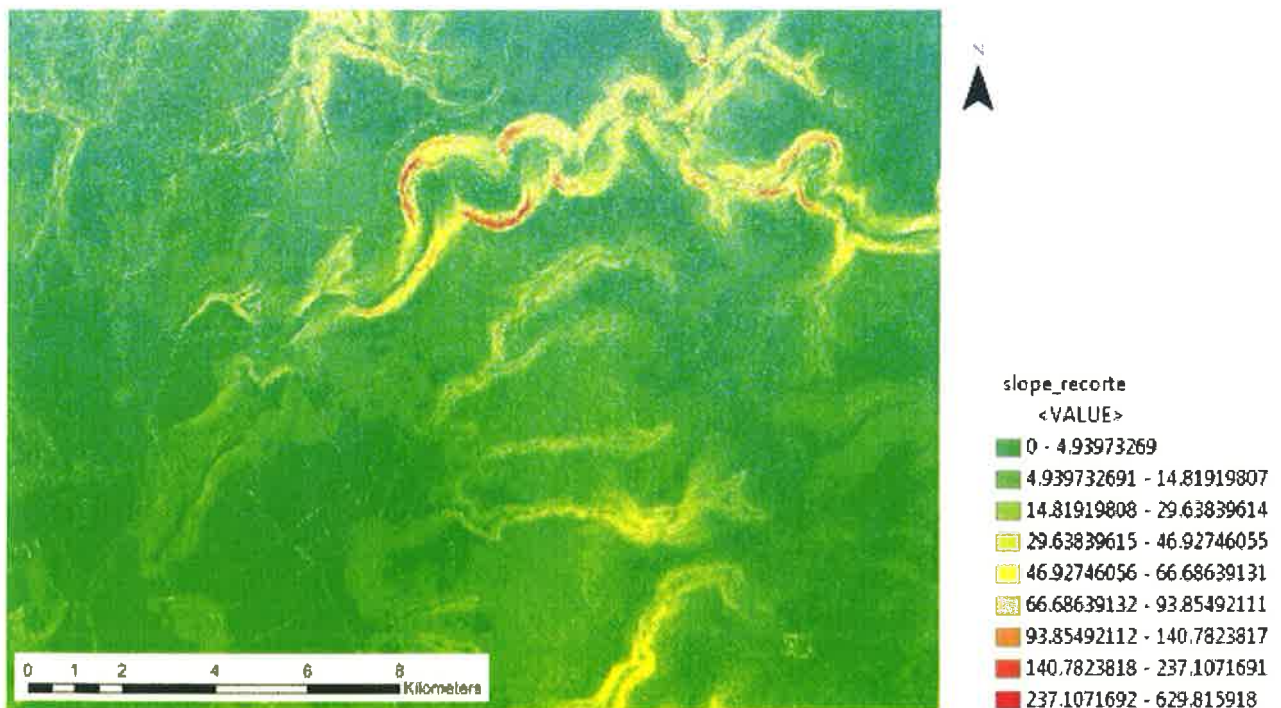


Figura 19. Detalle de la capa de pendientes (en porcentaje) de la zona Pla de Sant Jordi (zona noreste).

La figura 19 muestra la zona noreste de la cuenca del Pla de Sant Jordi, donde se aprecian algunos fondos de valle encajados de los torrentes que drenan al Pla. Se puede apreciar que, quitando esos torrentes y sus márgenes verticalizadas, la zona es prácticamente llana, con pendientes menores del 15 %.

El siguiente paso metodológico fue reclasificar esa capa de pendientes obtenida, en valores de  $<3\%$  y  $\geq 3\%$ , que son los dos intervalos del método del SCS, tal y como también recoge la “*Instrucción de carreteras 5.2-IC. Drenaje superficial*”, aprobada en Orden de 14 de Mayo de 1990 (BOE 123, de 23 de mayo de 1990).

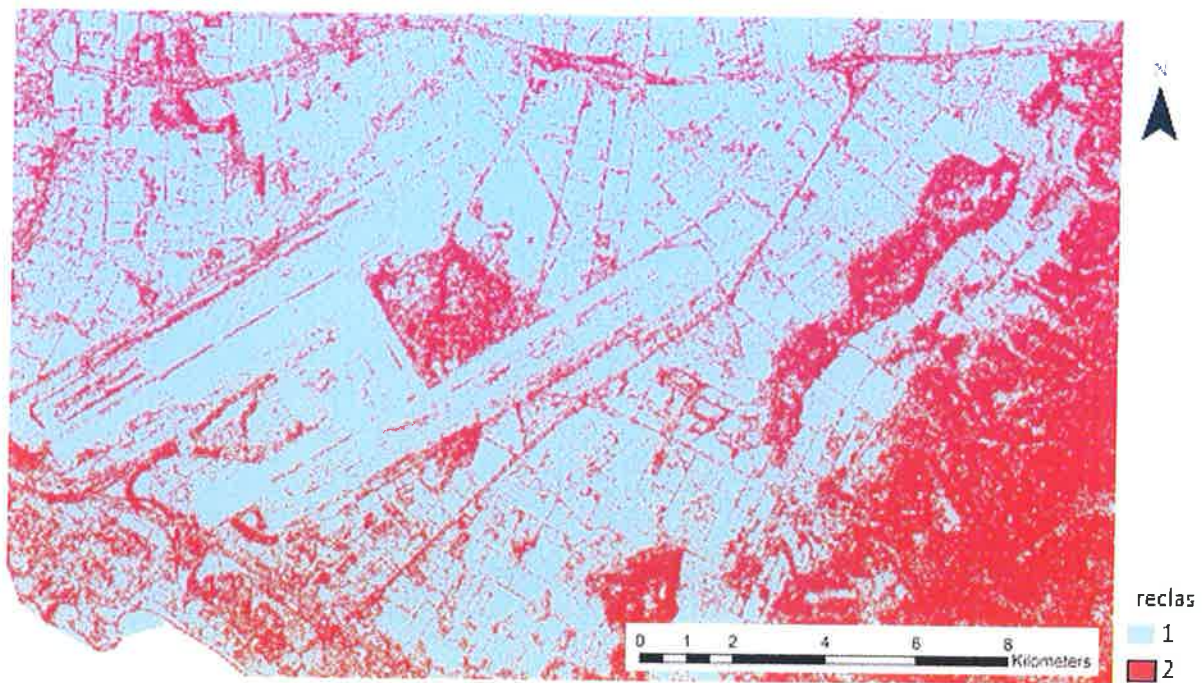


Figura 20. Detalle de la capa ráster de “pendientes” reclasificada en valores 1 y 2 (<3% y >=3%, respectivamente) de la zona del aeropuerto (suroeste).

La figura 20 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). Al este de las pistas se encuentra la zona de cultivos que más se ve afectada cuando se producen inundaciones, clasificada como 1 (con color azul claro, correspondiente a pendientes <3%). Las zonas en color naranja (2) del Este, indican zonas con pendientes >=3%, son los bordes de la cuenca donde se dan los materiales más duros y resistentes (rocas carbonáticas y detríticas) 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 cartografiaron 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 fueron 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 formas principales, recogidas en la tabla 3.

Formas geomorfológicas	Localización y descripción.
<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 glacia; 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 glacia 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.

Tabla 3. Relación de las principales formas geomorfológicas, su localización y descripción.

Una vez identificadas los elementos geomorfológicos y formaciones superficiales se creó en ArcGIS un nuevo *shapefile* de polígonos (figura 21), y se editó: se fueron digitalizando las formas sobre la ortofotografía, se las nombró y se las asignó una trama de color para poder diferenciarlas bien.

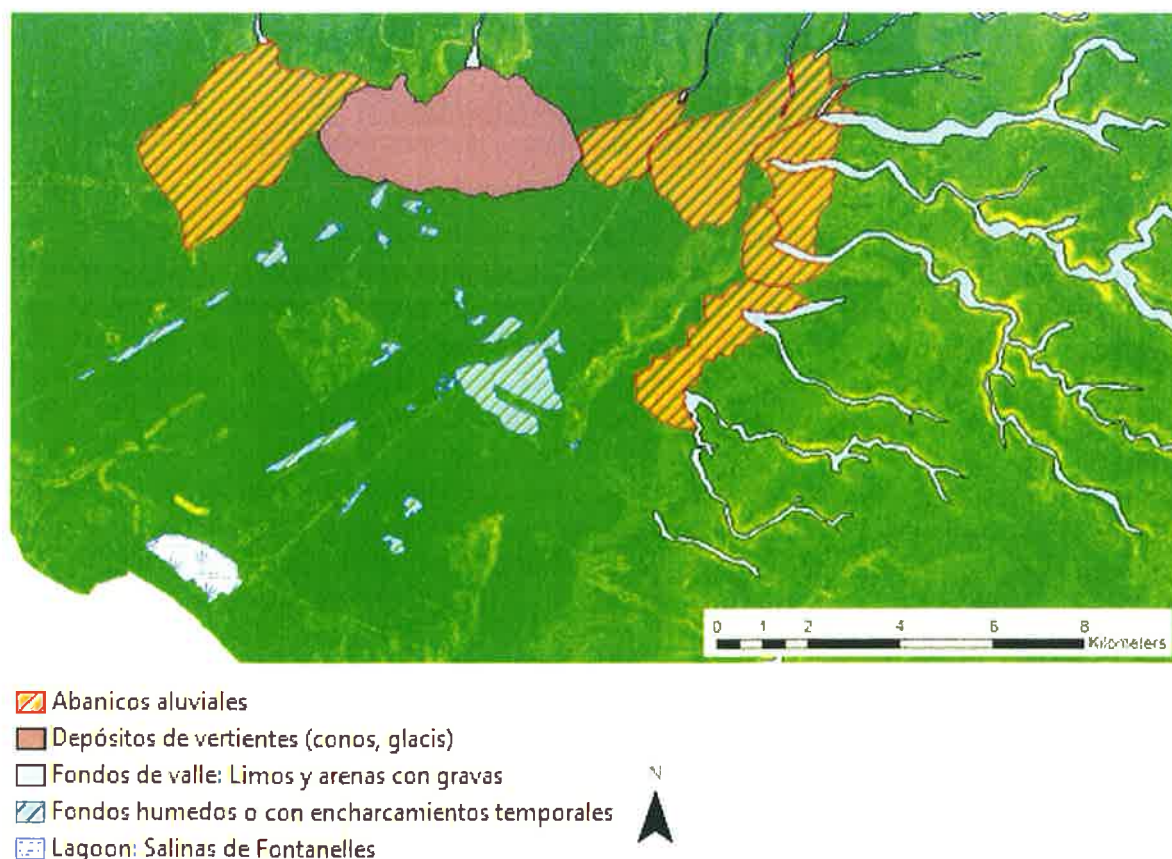


Figura 21. Detalle de la capa vectorial de “geomorfología” con las principales formas identificadas.

En la figura 21 se puede ver cómo 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 se precisó de un mapa litológico de la cuenca del Pla, extraído de la geología general de la zona. La información cartográfica se tomó del sistema de información cartográfica continua *SIGECO* del IGME, y más concretamente del proyecto *GEODE*, que proporciona toda la información geológica en formato vectorial para la Isla de Mallorca a escala 1:50000.

Con la capa de geología general ya se dispuso de todas las litologías de la cuenca. Pero también se quiso incluir, en esta capa de texturas, la anterior capa de geomorfología creada. Para integrar las dos capas en una, se utilizó en ArcGIS la herramienta *identity*, que permite solapar ambas manteniendo los atributos para la capa de salida. En la tabla de atributos de la nueva capa de salida creada existe un campo que indica la litología y a partir de ella se pudo sacar el grupo y el tipo textural. La textura de un suelo se define como el porcentaje en peso de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo). Siguiendo la terminología establecida por la *USDA* (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América), se tienen las clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro ( $\emptyset$ ), recogidas en la Tabla 4.

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

Tabla 4. Tipologías de clases texturales de partículas inferiores a 2 mm de diámetro y sus rangos de tamaños.

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 (100% de cada uno en los tres vértices del triángulo equilátero), 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. 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 desde el punto de vista del drenaje (permeabilidad) en la génesis de la escorrentía. Las clases suelen asociarse en cuatro grupos principales en la metodología del SCS, según exista un componente dominante o una proporción adecuada de todos ellos; se denominan A, B, C y D (tabla 05).

<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-limosa y limosa. Bastante impermeables.
<b>D</b>	Arcillosa y arcillo-limosa. Muy impermeable.

Tabla 5. Asignación de grupo a las diferentes clases texturales.

Con estos criterios, se clasificaron las litologías de la capa integrada (litología + geomorfología) en los grupos A, B, C y D (figuras 22 y 23).

litología	grupo text	tipo textu
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
Calcarentitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso
Calcarentitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso
Calcarentitas (facies litorales: playa)	B	Franco arenoso

Figura 22. Detalle de la tabla de atributos de la tabla “texturas del suelo”, con asignación de grupo y tipo textural.

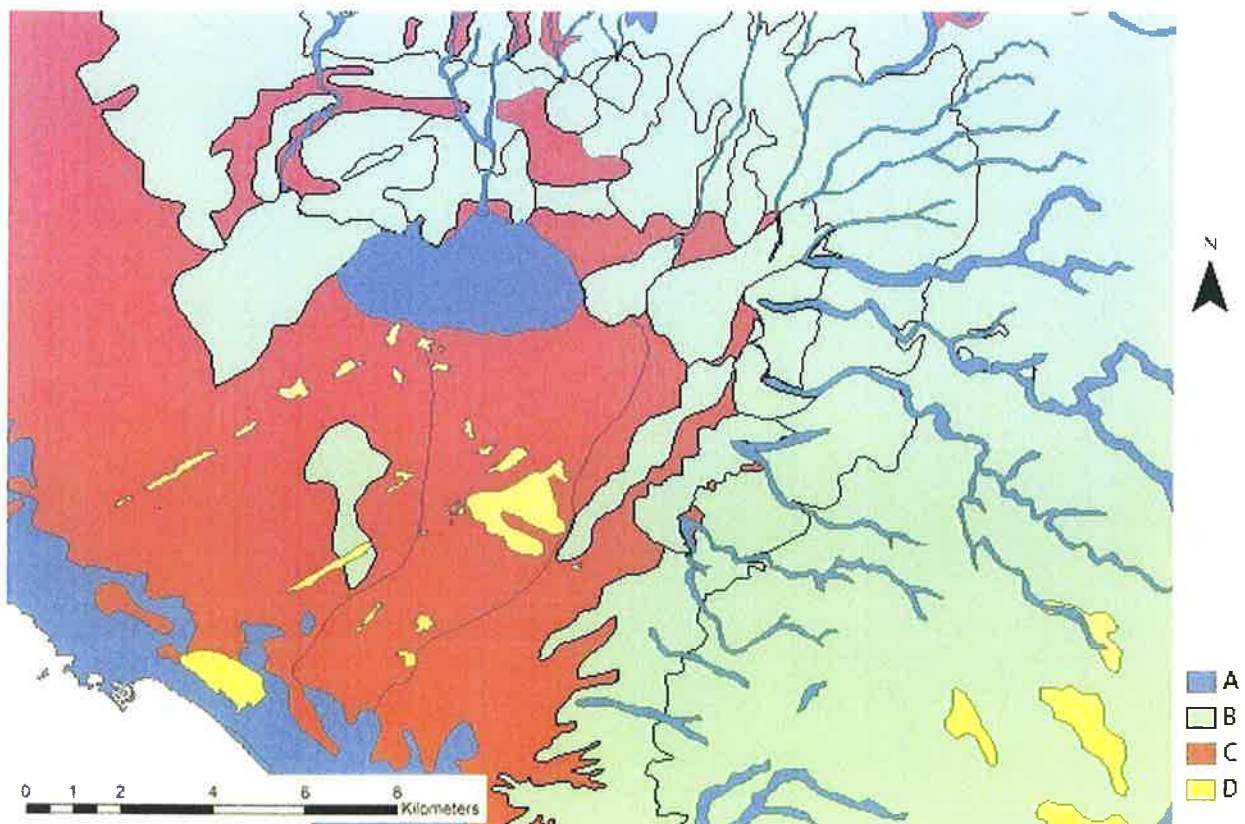


Figura 23. Detalle de la capa vectorial “texturas del suelo”. Clasificación según las clases del método del SCS (USDA).

### 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 territorio puede ser determinante para su comportamiento frente a fenómenos de precipitaciones susceptibles de causar inundación. La capa de usos del suelo es necesaria para después poder atribuir a cada parcela o polígono (y después a cada subcuenca) una clase de ocupación, que conducirá a una asignación de un valor de 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)*. Esta elección se justifica porque *SIOSE* 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.

Fue necesario descargarse, junto con la capa vectorial de los usos y ocupaciones del suelo, una base de datos asociada donde se recogen 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 en el primero). Los códigos se basan en una serie de abreviaturas (en mayúscula y minúsculas; tablas 6 y 7) y en tantos por ciento (indican qué tanto por ciento hay de ese uso en una parcela en concreto).

COBERTURAS	CODIGO	COBERTURAS	CODIGO
Asentamiento Agrícola Residencial	AAR	Olivar	LOL
Acantilados Marinos	ACM	Viñedo	LVI
Embalses	AEM	Matorral	MTR
Lagos y Lagunas	ALG	Aeroportuario	NAP
Afloramientos Rocosos y Roquedos	ARR	Conducciones y Canales	NCC
Vial, Aparcamiento o Zona Peatonal	VAP	Depuradoras y Potabilizadoras	NDP
Arroz	CHA	Eléctrica	NEL
Cultivos Herbáceos distintos de Arroz	CHL	Portuario	NPO
Coníferas	CNF	Plantas de Tratamiento	NPT
Administrativo Institucional	EAI	Red Ferroviaria	NRF
Campo de Golf	ECG	Red Viaria	NRV
Cultural	ECL	Telecomunicaciones	NTC
Cementerio	ECM	Vertederos y Escombreras	NVE
Edificación	EDF	Zonas de Extracción o Vertido	ZEV
Deportivo	EDP	Olivar-Viñedo	OVD
Educación	EDU	Agrícola, Ganadero	PAG
Parque Urbano	EPU	Playas, dunas y arenales	PDA
Zona Verde Artificial y Arbolado Urbano	ZAU	Mínero Extractivo	PMX
Fronosas Caducifolias	FDC	Prados	PRD
Fronosas Perennifolias	FDP	Pastizal	PST



Marismas	HMA	Ramblas	RMB
Zonas Pantanosas	HPA	Suelo Desnudo	SDN
Salinas Marinas	HSM	Suelo No Edificado	SNE
Industrial Aislada	IAS	Camping	TCG
Polígono Industrial Ordenado	IPO	Complejo Hotelero	TCH
Polígono Industrial sin Ordenar	IPS	Comercial y Oficinas	TCO
Lámina de Agua Artificial	LAA	Parque Recreativo	TPR
Frutales Cítricos	LFC	Casco	UCS
Frutales No Cítricos	LFN	Discontinuo	UDS
Huerta Familiar	UER	Ensanche	UEN

Tabla 6. 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).

DESCRIPCION_ATRIBUTOS	CODIGO	DESCRIPCION_ATRIBUTOS	CODIGO
asociación	A	cortas	ct
mosaico regular	R	procedencia de cultivos	pc
mosaico irregular	I	alta montaña	am
edificio aislado	ea	roturados no agrícolas	ra
edificio entre medianeras	em	zonas erosionadas	ze
vivienda unifamiliar aislada	va	cuaternarias	cu
vivienda unifamiliar adosada	vd	regadío no regado	rn
nave	nv	abancalado	ab
en construcción	ec	es forzado	fz
secano	sc	plantación	pl
regadío regado	rr	formación de ribera	fr

Tabla 7. Códigos usados por SIOSE para la clasificación de usos del suelo. Se diferencia entre mayúsculas (para el tipo relación, asociación o mosaico) y minúsculas (para definir atributos).

Una vez que tenemos los códigos traducidos, se hizo 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. Se creó en la tabla de atributos un nuevo campo para definirlos (tabla 8).

<i>USO DE SUELO SIOSE</i>	<i>USO DE SUELO CORINE LAND COVER-2000</i>
<i>Recinto portuario</i>	Zonas portuarias
<i>Aeroportuario</i>	Aeropuertos
<i>Afloramientos rocosos y roquedos</i>	Afloramientos rocosos y canchales
<i>Lámina de agua artificial</i>	Almacenamiento de agua
<i>Red viaria</i>	Autopistas, autovías y terrenos asociados
<i>Coníferas</i>	Bosques/zonas de coníferas
<i>Campos de golf</i>	Campos de golf
<i>Cultivos herbáceos distintos de arroz (secano)</i>	Cultivos anuales en secano
<i>Cultivos herbáceos distintos de arroz (regadío)</i>	Cultivos herbáceos de regadío
<i>Cultivos herbáceos distintos de arroz (mixtos)</i>	Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío
<i>Desalinizadora</i>	Equipamientos y servicios
<i>Depuradoras y potabilizadoras</i>	Equipamientos y servicios
<i>Vertederos y escombreras</i>	Escombreras y vertederos
<i>Fronosas perennifolias</i>	Fronosas perennifolias
<i>Frutales cítricos</i>	Frutales cítricos
<i>Frutales no cítricos</i>	Frutales tropicales
<i>Viñedos</i>	Viñedos
<i>Asentamiento agrícola residencial</i>	Granjas agrícolas/ganaderos
<i>Zonas pantanosas</i>	Humedales y zonas pantanosas
<i>Zonas extracción minera y vertidos</i>	Zona de extracción minera
<i>Deportivo</i>	Instalaciones deportivas y recreativas
<i>Parque recreativo</i>	Instalaciones deportivas y recreativas
<i>Matorral</i>	Matorral boscoso de coníferas
<i>Olivar</i>	Olivares
<i>Pastizal</i>	Pastizales, prados o praderas con arbolado
<i>Playas, dunas y arenales</i>	Playas y dunas
<i>Ramblas</i>	Ramblas con algo de vegetación
<i>Acantilados marinos</i>	Rocas desnudas con fuerte pendiente
<i>Edificado, vial o aparcamiento</i>	Tejido urbano continuo
<i>Ensanche</i>	Tejido urbano continuo
<i>Parque urbano</i>	Zonas verdes urbanas
<i>Casco urbano</i>	Tejido urbano continuo
<i>Cultural, educación o sanitario</i>	Tejido urbano continuo
<i>Zona comercial y oficinas</i>	Zonas industriales y comerciales
<i>Suelo no edificado y vivienda unifamiliar</i>	Tejido urbano discontinuo
<i>Edificado y zona verde artificial</i>	Tejido urbano discontinuo
<i>Huerta familiar</i>	Tierras de labor
<i>Complejo hotelero</i>	Urbanizaciones ajardinadas
<i>Suelo no edificado</i>	Zonas en construcción
<i>Polígono industrial ordenado o aislado</i>	Zonas industriales

Tabla 8. 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 apreciar en la tabla 8, 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 se pudo 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 ( $P_0$ ), 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 ( $P_0$ ), del cual posteriormente se obtendrá el *NC* mediante la siguiente fórmula (Ferrer, 2004):

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

<i>USO DE SUELO CORINE LAND COVER-2000</i>	<i>SLOPE*</i>	<i>A_Po</i>	<i>B_Po</i>	<i>C_Po</i>	<i>D_Po</i>	<i>NC_A</i>	<i>NC_B</i>	<i>NC_C</i>	<i>NC_D</i>
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 secano		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 secano y regadío	>=3%	34	20	13	10	60	72	80	84
Mosaico de cultivos mixtos en secano 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

Tabla 9. Parámetro umbral de escorrentía ( $P_0$ ) para los cuatro grupos texturales (A, B, C y D) y sus correspondientes números de curva (NC), calculados mediante la fórmula  $NC = 5080 / (50.8 + P_0)$ ; (Ferrer, 2004).

\*En la tabla 09 se observa el campo (columna) "slope", ya que dependiendo de si la pendiente de la parcela es mayor o menor al 3%, el NC puede variar (para todos usos que tengan relación con el 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  $P_0$  (y por tanto un NC) común, debido a que la escorrentía superficial se comporta de la misma manera.

Para el último paso de este procedimiento se usó de nuevo la herramienta *identity* de ArcGIS, 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 existe 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 ( $P_0$ ) y número de curva (NC). Para calcular definitivamente que NC corresponde a cada parcela en función de su grupo textural se hizo una selección por atributos y se colocó el resultado final en un nuevo campo llamado "*NC\_final*" (figura 24).

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 24. 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 el ejemplo de la figura 24 se observa cómo el uso “bosques/zonas de coníferas” está en parcelas con los cuatro grupos texturales A, B, C y D; y por tanto, con los cuatro valores de NC diferentes: 36, 52, 62 y 69.

Como se aprecia en las figuras 25 y 26, a las tres capas iniciales se les ha designado un código numérico que se corresponde con sus atributos (Tabla 10).

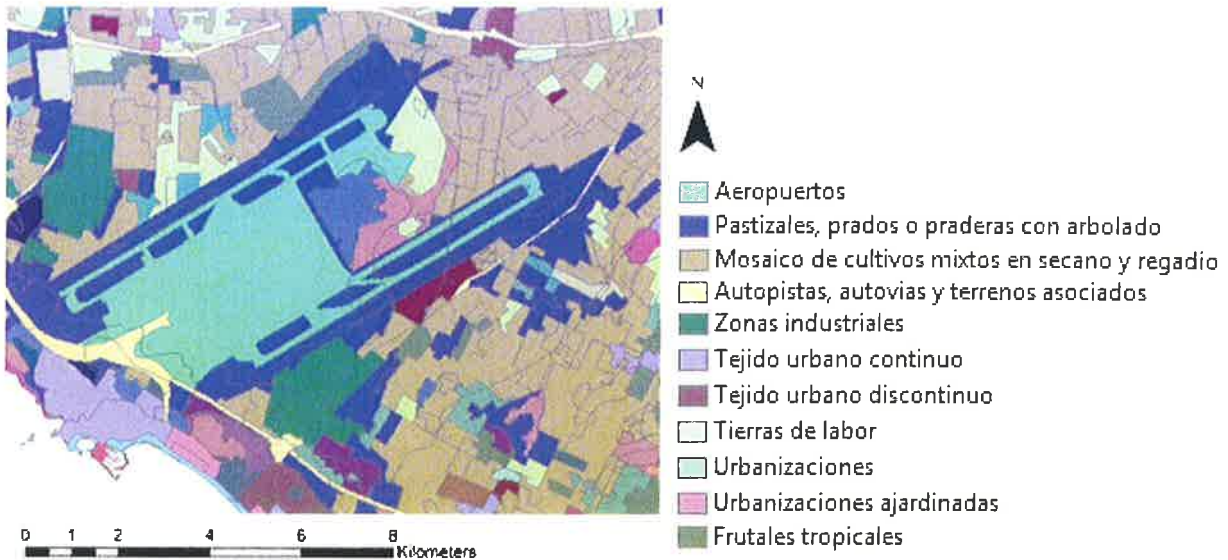


Figura 25. Detalle de la capa “usos\_del\_suelo” para la zona del aeropuerto.

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 26. Tabla de atributos de la capa “COMB\_s\_u\_t” tras aplicar la herramienta “combine”.

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

Tabla 10. Códigos asignados a diferentes texturas y rangos de pendientes.

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 el área de estudio.

Para calcular el número de curva final se empleó una herramienta de unión (*join*) entre la tabla anteriormente creada en MS Excel (ver tabla 09) y esta última capa “COMBINADA”. De esta

manera se incluyó en la tabla de atributos el parámetro *NC*. Y por último, se creó un nuevo campo, llamado "*NC\_final*", donde aparece el número de curva correspondiente a cada grupo de celdas (Figura 27), 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
>=2%	C	Rambblas con algo de vegetacion	15	8	6	4	77	86	89	93	89

Figura 27. Extracto de la tabla de atributos de la capa "COMBINADA" donde el último campo indica el valor del parámetro número de curva final.

Como se puede apreciar en la figura 27, 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.

A continuación se transformó la última capa obtenida "COMBINADA", de formato raster a vectorial y se aplicó la herramienta "*intersect*" entre la capa de sub-cuencas obtenida mediante HEC-GeoHMS y la capa COMBINADA. De esta forma solo permanece el área que intersectan ambas. Como resultado se obtuvo que cada subcuenca está compuesta por varios polígonos con un NC diferente para cada uno de ellos. Para calcular el NC promedio de cada subcuenca se ponderaron los valores de los polígonos comprendidos en la misma por su área. Para ello se seleccionaron por atributos todos los polígonos que pertenecían a un mismo ID de cuenca y se añadieron los siguientes campos (figura 28):

- Campo "area\_km": con la herramienta de campos *calculate geometry* se obtuvo el área de cada polígono.
- Campo "ponderación": se dividió 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": se multiplicó 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	0.076223	59.23
17	21	1	0.00067	0.014344	0.008606	59.23

Figura 28. Extracto de la tabla con el valor de curva medio y de la subcuenca.

Con el fin de seguir reduciendo el número de datos a tratar y concretar bien las subcuencas realmente no homogéneas que conforman la cuenca del Pla Sant Jordi, se aplicó como criterio de unión de cuencas aguas abajo, el hecho de que si la diferencia entre sus números de curva fuera inferior al 10%. Se trata de un criterio muy usado en hidrología de superficie que sirve para

generalizar cuencas con similares comportamientos a generación de la escorrentía superficial; y de este modo simplificar el modelo de cuenca, lo que facilita el cálculo en programas como HEC-HMS. El proceso es el mismo que el anteriormente detallado: como esta unión vuelve a afectar al NC total ya calculado, se debe volver a recalcular, ya que de nuevo el área influye. Se ponderó por las nuevas áreas, una vez unidas las sub-cuencas posibles (aquellas cuya diferencia sea como máximo un 10% de sus valores NC) y se obtuvo, ahora sí, el valor final de NC (Figura 29), que será el utilizado como dato de entrada del 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

Figura 29. Extracto de la tabla con el valor de número de curva final por subcuenca ponderado.

Si se comparan en la figura 29 las columnas *NC\_subcuenca* y *Sum\_NCfin*, se puede observar cómo el NC cambia un poco de una a otra; eso es debido a la ponderación areal. Con este proceso se consiguió reducir el número de registros de 39 a 12; con lo que quedaron una docena de sub-cuencas diferentes para ser modeladas en HEC-HMS.

#### ***Asignación del valor de precipitación a cada sub-cuenca mediante el método del kriging***

Para alimentar el modelo meteorológico de HEC-HMS es necesario calcular la cantidad de precipitaciones que se le va a asignar a cada una de las 12 sub-cuencas finalmente diferenciadas. Se cuenta con datos de series pluviométricas cuyos periodos de registro son bastante largos (ver apartado 2.2.1.1); por lo se utilizarán esos datos como fiables, pero con el inconveniente de que hay subcuencas que no tienen estaciones meteorológicas próximas; y, por tanto, no sería exacto asignarles el valor de la más cercana (algunas pueden estar a decenas de km), ya que posiblemente no tengan la misma cantidad de precipitaciones.

Para solventar este inconveniente, se utilizó en la interpolación de valores puntuales de las estaciones a todo el territorio, el método del kriging, un procedimiento geoestadístico estandarizado 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. Para ello se utilizará la fórmula general del método del kriging, según la cual, la interpolación se forma como una suma ponderada de los datos:

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

ArcGIS dispone de una herramienta que te permite aplicar este método, que se encuentra dentro del módulo de análisis espacial (>"Kriging"). Antes de aplicarla, se debe calcular los centroides de cada subcuenca, ya que al no disponer de estaciones meteorológicas suficientes para dar cobertura a toda el área, se trabajó con ellos. El centroide va a representar el punto promedio de cada polígono de sub-cuenca y de las diversas formas de obtención, se seleccionó la más precisa, mediante coordenadas X-Y. Para ello se añadió a la tabla de atributos de la capa de centroides, dos campos donde se pusieron las coordenadas X-Y y, con la herramienta "calcular geometry" >property X ó Y coordinate of centroid, se obtuvieron las coordenadas basadas en sistema de proyección empleado. Después se exportaron esas coordenadas a una tabla MS Excel y se

volvieron a añadir al entorno de ArcGIS como tabla de datos. El último paso fue aplicar a esa tabla la opción "*Display XY data*", que proyectó en la capa esas coordenadas en forma de puntos, indicando así los centroides.

El método de interpolación kriging fue aplicado tres veces, ya que se pretendía calcular el campo de valores para los periodos de retorno de las precipitaciones máximas diarias de T50, T100 y T500 años (ver apartado 2.2.1.1; figura 30). Se partió de los datos de precipitación obtenidos para las nueve estaciones iniciales (los cuantiles de precipitación) y se interpolaron esos datos al centro de cada sub-cuenca (el centroide), para saber con más precisión las precipitaciones caídas en esos puntos.



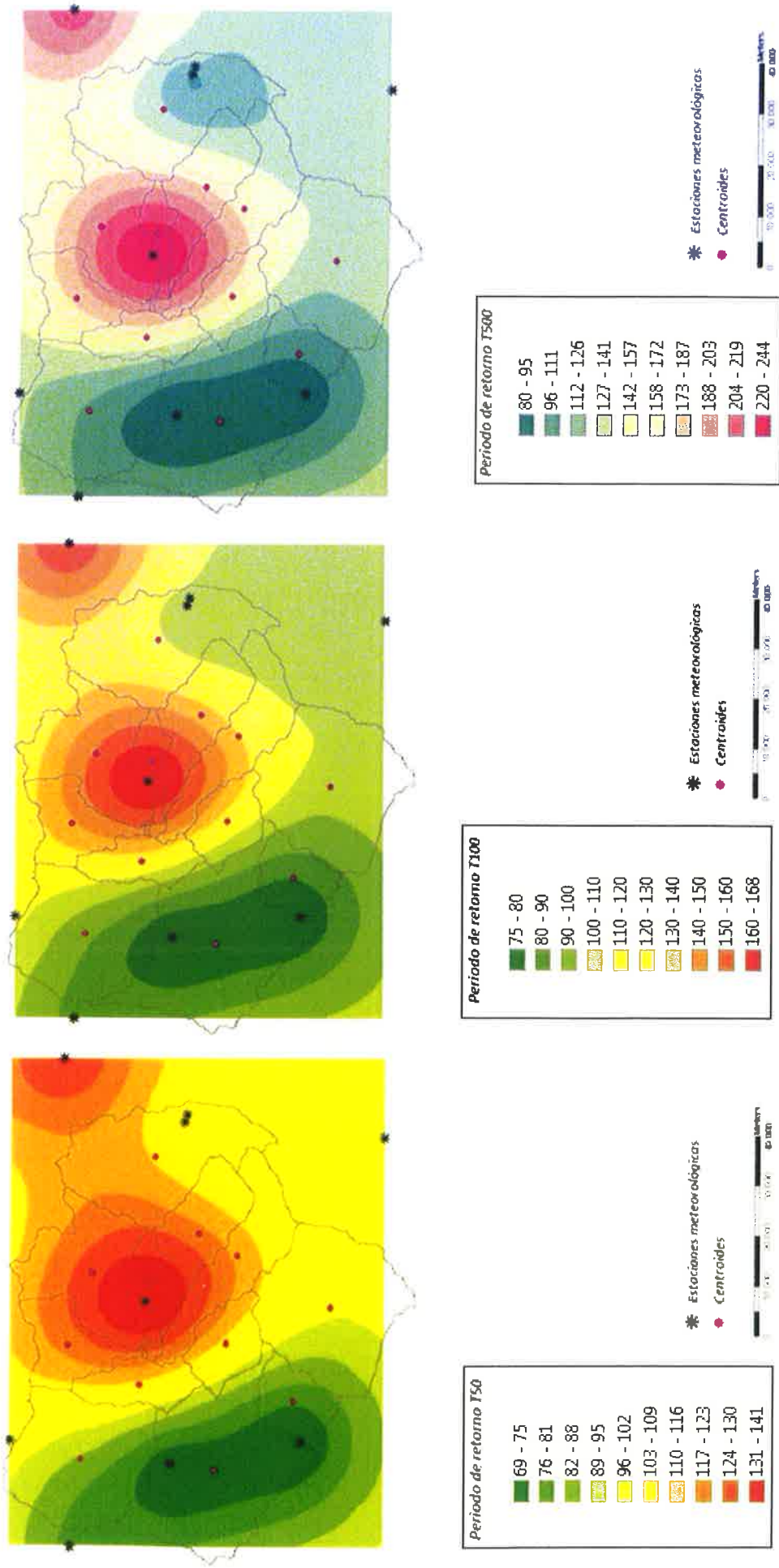


Figura 30. Mapas kriging para asignar precipitaciones a las subcuencas de los periodos de retorno T50, T100 y T500 años mediante ArcGIS.

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

Como ya se ha mencionado, la aplicación HEC-HMS concibe la modelación hidrometeorológica usando el concepto de “proyecto” que se compone de tres elementos: modelo de cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control.

Para completar el modelo de cuenca se estimaron algunos parámetros adicionales al número de curva, como: el porcentaje de permeabilidad o área impermeable de cada subcuenca, que se puede estimar mediante el mapa de usos de suelo; el tiempo de concentración ( $t_c$ ), para el que se ha empleado la conocida fórmula de Témez, contenida en la referida “Instrucción de drenaje de carreteras 5.2-IC” de la Dirección General de Carreteras (M.O.P.U., 1997):

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

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

El coeficiente de almacenamiento (R) en horas se calculó como una fracción del tiempo de concentración ( $t_c$ ), multiplicando éste por un factor del orden de 0.75 (Sánchez San Román, 2012). Para agilizar el proceso de estimación de estos parámetros, con estas sencillas formulaciones, a todas las subcuencas se elaboró una nueva hoja de cálculo en MS Excel (Figura 31).

		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

Figura 31. Extracto de la hoja de cálculo del tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento.

El modelo meteorológico requirió, en primer lugar, 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 indica cómo se suelen distribuir las precipitaciones temporalmente en esta zona; y según esta distribución se realizaron hietogramas sintéticos para las cantidades correspondientes a los tres periodos de retorno considerados, de T50, T100 y T500 años.

Para ello se tomaron los datos pluviométricos de los cuatro eventos extraordinarios más significativos de los últimos 30 años que fueron suministrados por la AEMET. Son cuatro días que tienen registro de datos completo (las 24 horas) y encajan con la serie anual de precipitaciones máximas diarias (tabla 11).

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

Tabla 11. Fechas de los eventos significativos de precipitación diaria e intensidad horaria media.

A partir de este análisis se estima que, según la media, los eventos tormentosos que afectan al área de estudio suelen concentrar todas sus precipitaciones en las últimas horas de la tarde; y por lo tanto, los hietogramas sintéticos se sesgan de esta manera con las máximas precipitaciones al final del día y con las mayores intensidades hacia el final del evento (figura 32).



Figura 32. Datos y gráfico de los hietogramas sintéticos introducidos en “Time-Series Data Manager”. Se puede apreciar la distribución de las precipitaciones en un intervalo de 24 horas para el modelo de hietograma sesgado al final del día y con una distribución sesgada a la derecha (mayores intensidades al final del evento).

Las especificaciones de control simplemente tratan de indicarle al programa cuándo debe empezar y terminar la simulación y el incremento de tiempo (*Time interval*) para efectuar los cálculos. El intervalo de tiempo elegido fue de 1 hora. En este caso se determinó 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 se dispone de dos días de simulación, tiempo suficiente para que la precipitación producida en el primer día genere una escorrentía superficial que alcance el punto final de la cuenca.

## 2.2.2. Metodología del análisis hidráulico

Una vez obtenidos los caudales máximos diarios aplicando el método hidrometeorológico y mediante el paquete informático HEC-HMS (ver apartado 2.2.1), se trató de modelizar la circulación de estos caudales de avenida por los cauces de la cuenca del Pla de Sant Jordi. 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.) siguiendo los parámetros que se han sintetizado en las ecuaciones de Saint Venant. De las diversas simplificaciones de estas fórmulas, en lo que respecta a la consideración dimensional y de régimen de flujo, en este estudio se han ensayado dos tipos de modelizaciones: unidimensional (1D), en régimen gradualmente variado, utilizando el *software* HEC-RAS; y bidimensional (2D) para la que se usó el *software* Iber 2D (2.0). En el mercado existen numerosos programas que hacen simulaciones similares (River2D, Sobek, TuFlow, Mike-Flood, Guad2D...); pero se optó por estos dos por su eficacia, amplia difusión (asociada a su acceso gratuito) y relativa simplicidad.

### 2.2.2.1. 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, en régimen gradualmente variado; 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, siendo utilizado con profusión en el mundo de la ingeniería. El programa trabaja con los caudales resultantes del estudio hidrológico 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 HEC-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 (geometría) y los caudales se introducen en HEC-RAS; y una tercera y última fase, de exportación y visualización de resultados de nuevo en ArcGIS.

#### 2.2.2.1.1. 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.

Se partió del modelo digital del terreno (MDT) que proporciona una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar y permite caracterizar las formas del relieve de nuestra cuenca de estudio. Concretamente se utilizó el mismo MDT que en la modelación hidrológica, con un tamaño de celda de 2x2 m.

El programa no trabaja con datos ráster, por lo que se convirtió el MDT a formato vectorial TIN (Figura 33), utilizando la herramienta del menú *3D analyst>Raster to TIN*.

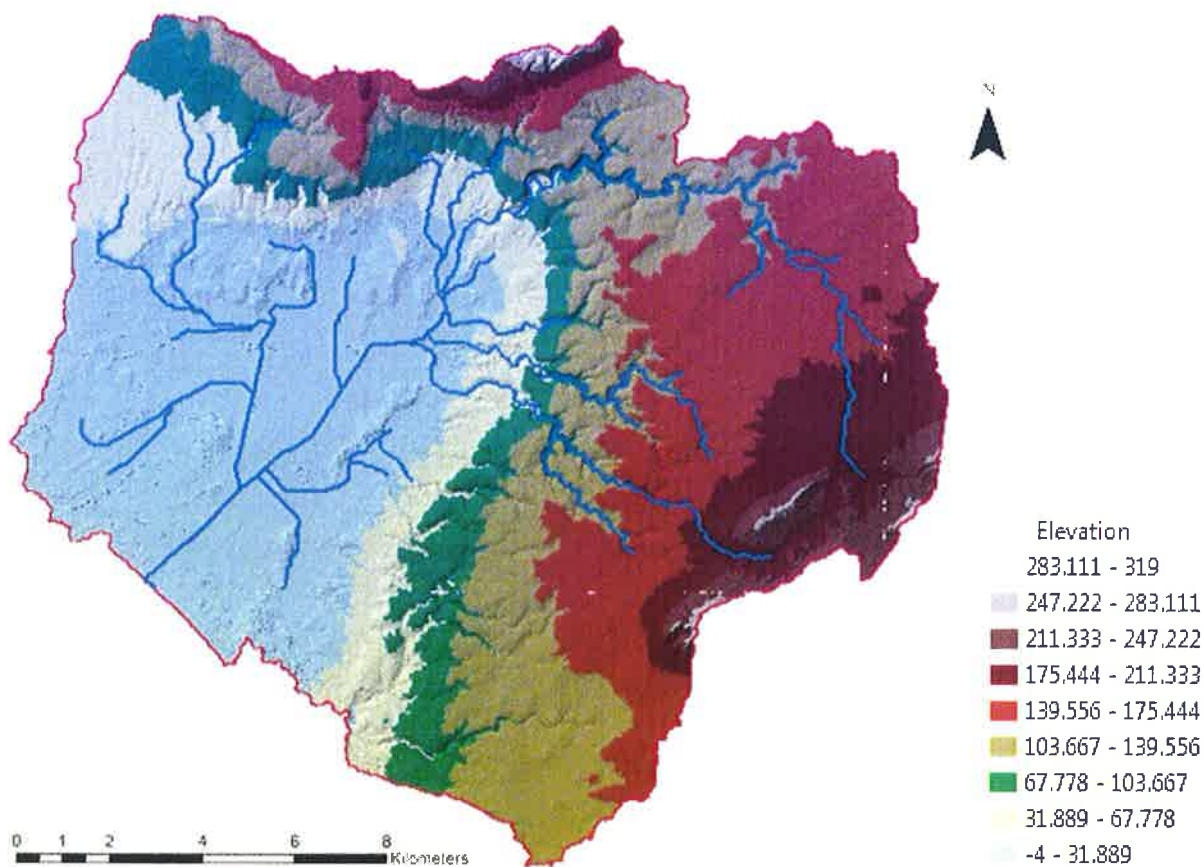


Figura 33. Modelo digital de elevaciones en modalidad vectorial de una red irregular de triángulos (TIN) para la cuenca hidrográfica drenante al Pla de Sant Jordi.

Una obtenido el TIN se comenzó el pre-procesado con la extensión HEC-GeoRAS, aplicando en orden todas las herramientas del menú *RAS Geometry*. Estas herramientas permitieron crear varias capas que manualmente hay que digitalizar con los elementos que se solicitan, y cuyas capas principales son: *StreamCenterline*, capa donde se digitalizó la centrolínea de la corriente fluvial (dos en este caso); *Banks lines*, capa donde se marca la posición de los escarpes de los bancos de orilla de la corriente; y, la más importante, *XS Cutlines*, donde se genera una capa con las secciones transversales al río, que permitirán ver la geometría del fondo del valle (Figura 34). Los criterios para dibujar las *XS CutLines* fueron, principalmente, que la línea debe cortar perpendicularmente al cauce; y espaciar las secciones de acuerdo a la anchura y variaciones geométricas del valle se observaran.

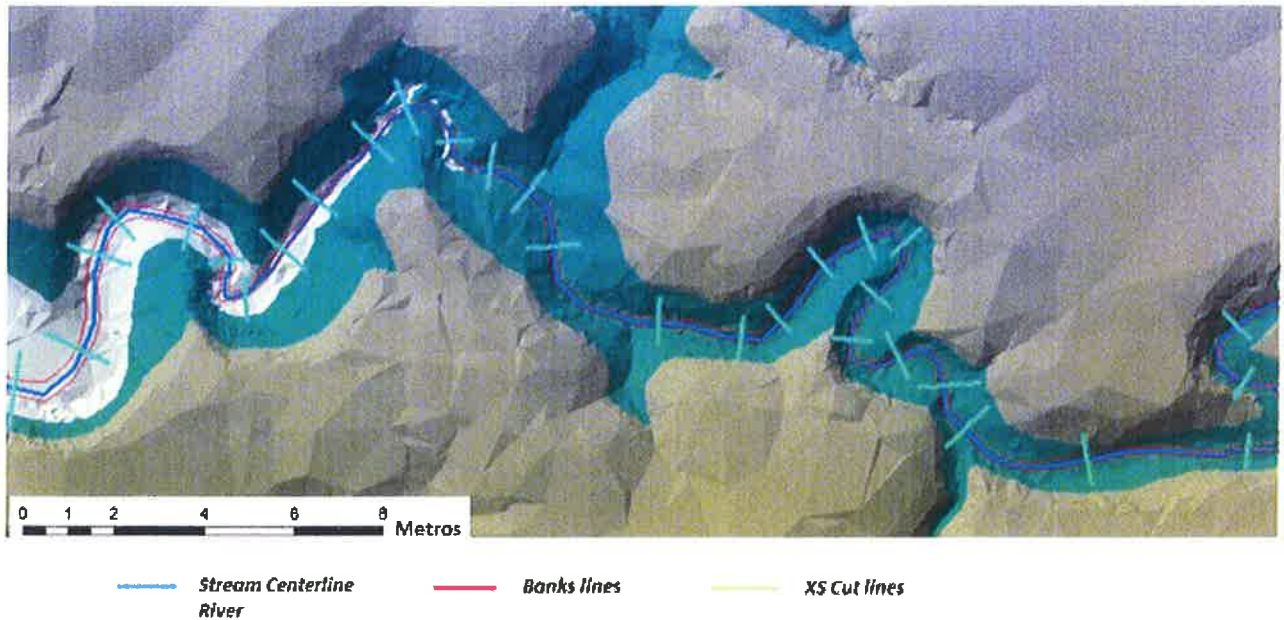


Figura 34. Detalle del TIN con las 3 capas de geometría creadas con la extensión HEC-GeoRAS para el cauce principal que llega al Pla de Sant Jordi.

El siguiente paso fue 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 HEC-RAS pueda trabajar con ellos. Se utilizaron varias herramientas de los menús *StreamCenterlineAttributes* y *XS Cut Line Attributes*.

Finalmente se exportaron todas estas capas que contienen los datos geométricos (topográficos) como un archivo GIS, para su manejo en el programa HEC-RAS.

#### 2.2.2.1.2. Preparación del modelo hidráulico con HEC-RAS

Con este paso metodológico se pretendió modelizar el flujo de agua en los cauces la cuenca mediante el paquete informático HEC-RAS y generar un archivo de resultados que posteriormente fue exportado a ArcGIS para su visualización como áreas inundables.

En primer lugar se importó la geometría generada en la fase de pre-procesado con HEC-GeoRAS mediante la opción *Enter Geometric Data* (figuras 35 y 36).

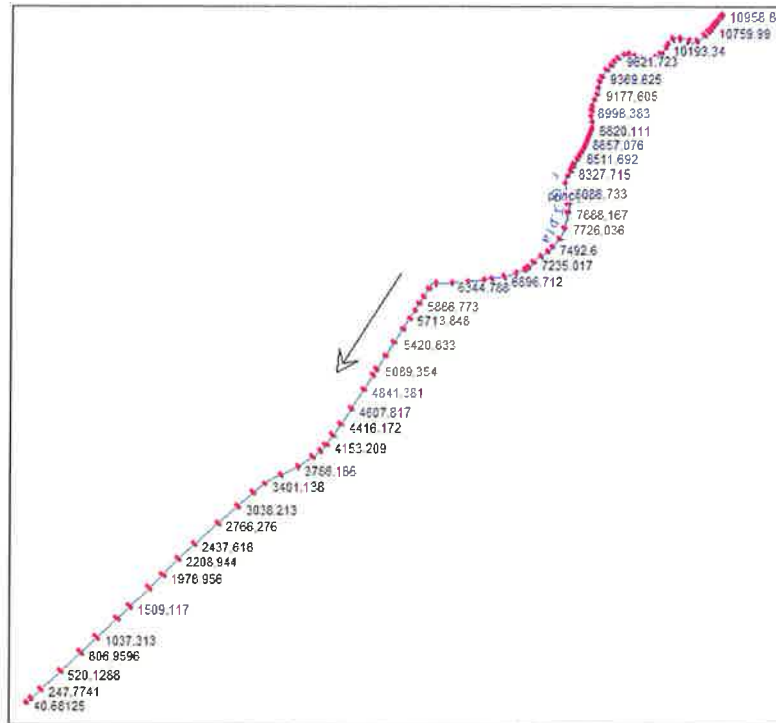


Figura 35. Visualización de la geometría del modelo hidráulico, con el eje principal de la corriente fluvial y la posición de las diferentes secciones transversales, numeradas según la distancia desde el punto de desembocadura.

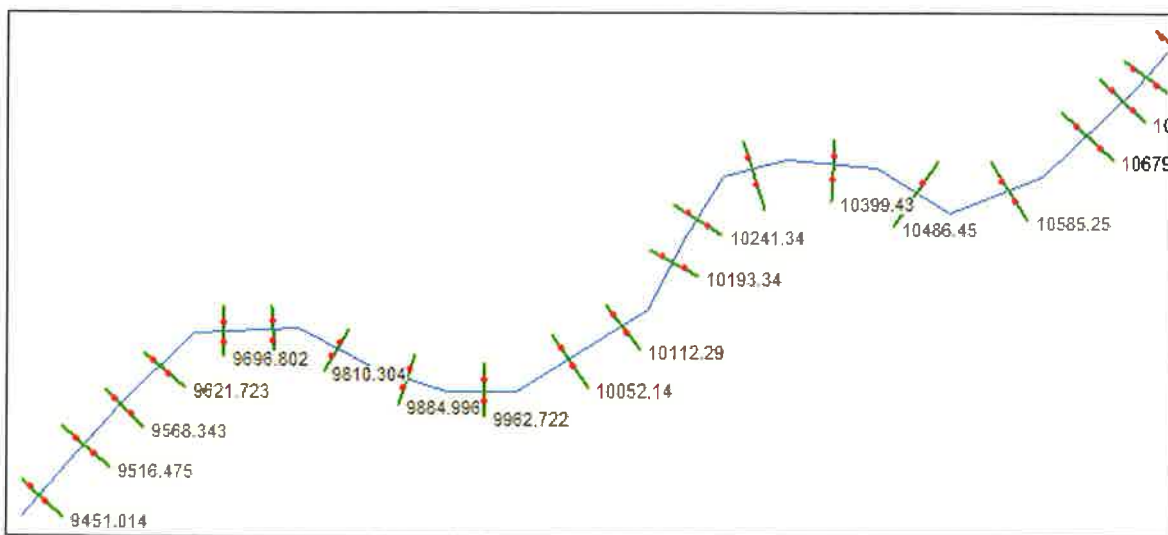


Figura 36. Geometría del cauce del río central de la cuenca del Pla de Sant Jordi, donde se puede identificar el río (en azul), las secciones transversales (en verde) y las intersecciones de las secciones con los escarpes de los bancos de orilla del cauce (indicadas por puntos rojos).

Una vez obtenida la geometría de río se asignó a cada tramo o sección transversal el valor de la rugosidad que ofrece resistencia al flujo, usando el conocido parámetro de la n-Manning para el cálculo de la fricción a la que está sometida el agua y poder determinar la velocidad. En la cabecera, el río está formado por canales naturales encajados en torrentes o barrancos; pero en la parte baja del Pla, el río se encauza en una acequia artificial, construida para canalizar el agua y abastecer a las tierras de cultivos cercanas. Por eso se consideraron dos tipos de canales con condiciones específicas para cada uno de ellos y diferentes valores de n-Manning (tabla 12).

<i>Tipo de canal</i>	<i>Alto</i>	<i>Normal</i>	<i>Max</i>
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

Tabla 12. Valores de n-Manning según el tipo de canal.

El ejemplo de sección transversal de la figura 37 pertenece a la parte alta del río, donde el canal aún tiene una disposición ‘natural’. Se aprecia la típica geometría en forma de “v” o trapezoidal, 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 escarpe del cauce principal frente a lo que el programa ya considera llanura de inundación (HEC-RAS permite considerar de forma diferente al cauce principal respecto a las llanuras, en cuanto al cálculo de la rugosidad n-Manning se refiere).

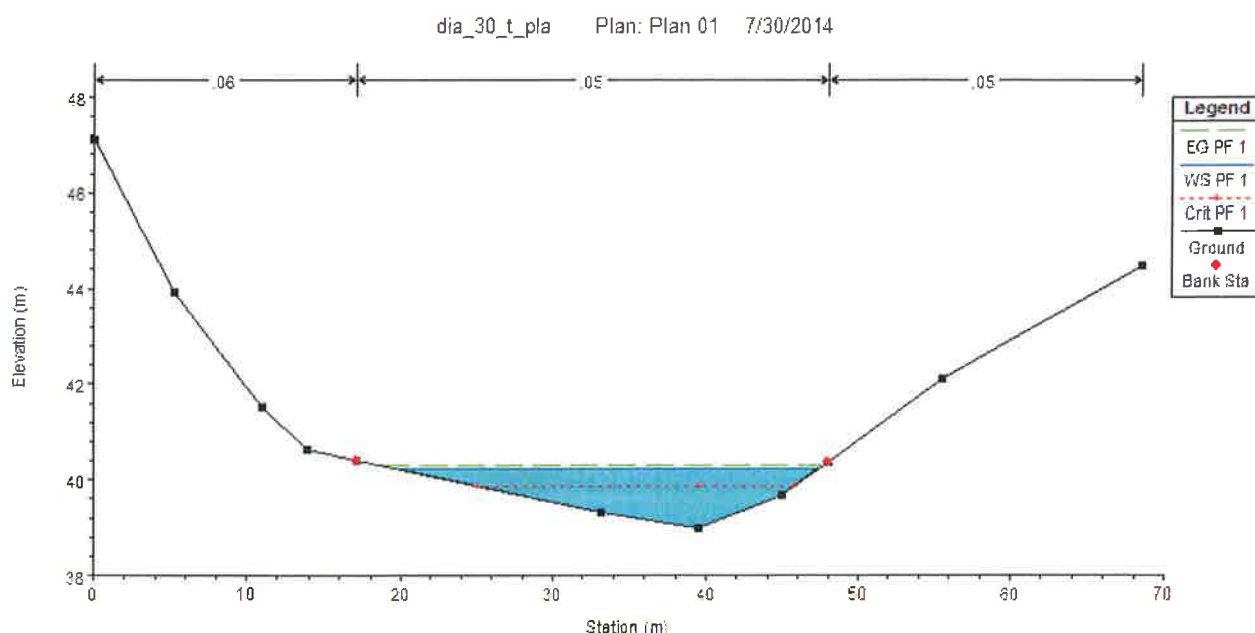


Figura 37. Ejemplo de sección transversal del río principal del Pla de Sant Jordi para una simulación de periodo de retorno T=50 años.

Por último, en la opción *SteadyFlowData* del menú principal de HEC-RAS permitió introducir los caudales punta obtenidos en el análisis hidrológico para cada tramo del río, ya que no tiene un caudal constante en todo su desarrollo. Esta operación se realizó tres veces, ya que se introdujeron los caudales correspondientes a periodos de retorno de T50, T100 y T500 años. También en este mismo menú, se cumplimentaron las condiciones de contorno del canal (*BoundaryConditions*), 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 este estudio, ante la falta de otra información y por la configuración geométrica del modelo, se utilizó el último tipo de condición, calado normal o *normal depth* (es el método más habitual) donde el flujo se supone que se aproxima al régimen uniforme y el dato a introducir es la pendiente del lecho del tramo de influencia (aguas arriba y/o abajo, según el régimen elegido), en tanto por uno.



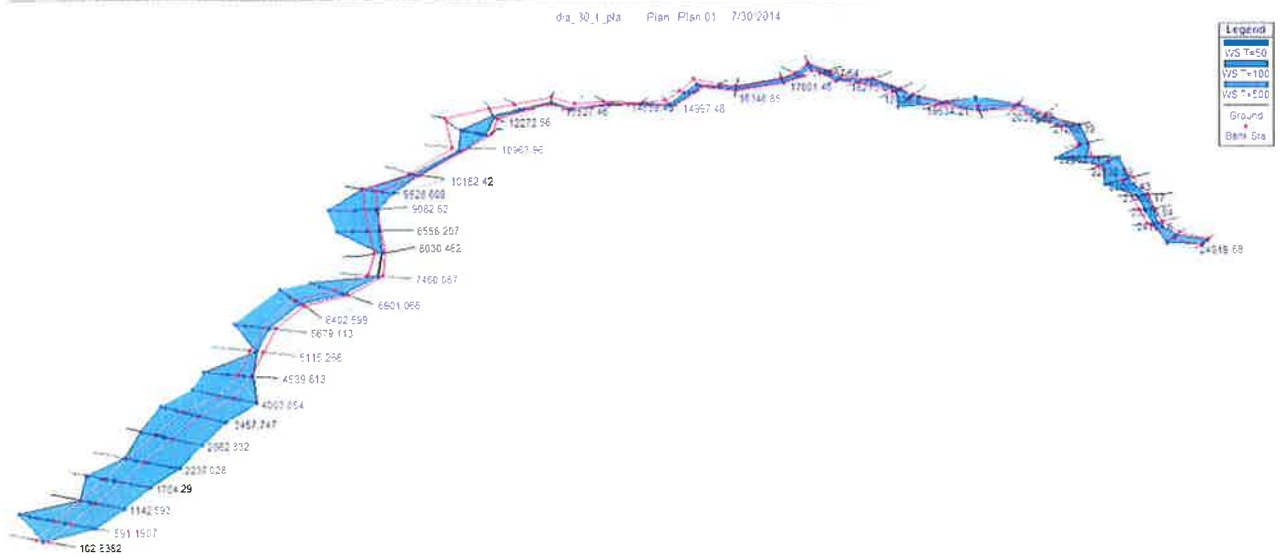


Figura 38. Vista 3D de los resultados de la simulación con HEC-RAS del río central del Pla de Sant Jordi. En azul se indican las zonas hasta donde alcanza la lámina de agua para el periodo de retorno T500 años interpolando la lámina de agua en las secciones de cálculo.

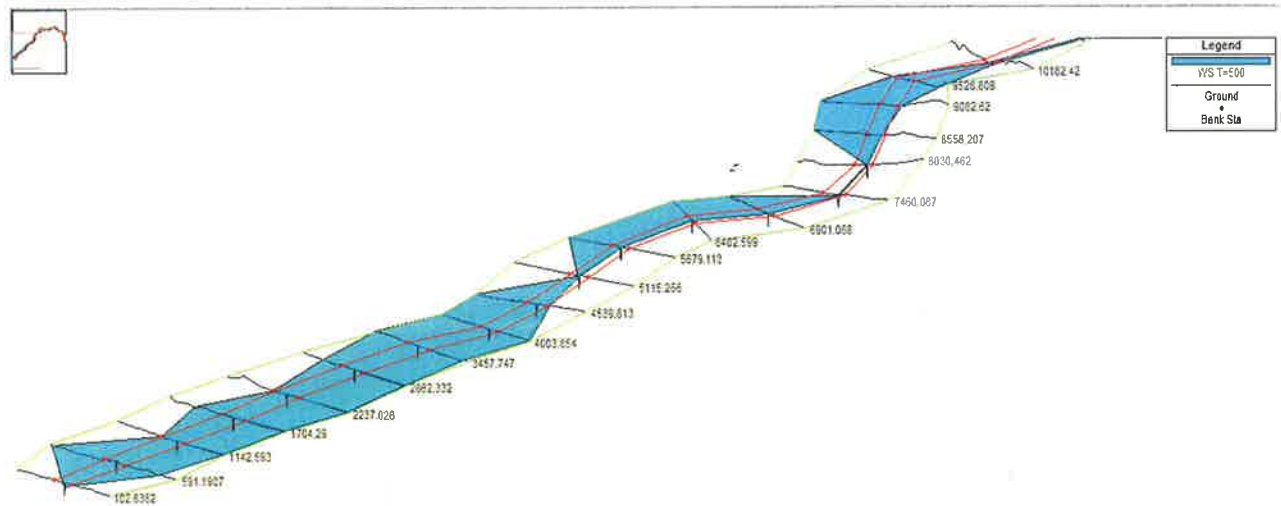


Figura 39. Detalle de la vista 3D de los resultados de la simulación con HEC-RAS en la desembocadura del río para la simulación de T500 años.

El programa generó tres archivos diferentes de resultados, uno para cada periodo de retorno de T50, T100 y T500 años. Estos archivos se exportaron de nuevo a ArcGIS para visualizar las zonas inundables sobre la topografía del terreno (sobre el TIN creado anteriormente).

### 2.2.2.1.3. Post-procesado en ArcGIS. Visualización de resultados

Nuevamente trabajando en ArcGIS, se utilizó la extensión HEC-GeoRAS para generar los resultados finales del análisis hidráulico. Algunos de los resultados que se generaron fueron: las superficies de inundación para los caudales correspondientes a cada periodo de retorno elegido; los *grids* de profundidad o calado máximo alcanzado, visualizaciones 3D, etc.

### 2.2.2.2. 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 y agencias autonómicas del agua.

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 de la modelación hidráulica en el Pla de Sant Jordi, solo se utilizó el módulo hidrodinámico; sin activar el módulo de turbulencia por las bajas pendientes de la zona; ni del módulo de transporte, por falta de datos para su implementación.

Para realizar un cálculo con el módulo hidrodinámico de Iber se siguieron 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 metodológicos con detalle.

#### 2.2.2.2.1. Crear o importar una geometría (topografía)

De nuevo se parte del modelo digital del terreno (MDT), que permite 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 unidimensional en HEC-RAS, con una malla de resolución espacial de 2x2 m, procedente del vuelo LIDAR realizado por el IGN. Señalar que Iber trabaja siempre con el MDT en formato ASCII, por lo tanto previamente se convirtió a este formato usando las utilidades de ArcGIS (herramienta “*crear RTIN*”, indicando la longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se formarán, así como una tolerancia (figura 40).

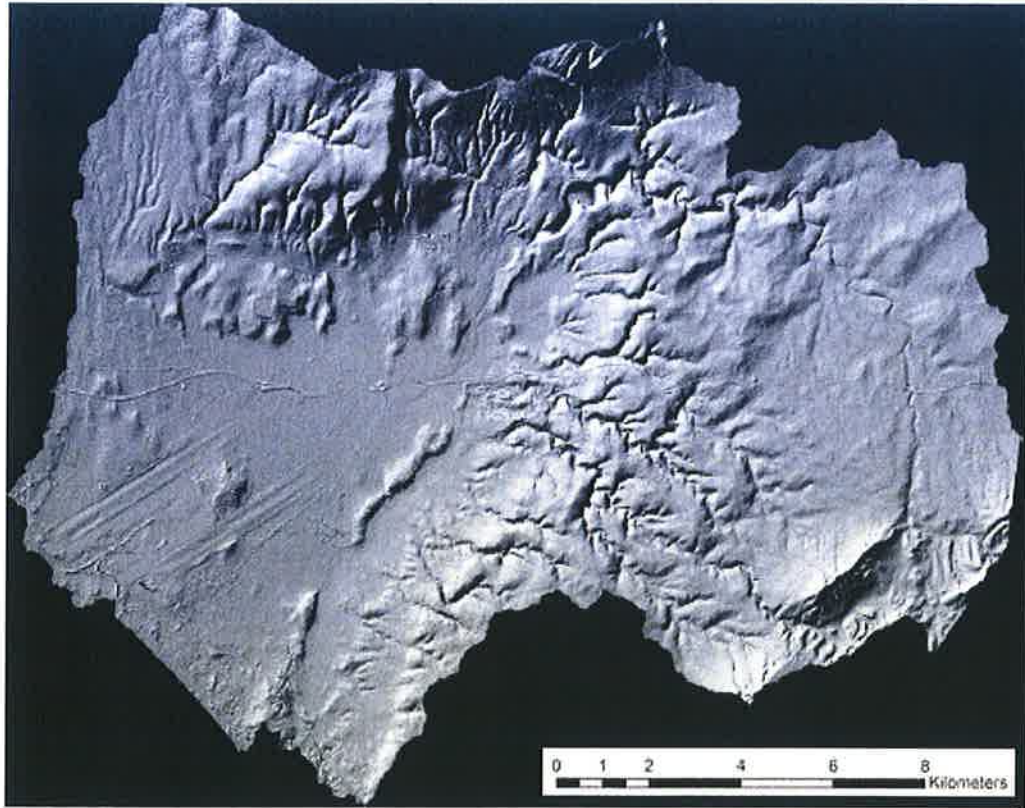


Figura 40. Modelo digital del terreno (MDT) en formato raster ASCII, utilizado para introducir la topografía de la cuenca en Iber 2D.

Una vez importado el archivo RTIN se colapsó el modelo, ya que los triángulos se importaron como triángulos independientes, es decir, sin compartir líneas como lado común. De ese modo ya se puede poner como imagen de fondo la ortofoto y así visualizar mejor el resultado.

#### 2.2.2.2.2. 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). Se señalaron los elementos de la geometría que actuarían como entrada y salida del canal, de modo que se seleccionaron los lados de los triángulos que forman una línea perpendicular al cauce del río (el programa interpretará que esa línea marca el inicio o el final del canal).

También se debe introducir los datos de caudal que se dispone (caudales punta o hidrogramas resultantes del análisis hidrológico); y además señalar el tipo de régimen en el que se quiere hacer la simulación (sub-crítico, crítico o supercrítico); en el caso de estudio, el régimen simulado fue sub-crítico.

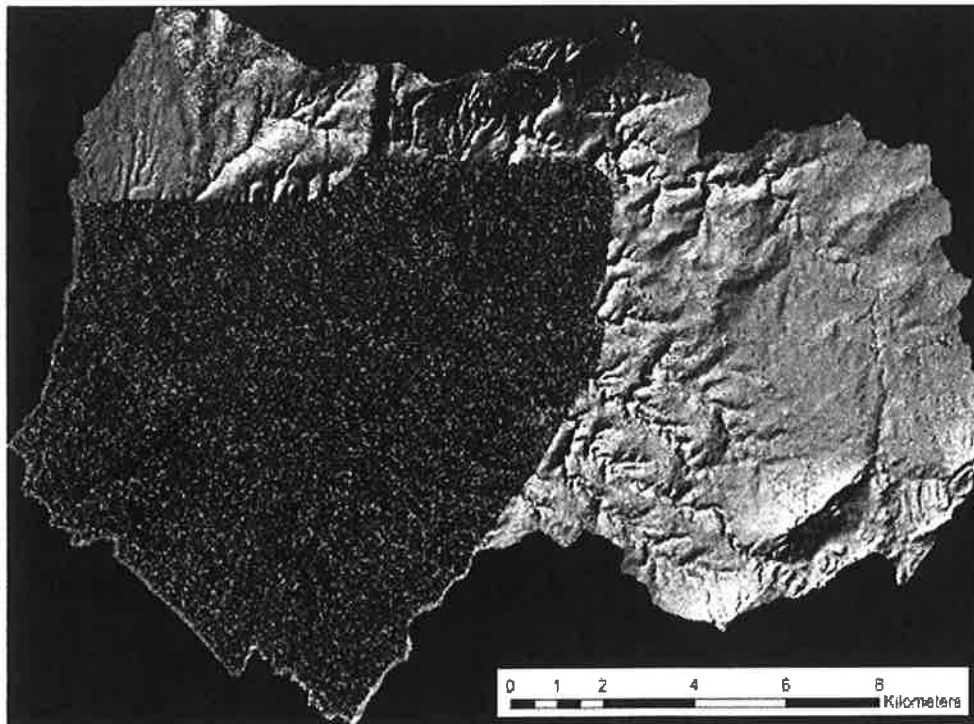
Se tomaron un total de 12 canales que rodean y desembocan en la cuenca del Pla de Sant Jordi como entradas para hacer la simulación (cada uno de ellos con un valor diferente de caudal de entrada); y como único punto de salida, se tomó el desagüe al mar en la parte suroeste de la cuenca. Numerándolos en el sentido de las agujas del reloj se les asignaron los valores de caudales punta procedentes del análisis hidrológico para los diferentes periodos de retorno T50, T100 y T500 años (tabla 13).

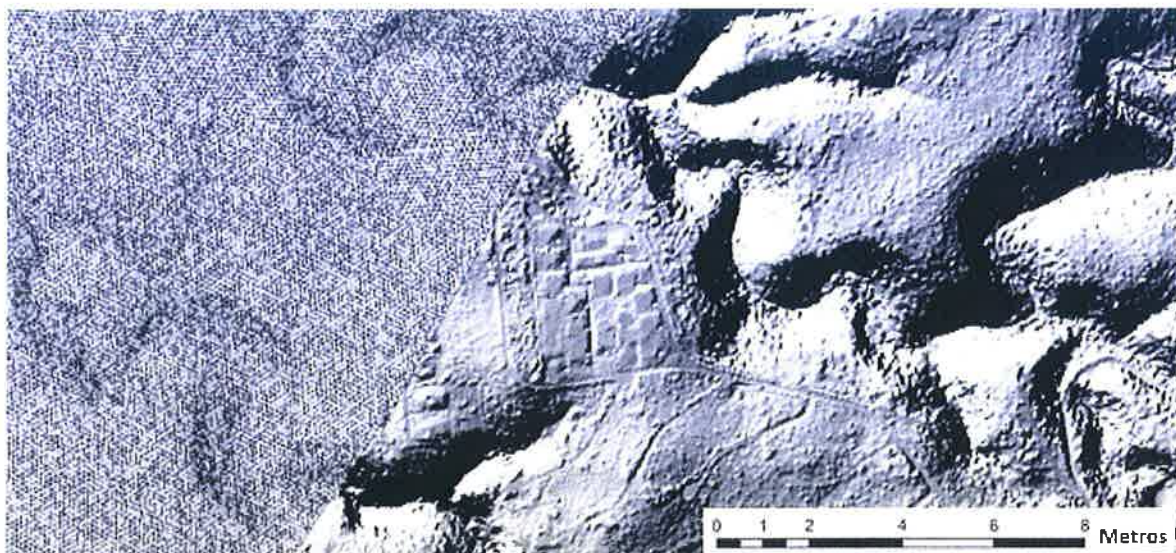
Nº Canal	Caudal (m³/s)	Nº Canal	Caudal (m³/s)
1	28.1	7	33.7
2	4.4	8	17.3
3	8.5	9	86.3
4	9	10	12.9
5	18.5	11	18.0
6	27.4	12	38.5

Tabla 13. Caudales punta procedentes del análisis hidrológico con HEC-HMS para el periodo de retorno T50 años en los 12 puntos de entrada del modelo.

### 2.2.2.2.3. Generar la malla

Se creó la malla que representa el relieve de la zona (vista en 3D) y a su vez almacena todos los datos relativos a las condiciones de contorno y caudales asignados en el modelo. Para ello, en el *menú Malla > estructurada > superficies*, se seleccionaron todas las superficies triangulares anteriormente creadas y se asignaron como número de divisiones el valor 1 (figura 41). Como el área de estudio es bastante extensa, se debe aumentar el tamaño máximo de la malla creada hasta 10 metros, ya que con tamaños menores se produce el colapso del procesado informático.





**Figura 41.** 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.

#### 2.2.2.2.4. Asignación de la rugosidad del terreno (n-Manning)

En Iber, el parámetro rugosidad se asigna mediante el coeficiente de Manning (ya usado anteriormente en la modelación unidimensional con HEC-RAS). Con el *menú rugosidad > usos del suelo*, se escogieron los usos del suelo de la zona y se les asignó las superficies que forman la geometría. Finalmente a cada uso se asignó unos valores de n de Manning de acuerdo a las tabulaciones y guías visuales (USGS) más utilizadas (tabla 14).

Tipo uso del suelo	Valor N-Manning	Tipo uso del suelo	Valor N-Manning
Bosque	0.13	Frutales arbóreos	0.18
Cultivos de cereales	0.05	Mixto urbano	0.09
Agua	0	Campos de golf y zonas ajardinadas	0.04
Viñedos	0.06	Roca desnuda	0.02
Suelo urbanizado	0.08	Cultivos herbáceos	0.042

Tabla 14. Valores de n de Manning utilizados; basados en las tablas del *United States Geological Survey (USGS)*.

#### 2.2.2.2.5. Asignación de las opciones del cálculo (tiempo de cálculo)

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

#### 2.2.2.2.6. Consulta de resultados (módulo post-proceso)

El programa reportó muchos tipos de resultados, pero los fundamentales para este estudio fueron la visualización de mapas de calado y velocidad. Estas capas se pueden variar en su paleta de colores según las preferencias del usuario y realizar una animación de los resultados. Así se generaron los mapas de resultados (ver apartado 3.1.2.2) y pequeñas videgrabaciones (clips de vídeo), muy

útiles para identificar rápidamente las zonas inundables y seguir la dinámica del proceso de inundación.

### **2.3. Metodología de estudio de una configuración hidrogeomorfológica para la red de drenaje**

El objetivo de este estudio es desarrollar un diseño conceptual de una red de drenaje estable y natural en el Pla de Sant Jordi. El fin último de este proceso consiste en sentar las bases para restablecer un drenaje en régimen natural de este espacio, en equilibrio con la dinámica actual.

La herramienta fundamental para el diseño es el *software* Natural Regrade, el cual se basa en los principios de un método patentado, GeoFluv<sup>TM</sup>. En conjunto, constituyen una nueva metodología para llevar a cabo remodelados topográficos como base de restauraciones geomorfológicas actualmente utilizadas en EE.UU. y Australia, y un método relativamente novedoso en España.

El método GeoFluv<sup>TM</sup> y el *software* Natural Regrade han sido utilizados para la restauración geomorfológica de espacios transformados por movimiento de tierras, especialmente minería (Martín Duque y Bugosh, 2013). Sin embargo, existe potencialidad para su uso con otros fines, como el que se desarrolla en este trabajo, en el que la recuperación de una morfología ‘natural’ de canales, en un contexto de un espacio altamente transformado, puede cumplir dos fines: (a) la renaturalización de un espacio altamente transformado; (b) una posible contribución a favorecer el drenaje de una superficie que experimenta problemas asociados a frecuentes inundaciones, problemática en la que se inserta este informe. En el primer caso, sirva comentar que la renaturalización constituye un proceso de enorme trascendencia social y económica en los países más desarrollados, donde precisamente por esa circunstancia, ha ocurrido un proceso de transformación territorial más acusado; en el segundo caso, es preciso considerar que la morfología de los canales fluviales en una cuenca hidrográfica determinada influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación o elevación de la superficie freática por encima del terreno.

#### **2.3.1. El método GeoFluv<sup>TM</sup> y el *software* Natural Regrade**

El método GeoFluv<sup>TM</sup> se basa en los principios de la geomorfología fluvial para diseñar formas de relieve estables (Bugosh, 2000, 2002). Este método, y el *software* Natural Regrade que lo desarrolla, constituyen en la actualidad las herramientas más avanzadas a nivel mundial para abordar la reconstrucción geomorfológica de las restauraciones de espacios afectados por movimientos de tierras. Su fundamento se basa en diseñar formas del terreno tal y como éstas serían, después de haberse formado de manera natural, a lo largo de miles de años.

En los casos en los que la topografía original ha sido modificada, la metodología consiste en diseñar un nuevo relieve basado en la construcción de una nueva red de drenaje. Este nuevo relieve se diseña sobre la base de parámetros geomorfológicos medidos en un sistema similar, cercano a la zona de actuación, que funcione como referente geomorfológico, así como una serie de parámetros obtenidos de la zona objeto de actuación.

#### **2.3.2. Fundamentos teóricos**

El método GeoFluv<sup>TM</sup> persigue la construcción de relieves estables (y heterogéneos), sobre la base de replicar a los relieves naturales, estructurados a partir de un sistema de canales fluviales de distintos órdenes y morfologías. Dichos canales corresponden a las tipologías definidas según la clasificación de Rosgen (1994), en función de toda una serie de parámetros (figura 42).

### 2.3.2.1. Tipología de canales fluviales con potencialidad para su reconstrucción

Las características de los canales que recrea el método GeoFluv™, a través de la aplicación Natural Regrade, se basa en las tipologías correspondientes a dos grupos; los del grupo 1, donde se engloban los canales de tipo A; y el grupo 2 formado por el resto de tipologías de canales según la clasificación de Rosgen (1994) (figuras 42 y 43).

La aplicación Natural Regrade distingue entre estos dos grupos, fisiográficamente diferentes según la pendiente:

- *Canales del grupo 1 o tipo A;* Esta tipología se clasifica por situarse en zonas de pendiente de más del 4 %, cuyo índice de sinuosidad es normalmente menor de 1,2.
- *Canales del grupo 2;* esta tipología correspondería a los canales que no mantienen las características de los canales de tipo A, con pendientes menores de 4 % y cuyo índice de sinuosidad es normalmente mayor de 1,2.

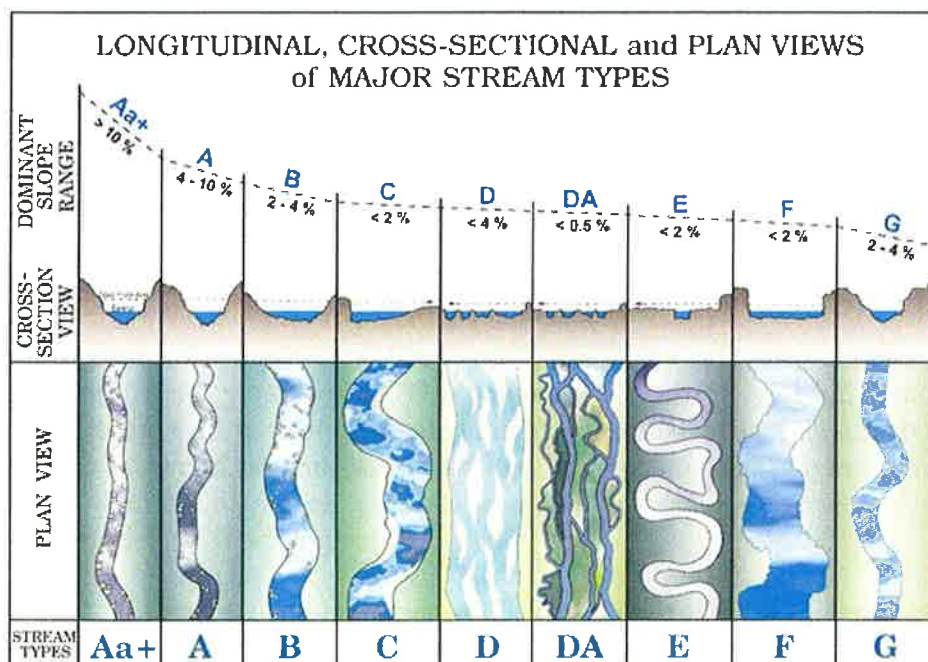


Figura 42. Vista en planta y en sección de la tipología de canales definida por Rosgen (1994).

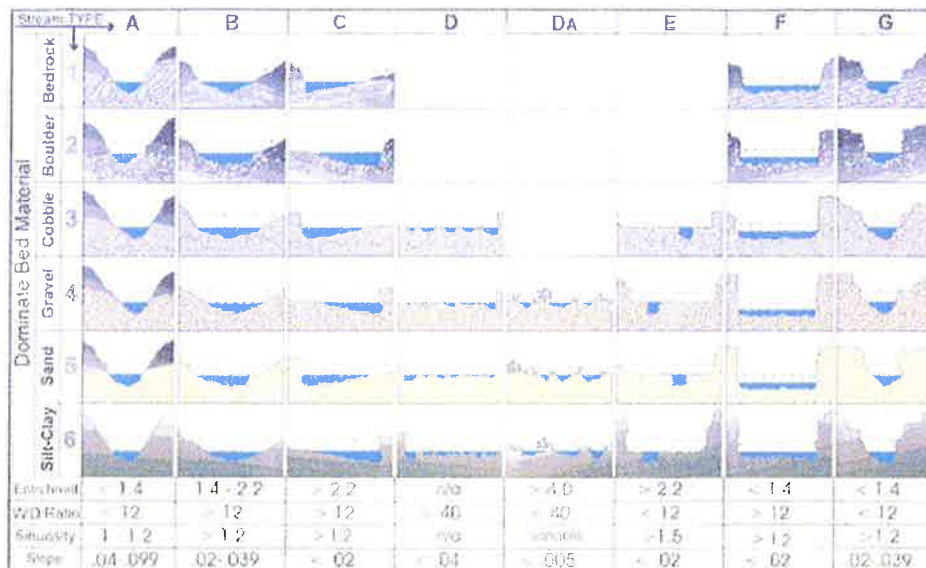


Figura 43. Características más comunes de la tipología de canales fluviales de la clasificación de Rosgen (1994).

En este estudio se recrean los tipos de canales con pendientes inferiores al 4% para diseñar conceptualmente canales aluviales de alta sinuosidad definidos por su relación profundidad/anchura, como por ejemplo los que conforman los sistemas sedimentarios costeros.

### 2.3.2.2. Perfiles transversales de los canales fluviales naturales: el *bankfull*

El *bankfull* se suele traducir como el canal “de aguas llenas”. Una definición comúnmente aceptada fue desarrollada por Dunne y Leopold (1978), quienes definen el *bankfull* como la zona que corresponde a la descarga en la cual el mantenimiento de canal es la más efectiva; es decir, la descarga a la que se mueve el sedimento, formando o eliminando barras de meandro, formando o cambiando curvas y meandros; y en general, lo más importante a efectos de este proyecto, definiendo las características morfológicas del canal.

Para Rosgen (1994), la temporalidad en la que se forma el *bankfull* viene determinada por el pico máximo de descarga que se produce durante varios días en un año y, a menudo relacionado con un periodo de retorno de 1,5 años; si bien esta frecuencia es muy variable en función del contexto climático.

El método GeoFluv<sup>TM</sup> y el *software* Natural Regrade calculan los valores del *bankfull* a partir de los datos de precipitación que generan crecidas ordinarias para cada contexto climático. Sea como fuere, el método permite que éstos puedan ser medidos en campo, y modificados manualmente en el modelo, para adaptar así, al máximo posible, el diseño obtenido con las características de los perfiles transversales de la red fluvial natural que se trata de replicar (ver apartado I.2. *Parámetros de entrada* de Anexos).

Para los canales mareales, el término *bankfull* no sería aplicable *sensu stricto*, al estar sujetos éstos a procesos mareales; no obstante, se trataría de replicar perfiles transversales de canales fluviales equivalentes.





Figura 44. A, Detalle de un canal mareal actual y su perfil transversal; y B, vista general del sistema, (ambos en el estuario de Urdaibai, Bizkaia).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados del análisis de la peligrosidad por inundaciones

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes procesos y métodos usados en el análisis de la peligrosidad por inundaciones asociadas a la escorrentía superficial. Se exponen en el mismo orden que se estructuraron en el apartado de metodología, donde ya se fueron mostrando algunos de los resultados parciales de los largos procesos metodológicos. Se dividen los resultados en dos grandes apartados (métodos hidrológicos e hidráulicos) que a su vez se sub-dividen en sus apartados correspondientes.

##### 3.1.1. 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 precipitaciones máximas en escorrentía superficial (lluvia en caudales), empleando el método agregado semidistribuido del hidrograma unitario con la aplicación HEC-GeoHMS.

##### 3.1.1.1. Resultados del análisis estadístico de precipitaciones máximas diarias

En la Tabla 15 se muestra la elección del mejor ajuste (función + estimador) 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.

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

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

		2	SQRT + ML	GEV + ML	GEV + PWM
		3	GEV + MOM	Gumbel + PWM	
	<i>Datos Completos</i>	1	Log PEARSON III	GEV + PWM	
		2	SQRT + ML	Log PEARSON III	
		3	GEV + MOM	Gumbel + PWM	

Tabla 15. Selección de los modelos estadísticos (función + método) con los mejores ajustes en el test de bondad, mejor ajuste gráfico y el seleccionado, para las series de datos totales y completos de las diferentes estaciones pluviométricas del Pla de Sant Jordi.

Conviene aclarar que para cada estación se pueden encontrar dos tipos de series datos debido a la falta de información en las series (para ciertos meses o días no hay registros de precipitaciones, están incompletos): los datos totales son aquéllos en los cuales no se han eliminado los meses o días en blanco (sin dato), habiéndose dejado tal cual y contando con ellos; los datos completos son aquéllos en los se han quitado aquellos meses o días en los que falta algún dato en el registro.

Una vez que se obtuvieron los resultados del análisis para la obtención del mejor ajuste, en la tabla 16 se muestran 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.

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

Tabla 16. Cuantiles de precipitación máxima en 24 para diferentes periodos de retorno, calculados con las series de datos totales y completos, para las diferentes estaciones del Pla de Sant Jordi.

### 3.1.1.2. 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. Los resultados del análisis de la duración y la distribución temporal de dichas precipitaciones, ha permitido obtener como resultado que predominan los pluviogramas y hietogramas (en mm/h) sesgados a la derecha (final del día y final del evento) como modelo representativo del conjunto de esos datos.

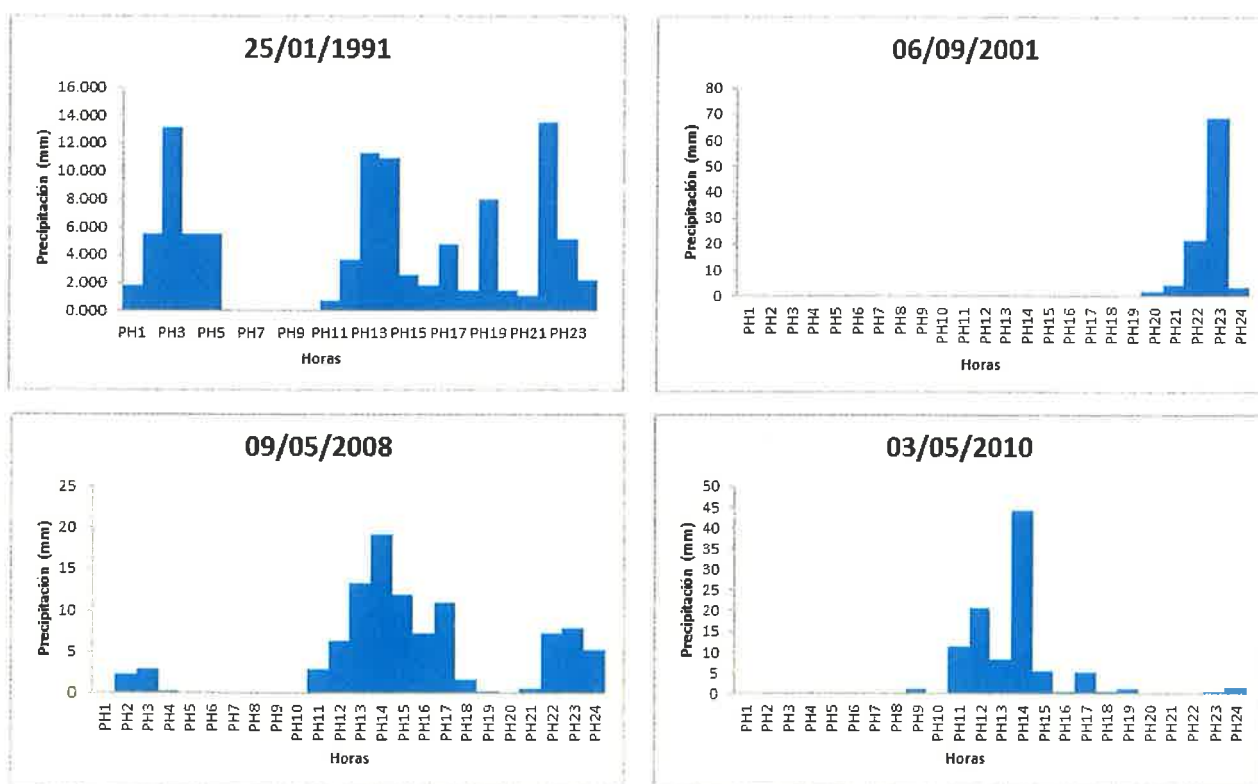


Figura 45. Hietogramas de precipitación de los cuatro eventos más importantes de las últimas décadas, de las que se dispone de discriminación horaria de la precipitación.

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.

### 3.1.1.3. Resultados de la elaboración de capas con ArcGIS

Las figuras 46, 47, 48 y 49 muestran las cuatro capas principales generadas con ArcGIS (pendientes, formaciones superficiales, geomorfología, texturas del suelo y usos del suelo) que después fueron usadas por los programas específicos de hidrología de superficie. 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 en formato ArcMap.

# MAPA DE PENDIENTES RECLASIFICADAS DEL PLA DE SANT JORDI



**LEYENDA**

**Reclass slope**

	Pendientes $\geq 3\%$
	Pendientes $< 3\%$

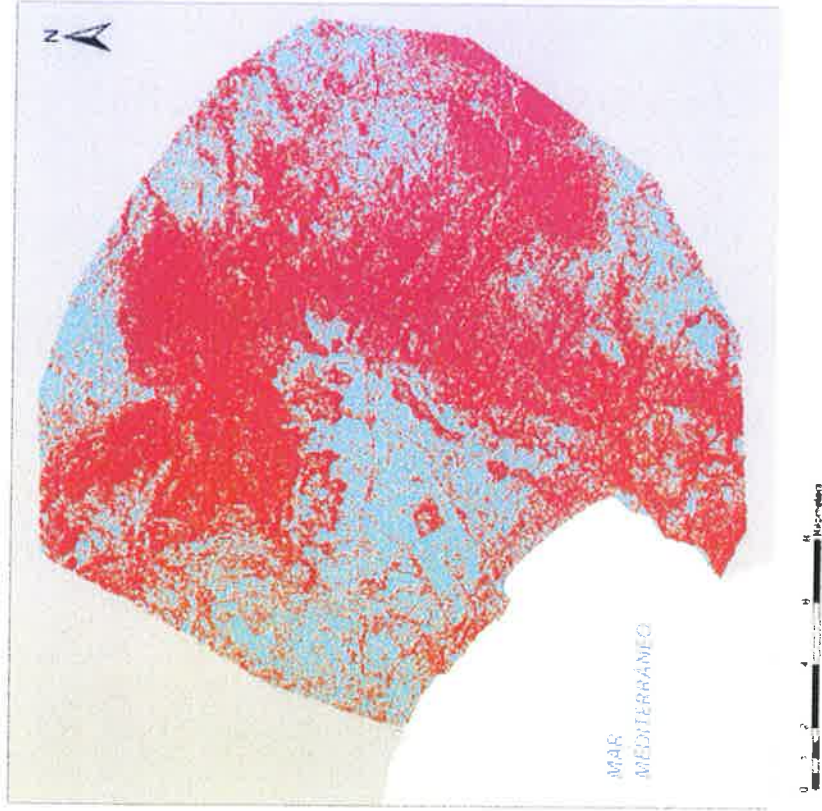
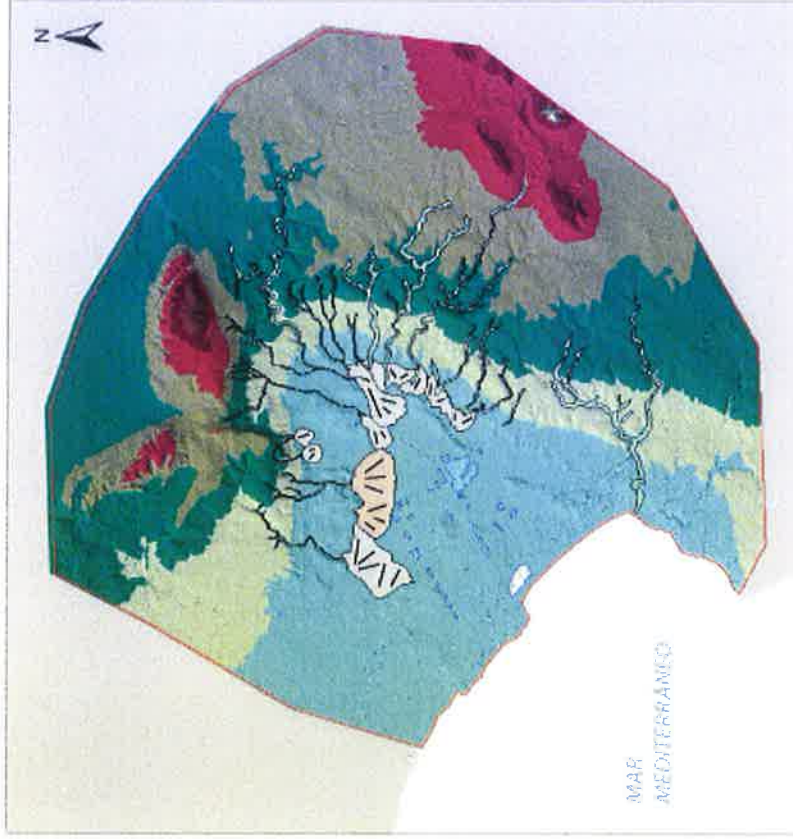


Figura 46. Mapa de pendientes reclasificadas en dos clases de acuerdo a un umbral del 3 %.

# MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA ZONA PLA DE SANT JORDI



## LEYENDA

### Geomorfología

- Aluviales
- Depósitos de vertientes (conos, plácids)
- Fondos de valle (limos y arenas con grava)
- Fondos húmedos o anchamientos temporales
- Lagooor: Salines de Fontanelles

Figura 47. Mapa de geomorfológico y de formaciones superficiales de incidencia textural en los suelos.



# MAPA DE GRUPOS TEXTURALES PARA EL PLA DE SANT JORDI

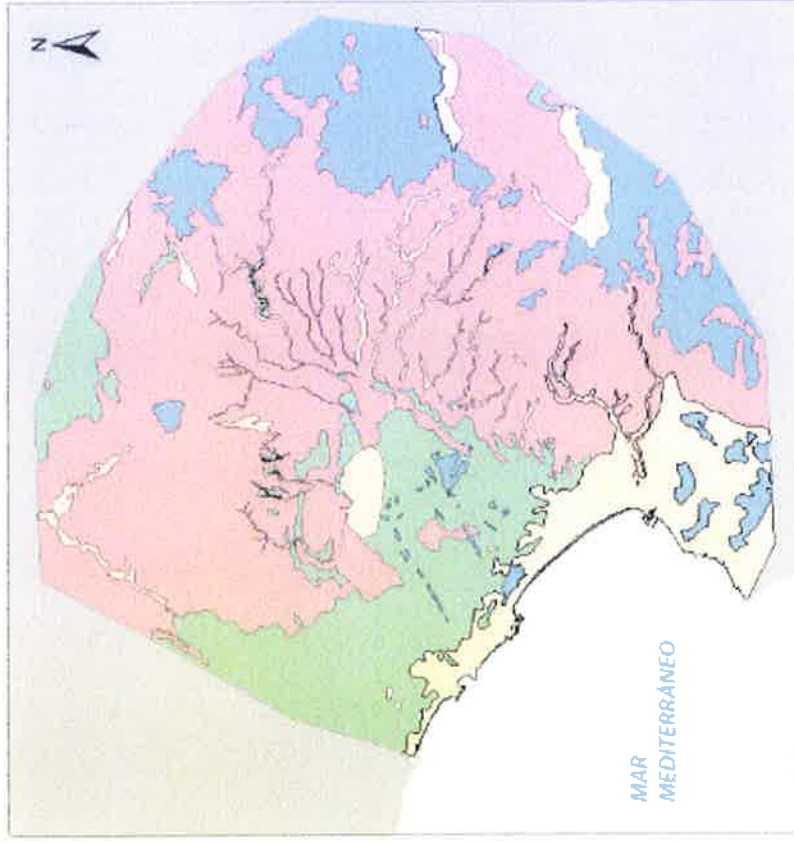
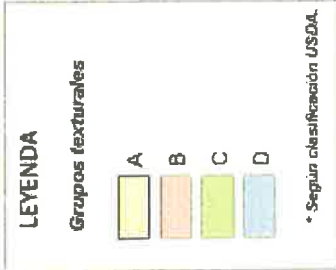
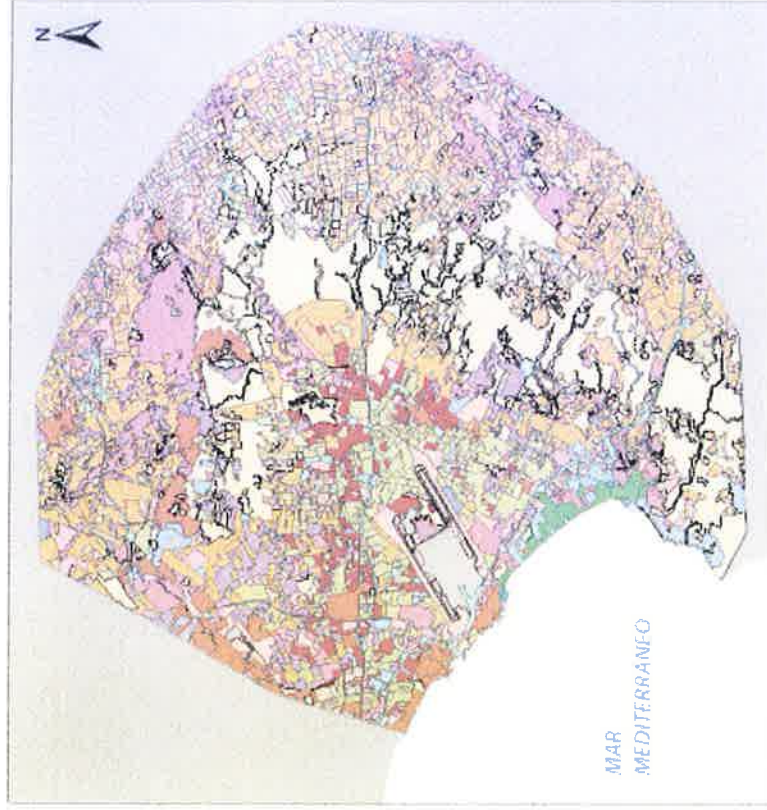


Figura 48. Mapa de grupos texturales de suelos reclasificados de acuerdo a las 4 clases del SCS, de acuerdo a su drenaje.

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



**LEYENDA: usos del suelo**

	Aeropuerto		Mosaico de cultivos mados
	Acupuntura y alfarería		Oliveras
	Bosques coníferos		Frutales (almendros)
	Cultivos acuáticos		Frutales (apricos)
	Cultivos hortícolas regados		Frutales (durillo)
	Cultivos de cereales y leguminosas		Terreno urbano
	Frutales (almendros)		Tierras de labor
	Frutales (apricos)		Viveros
	Humedales (zonas pantanosas)		Zonas industriales y comerciales
	Montaña boscosa		Zonas portuarias
			Zonas verdes urbanas

Figura 49. Mapa de usos y ocupaciones del suelo de acuerdo a las clases establecidas por el SCS o equivalentes.

### 3.1.1.4. Resultados del modelo de cuenca mediante HEC-GeoHMS

En este apartado se exponen los resultados que se generaron con la extensión HEC-GeoHMS, post-procesados con el paquete informático HEC-HMS, y cuyo resultado final es una salida gráfica que muestra delimitadas las diferentes subcuencas para el Pla de Sant Jordi (figura 50).

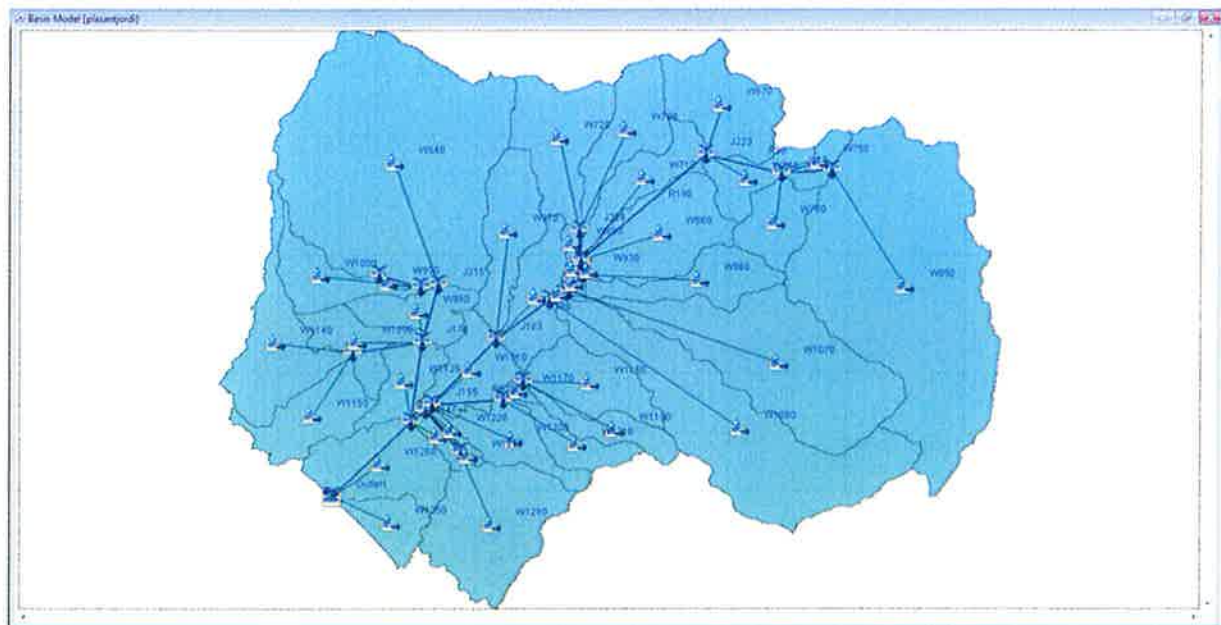


Figura 50. Imagen de pantalla del modelo de cuenca realizado con HEC-GeoHMS para la cuenca hidrográfica drenante al Pla de Sant Jordi.

En la figura 50 se puede apreciar como el programa genera las cuencas dimensionadas y los tramos que componen los ríos que las atraviesan. Si se observa la imagen con más detalle, se puede ver que hay ciertos símbolos internos de HEC-HMS en las subcuencas y en los tramos de propagación del río.

Una vez definidos los parámetros que componen el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control, los resultados de la ejecución de la simulación en HEC-HMS fueron los caudales punta para cada una de las confluencias o puntos de control (*junctions*), generados para los periodos de retorno de T50, T100 y T500 años (tabla 17).

<i>Caudal Punta (m<sup>3</sup>/s)</i>			
	<i>T50</i>	<i>T100</i>	<i>T500</i>
<b>J212</b>	69.9	<b>J212</b> 75.2	<b>J212</b> 91.9
<b>J226</b>	30,9	<b>J226</b> 37.2	<b>J226</b> 54.1
<b>J209</b>	94.6	<b>J209</b> 108.6	<b>J209</b> 149.4
<b>J202</b>	97.9	<b>J202</b> 112.8	<b>J202</b> 156.1
<b>J195</b>	95.5	<b>J195</b> 110.2	<b>J195</b> 155.4
<b>J180</b>	96.5	<b>J180</b> 122.6	<b>J180</b> 165.9

<b>J177</b>	102.9	<b>J177</b>	122.6	<b>J177</b>	198.2
<b>J183</b>	103.6	<b>J183</b>	122.6	<b>J183</b>	205.4
<b>J152</b>	30.2	<b>J152</b>	36.5	<b>J152</b>	53.2
<b>J147</b>	159.1	<b>J147</b>	185.5	<b>J147</b>	289.7
<b>J188</b>	3.9	<b>J188</b>	4.3	<b>J188</b>	5.2
<b>J215</b>	41.2	<b>J215</b>	48.3	<b>J215</b>	61.1
<b>J174</b>	64.6	<b>J174</b>	74.7	<b>J174</b>	93.7
<b>J139</b>	28.1	<b>J139</b>	32.3	<b>J139</b>	42.6
<b>J134</b>	164.2	<b>J134</b>	191.2	<b>J134</b>	295.5

Tabla 17. Caudales punta (m<sup>3</sup>/s) obtenidos del programa HEC-HMS para las confluencias y puntos de control establecidos en el Pla de Sant Jordi.

El programa también nos proporciona resultados de los hidrogramas de forma gráfica, para cada una de las subcuencas o de las confluencias (*junctions*) establecidas en la cuenca (Figuras 51 a 53).

En la Figura 51 se puede ver el resultado gráfico de la subcuenca que contiene el punto final de desagüe, es decir, la desembocadura al mar. Para el evento de precipitación con un periodo de retorno de T50 años, se obtiene el hietograma (en la parte superior de la imagen) y el hidrograma de avenida (parte inferior).

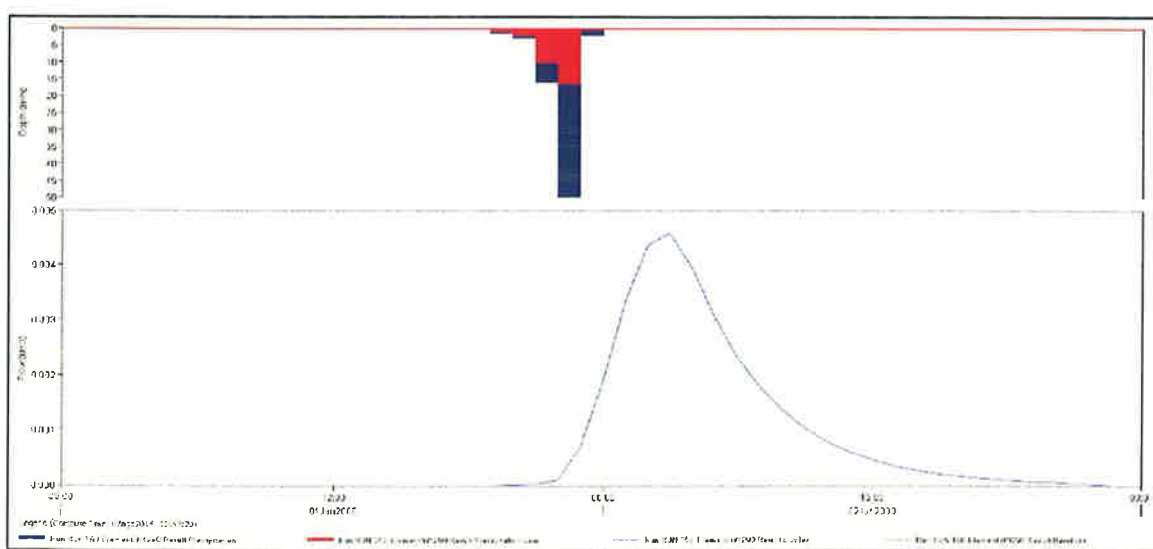


Figura 51. Hietograma e hidrograma de la subcuenca que contiene el punto final de desagüe (el mar) para la cuenca del Pla de Sant Jordi obtenido mediante el programa HEC-HMS.

También es posible obtener como resultados las gráficas de los hidrogramas de crecida para cada uno de las confluencias y puntos de control (*junctions*) definidos.

- 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 (figura 52).

- Para el punto de desagüe final de toda la cuenca del Pla de Sant Jordi, la desembocadura al mar (Figura 53).
- \*Ambos ejemplos corresponden al periodo de retorno T50 años del evento estudiado.

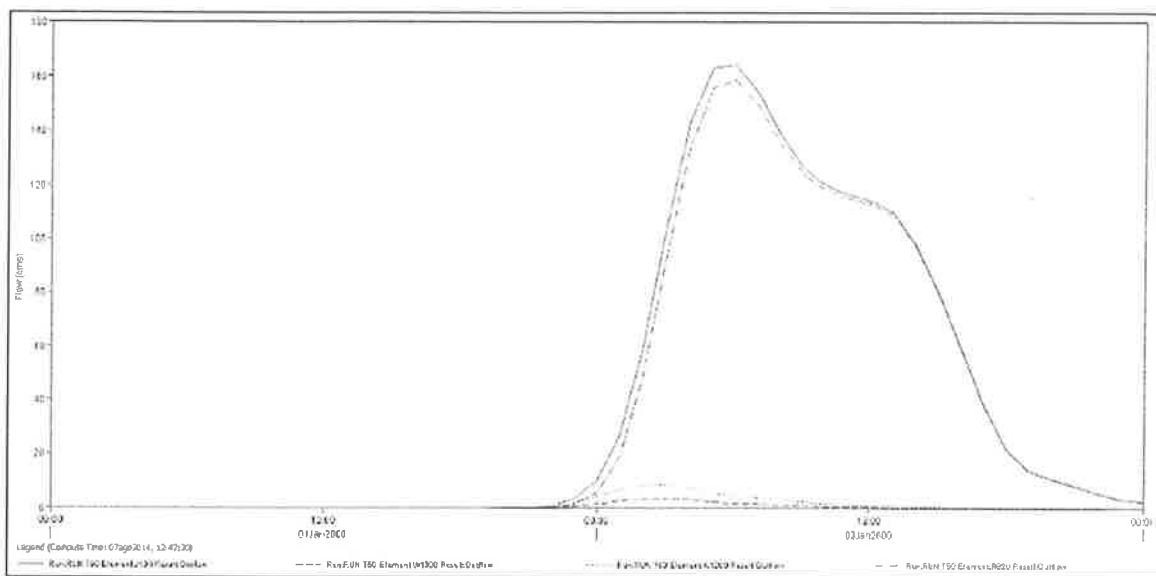


Figura 52. Hidrograma de crecida T50 años obtenido mediante el programa HEC-HMS para el último *junction* de confluencia antes de la desembocadura al mar.

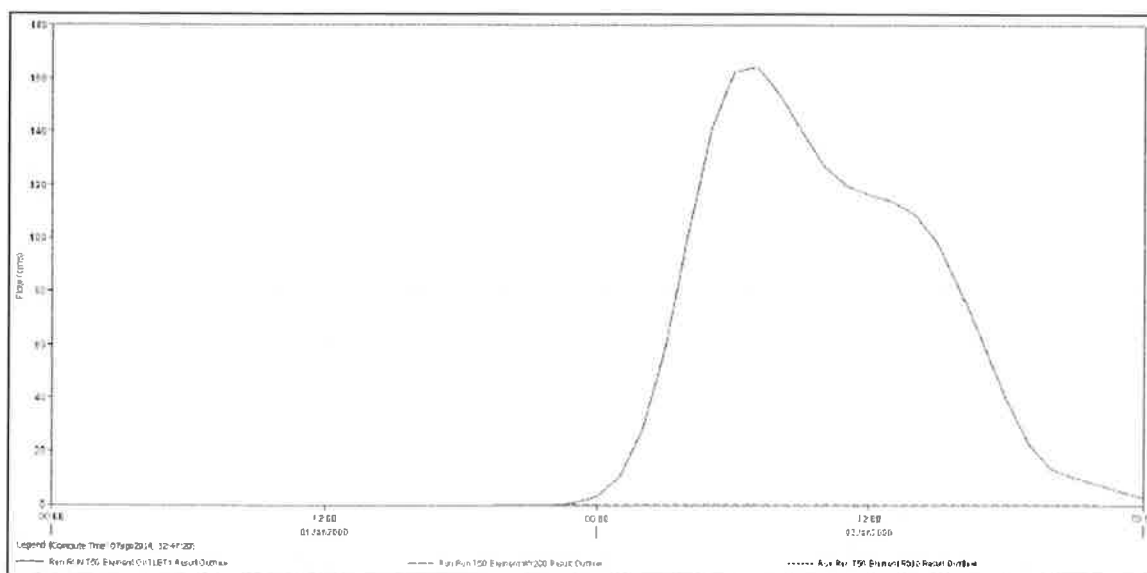


Figura 53. Hidrograma de crecida T50 años obtenido mediante el programa HEC-HMS para el punto de desagüe final de toda la cuenca del Pla de Sant Jordi.

En la figura 54 se presenta un extracto de la tabla con los caudales correspondientes al periodo de retorno T50 años para el punto final de desagüe de la cuenca del Pla. En ella puede apreciarse su evolución a lo largo del tiempo. Los resultados son para un periodo de tiempo de 24 horas (1 día) y se generan datos en intervalos de 1 hora. El caudal punta observado se produciría el segundo día a las 6:00 horas, con un total de 164.2 m<sup>3</sup>/s.

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	7.3	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 54. Captura de pantalla con la tabla con los caudales correspondientes al punto de desagie de la cuenca.

### 3.1.2. Resultados del análisis hidráulico

Siguiendo los epígrafes definidos anteriormente en el apartado de metodología, se muestran a continuación los resultados obtenidos mediante los llamados métodos hidráulicos, concretamente de la aplicación de los programas HEC-RAS e Iber 2D.

#### 3.1.2.1. Resultados del análisis hidráulico unidimensional HEC-RAS

En la figura 55 se muestra el resultado dado para el cálculo unidimensional realizado con el programa HEC-RAS para el caudal de periodo de retorno T500 años, como el más representativo y coherente de los obtenidos para los diversos periodos de retorno.

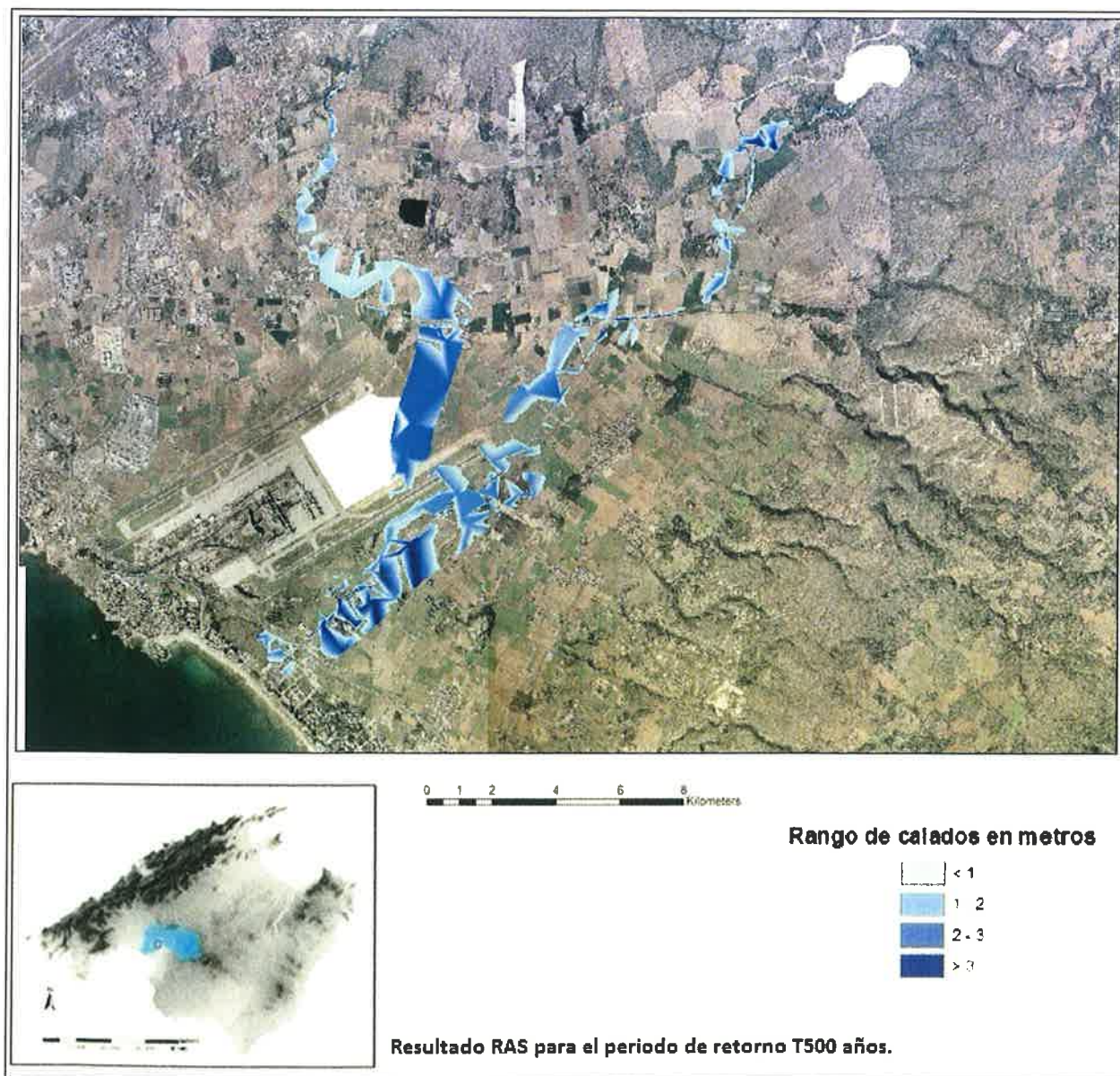


Figura 55. Resultado gráfico representativo del calado obtenido con el programa HEC-RAS para el periodo de retorno de T500 años en la zona central de la cuenca del Pla de Sant Jordi.

### 3.1.2.2. Resultados del análisis hidráulico bidimensional IBER 2D

Las figuras 56 a 59 muestran los resultados dados por el programa Iber 2D para el análisis hidráulico bidimensional de la cuenca del Pla de Sant Jordi, con resultado para el periodo de retorno de T50 años .

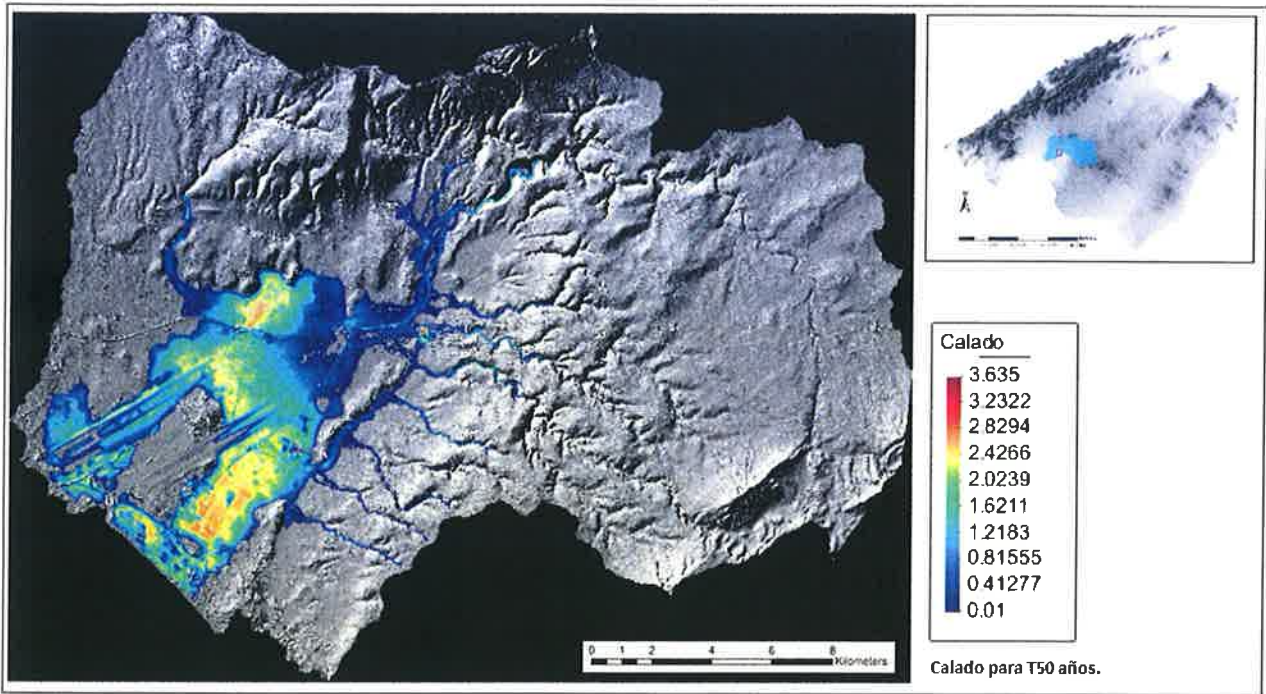


Figura 56. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T50 años, con indicación de los calados máximos alcanzados (m).

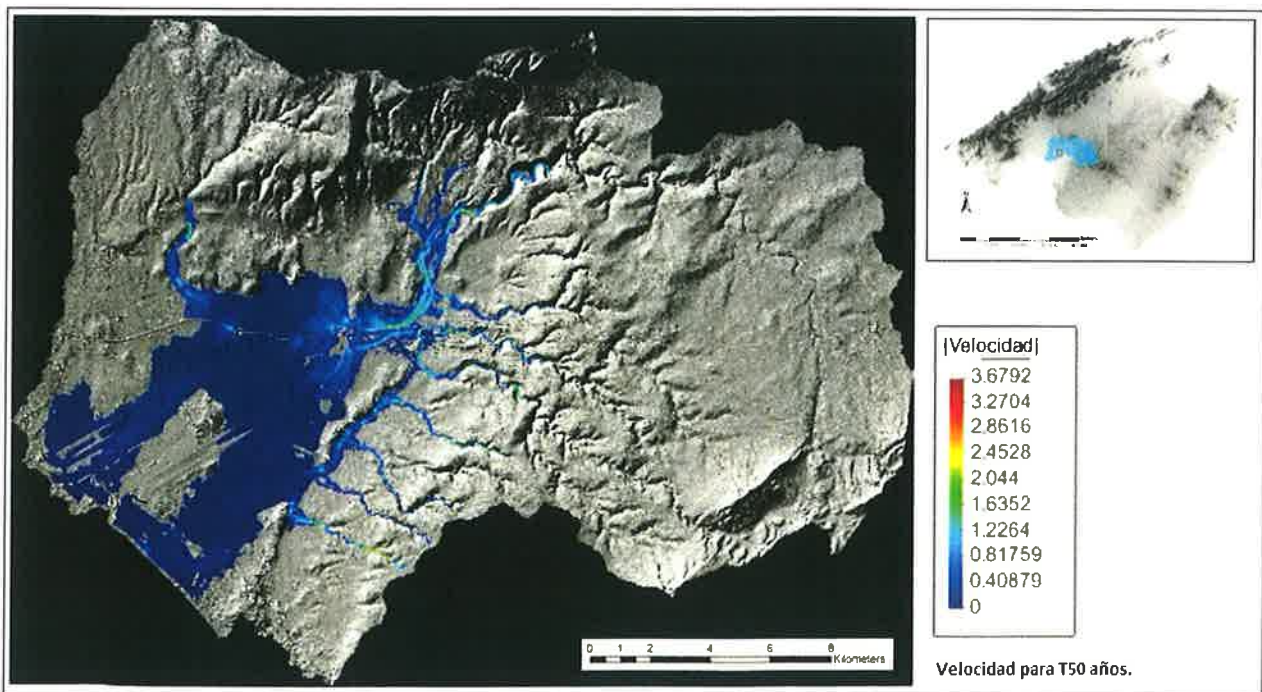


Figura 57. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T50 años, con indicación de las velocidades máximas alcanzadas (m/s).



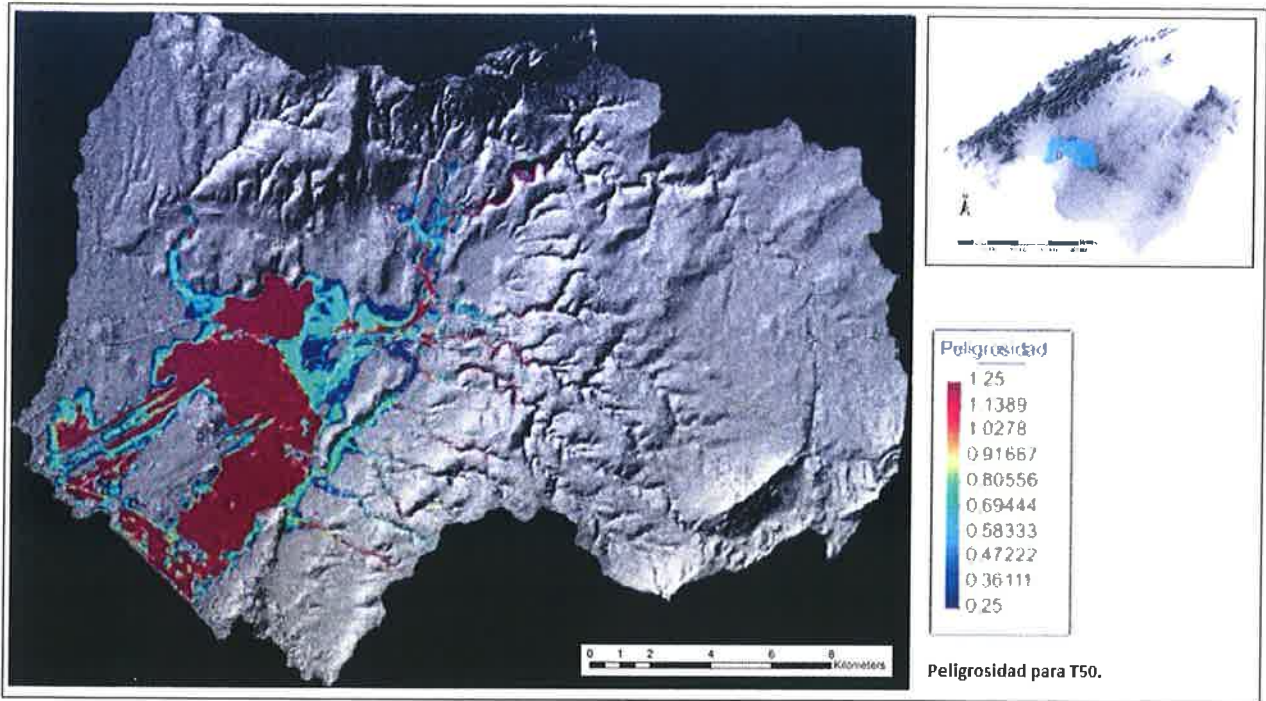


Figura 58. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T50 años, con indicación de la peligrosidad\* asociada a la integración del calado y la velocidad.

\*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].

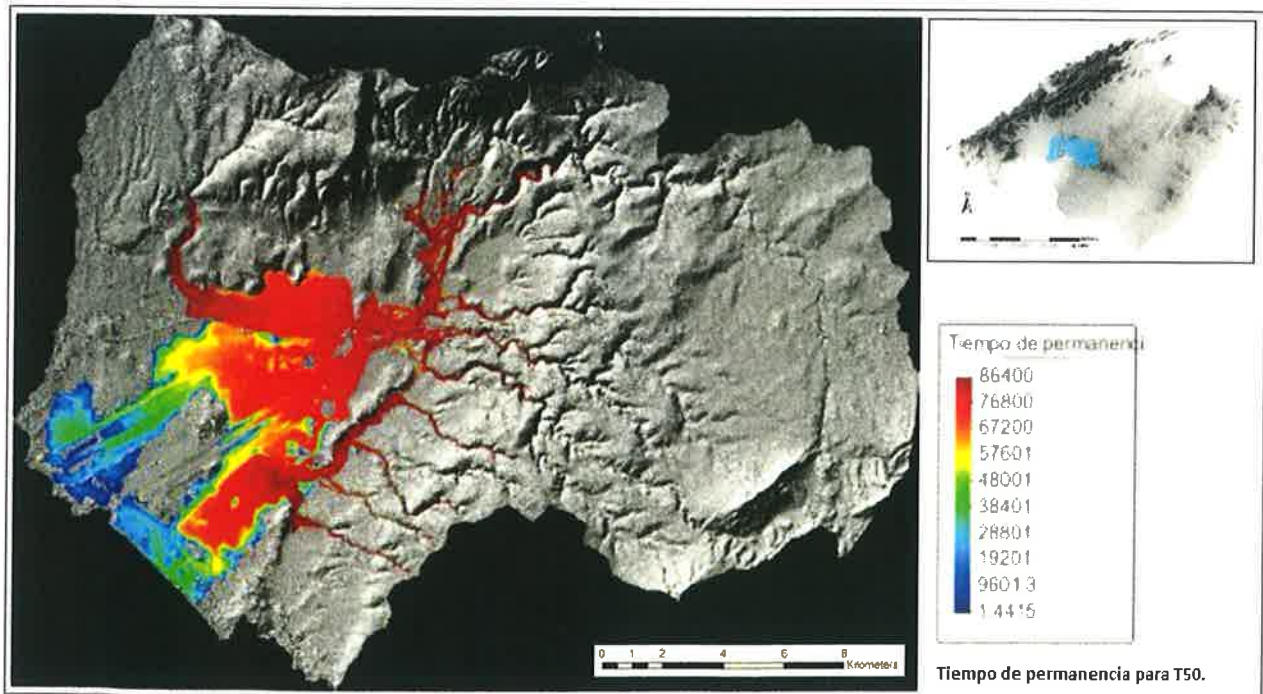


Figura 59. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T50 años, con indicación del tiempo de permanencia de la inundación (en segundos).

Para el periodo de retorno T500 años solo se muestran, a modo de ejemplo, las imágenes del valor de calado del agua y de la velocidad (figuras 60 y 61).

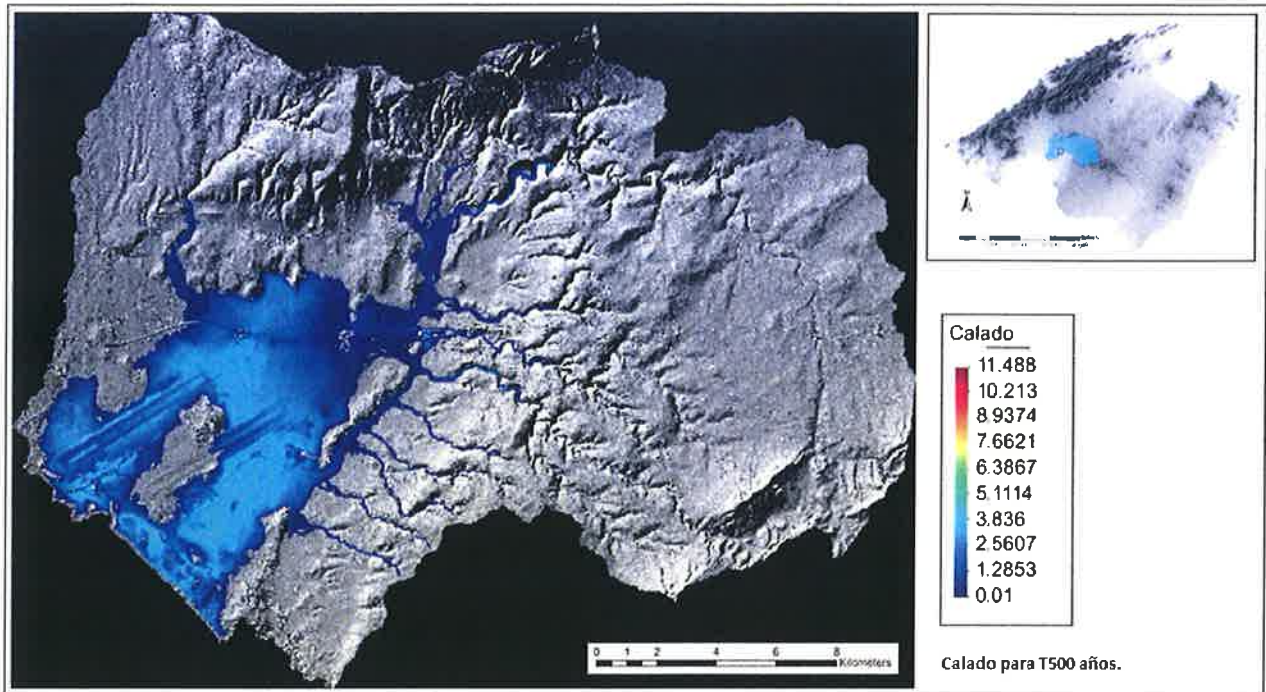


Figura 60. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T500 años, con indicación de los calados máximos alcanzados (m).

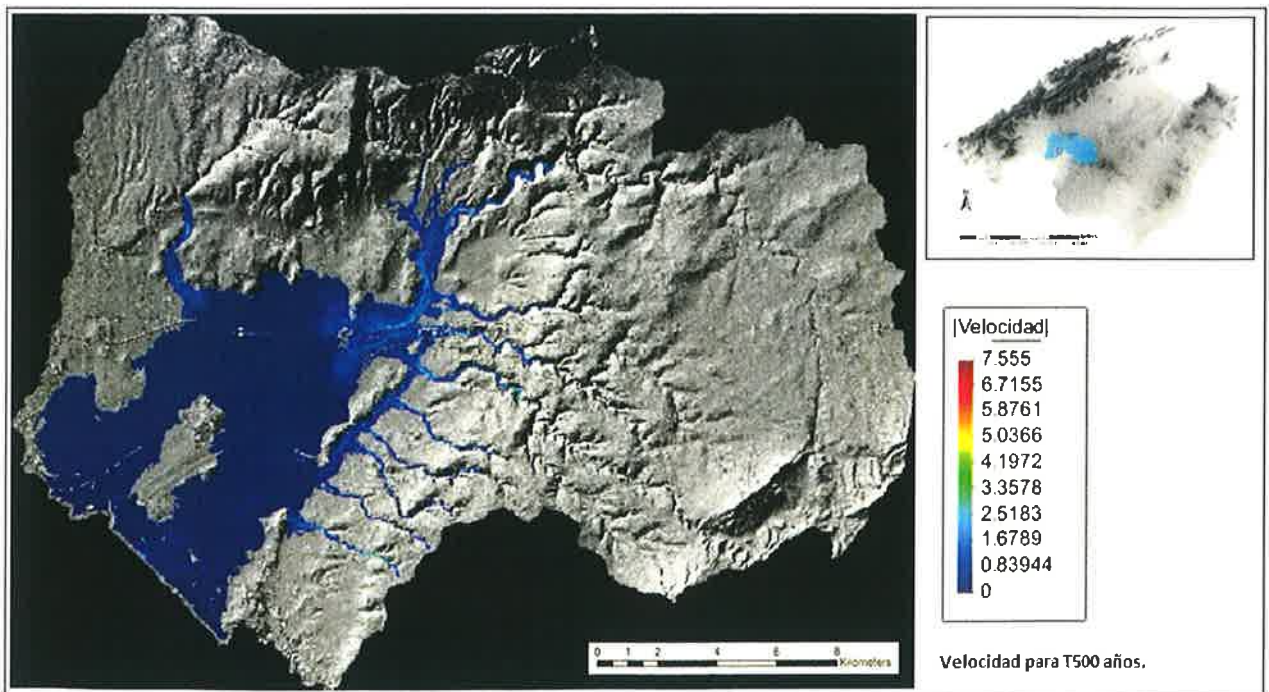


Figura 61. Mapa general de las zonas inundables con la avenida de T500 años, con indicación de las velocidades máximas alcanzadas (m/s).

### 3.2. Resultados de la propuesta de renaturalización hidromorfológica de la red de drenaje

Este trabajo ha pretendido tener un carácter demostrativo e idea general, y no a nivel de proyecto construible o ejecutable. Por este motivo, esta metodología se ha desarrollado y aplicado únicamente en un sector concreto de todo el Pla de Sant Jordi.

El área escogido para llevar a cabo un diseño ‘demostrativo’ de la aplicación comprende 600 hectáreas y está situado en la zona NW del conjunto de la llanura del Pla de Sant Jordi, junto al aeropuerto de Palma de Mallorca. En concreto, la zona de actuación está limitada al Sur por el aeropuerto de Palma y al norte está atravesada por la carretera Ma-15, que cruza la isla de Este a Oeste. Este espacio ha sido elegido por constituirse como un área donde la red de drenaje está alterada antrópicamente por una red de acequias y por su situación, circundante al aeropuerto de Palma (ver figura 62).

#### 3.2.1. Características del medio físico relevantes para el diseño de la reconstrucción geomorfológica

Para el estudio y determinación de los parámetros geomorfológicos necesarios para el diseño de los nuevos canales fluviales en esta zona se precisa de la información cartográfica de la topografía, así como del coeficiente de escurrimiento.

Los usos del suelo que se desarrollan en este entorno son campos de cultivo en parcelas, con caminos y carreteras que las conectan, junto a pequeñas edificaciones.



Figura 62. La zona elegida para desarrollar el proyecto demostrativo, sobre ortofoto del área de estudio.

### 3.2.1.1. Geología

Los materiales que caracterizan el sustrato del área de estudio son de dos tipos, que a su vez conforman dos grupos: por un lado, limos arcillosos con materia orgánica (Pleistoceno Superior), grupo 1; y grupo 2, limolitas y arcillas rojas y cantos de calizas (Holoceno). (Mapa geológico IGME, PALMA 698 [38-27]) (ver figura 63).

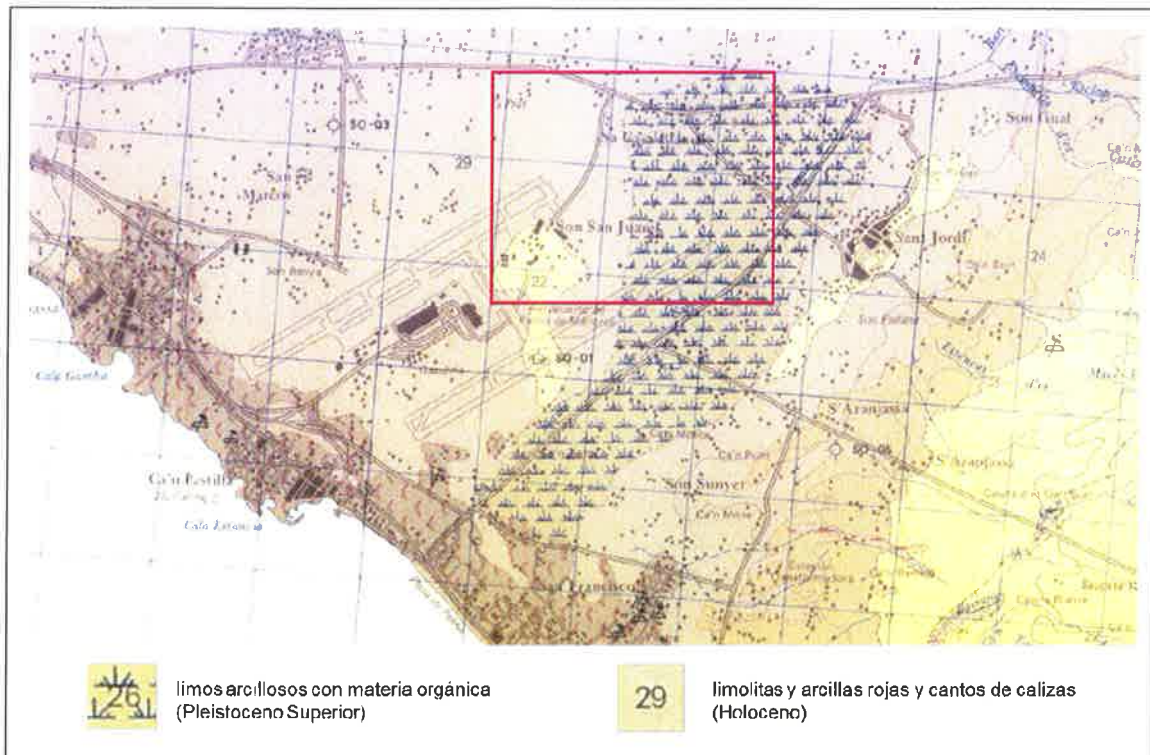


Figura 63. Mapa geológico simplificado del Pla de Sant Jordi. Delimitado con línea roja la zona objeto de estudio en la que se encuentran los materiales limos arcillosos con materia orgánica (Pleistoceno Superior) y limolitas y arcillas rojas y cantos de calizas (Holoceno).

### 3.2.1.2. Geomorfología

El área de estudio es una típica llanura costera, plana, que ha mantenido la influencia del mar en condiciones ‘naturales’, pero que en los últimos siglos ha sido ampliamente transformada por la acción antrópica. De manera dominante, esta transformación ha consistido, mayoritariamente en ganar terreno al mar, que posteriormente ha sido ocupado por actividades y usos antrópicos. Como corresponde a esas características, la topografía dentro de las 600 hectáreas objeto de diseño es muy plana, con cotas máximas de en torno a 6 m.s.n.m y en torno a 1 m.s.n.m. de cota mínima (ver figuras 64 y 65).

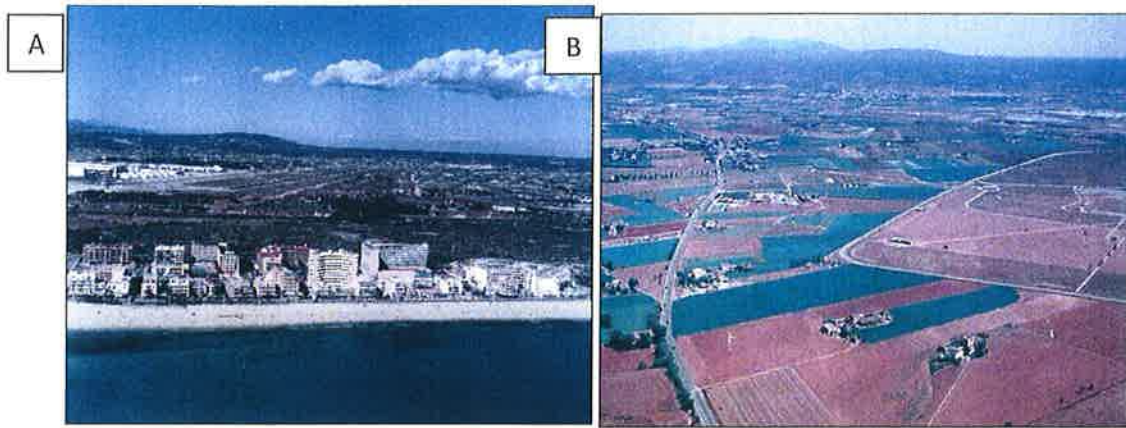


Figura 64. A, topografía muy plana, sin orografía reseñable, y B, campos de cultivo sobre materiales limosos y arcillosos, que caracterizan el espacio donde se sitúa el área de actuación.

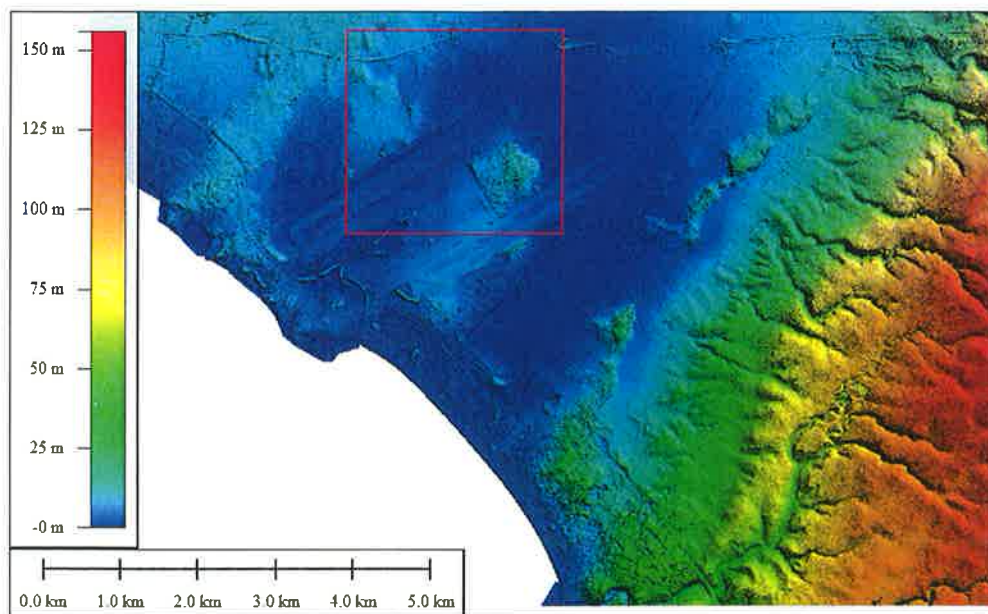


Figura 65. Representación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que muestra la altitud de la zona objeto de actuación. El cuadro rojo muestra el límite de la zona sobre la que se efectuará el diseño.

### 3.2.1.3. Hidrología

El drenaje dentro de la zona que circunda al aeropuerto, y más concretamente en la zona de actuación, está dirigido por un conjunto de acequias artificiales que desaguan la escorrentía de todo este entorno. Estas acequias tienen un trazado rectilíneo y una sección transversal trapezoidal, y en su zona situada más al sur se conectan con un desagüe subterráneo que cruza el aeropuerto. El trazado se puede observar en la figura 66.

Estas acequias son la evolución histórica reciente de una red de drenaje artificial establecida a mediados del siglo XIX para evacuar el agua del Pla hacia el mar (figura 04; Rosselló i Verger V.M.,2000).



Figura 66. Principales acequias que drenan la escorrentía en la zona de estudio, con trazado rectilíneo. Estas direcciones ya existentes del drenaje se utilizan para establecer las directrices de los nuevos canales, con el fin de adaptarse al máximo al drenaje ya existente.

En la figura 67 se puede observar la evolución histórica reciente, desde mediados del siglo XX, experimentada por la red de drenaje de toda esta zona. En dicha evolución puede comprobarse el trazado rectilíneo de las acequias, desde que comenzó a construirse el aeropuerto, si bien su origen es mucho anterior.

En este contexto, en este estudio se propondrá un nuevo diseño para esta red de acequias que constituyen el sistema de drenaje de la escorrentía de todo este entorno. En concreto, el trazado rectilíneo se ‘modificará’ a otro meandriforme mediante la herramienta Natural Regrade. Todo ello para obtener trazados más naturalizados, eficientes en el drenaje superficial de la zona y estables geomorfológicamente a largo plazo.



Figura 67. Evolución temporal de la red de drenaje de la zona de estudio, en la que se pueden observar las acequias que canalizan la escorrentía (Visor IDEIB).

### 3.2.3. Análogo natural y sistema geomorfológico de referencia

Este informe desarrolla una propuesta que plantea, a nivel conceptual, la reconstrucción de una red de drenaje naturalizada, con potencialidad para contribuir a favorecer el drenaje de todo este sector. Para ello se precisa de la búsqueda de un sistema geomorfológico de referencia o análogo natural actual, que sirva como posible modelo a reproducir.

La búsqueda del ya mencionado ‘sistema geomorfológico’ de referencia, útil como modelo para la reconstrucción geomorfológica, implica el estudio previo de las características fisiográficas y litológicas de la zona a reconstruir. La información cartográfica utilizada para el estudio, geológica y topográfica, ha permitido determinar qué sistema geomorfológico presenta las mayores similitudes con el área objeto de restauración. En este sentido, las características territoriales estudiadas, que marcan las directrices para obtener dicho sistema de referencia, han sido las siguientes:

- Características físicas de los materiales. Deben ser iguales o muy similares a los que constituyen la llanura mareal del Pla de Sant Jordi, sobre la que se sitúa el área objeto de actuación.
- Características fisiográficas. De igual modo, es necesaria la máxima similitud entre la zona a restaurar o modelizar, la red de drenaje asociada a ella, y el referente que se ha de utilizar como modelo geomorfológico.
- Características climáticas. Deben ser iguales o muy similares a las que dominan en la zona a modelizar.

Una vez localizados los lugares que cumplen estas condiciones, se determina el más apropiado, a partir del cual se obtendrán los parámetros necesarios para desarrollar el modelo.

#### 3.2.2.1. Sistema empleado como referente

El ‘sistema geomorfológico’ que se ha empleado como referencia para replicar la nueva red de drenaje corresponde a la bahía de Alcudia, en la costa noreste de la isla de Mallorca. Es de este sistema del que se han tomado los datos correspondientes a la red de drenaje o a las características morfométricas de los canales (ver apartado *I.2.2. Parámetros obtenidos a partir del referente geomorfológico de Anexos*).

Los materiales que podemos encontrar en dicho referente se dividen en dos grupos: por un lado materiales limosos con materia orgánica (A) y por otro lado limolitas y arcillas rojas y cantos de calizas (B), ambos pertenecientes al Holoceno (Mapa geológico IGME, INCA-671 (39-26)). Todo ello se puede observar en la Figura 68.

Siendo estos materiales, fisiografía y clima similares a los de la zona de actuación, se puede concluir que los datos que se obtengan de este contexto geológico son aplicables en el modelo (la forma de obtención de los datos se explica en el apartado *I.2.2. Parámetros obtenidos a partir del referente geomorfológico de Anexos*).



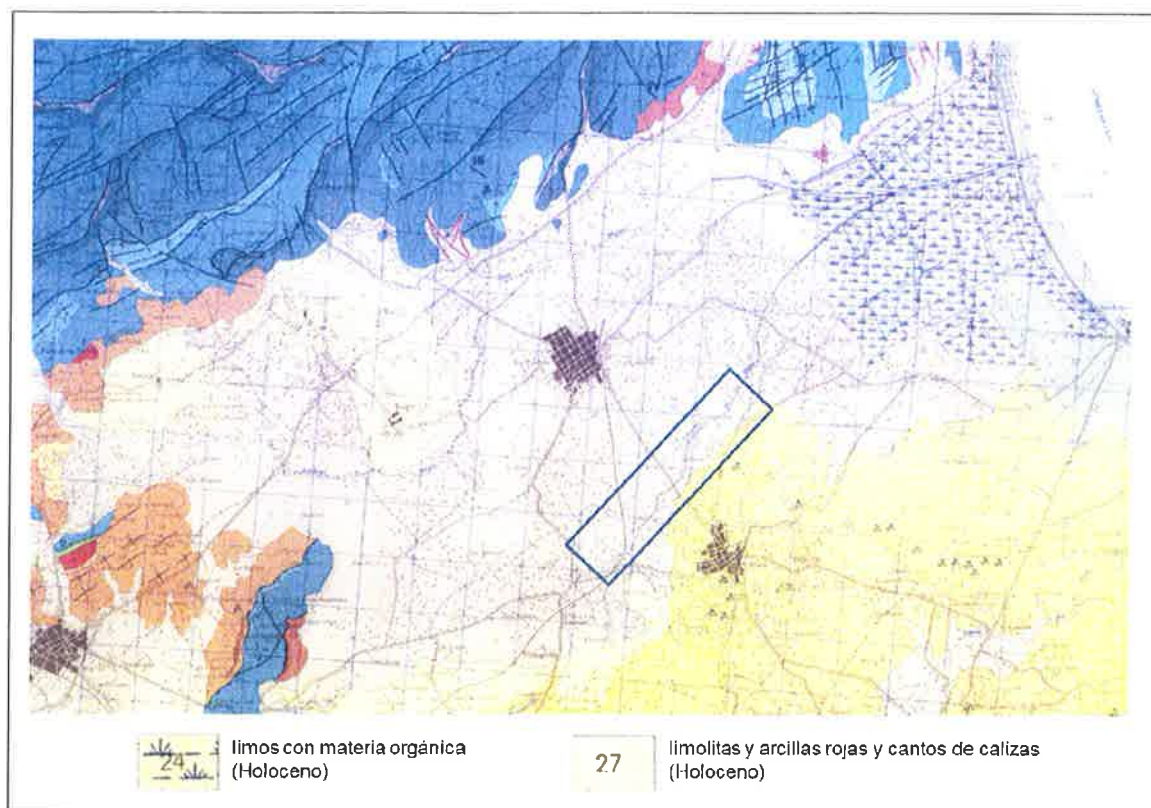


Figura 68. Mapa geológico simplificado de la zona de Alcuía utilizada como referente geomorfológico, donde se encuentran los materiales limos con materia orgánica (Holoceno) y B; limolitas y arcillas rojas y cantos de calizas (Holoceno). Delimitado con línea azul la zona donde se tomaron datos de campo.

### 3.2.2.2. Parámetros obtenidos para aplicar el modelo

La aplicación *Natural Regrade* precisa de una serie de cuantificaciones o datos que corresponden a la topografía de partida de la zona de actuación, más una serie de parámetros obtenidos del mismo lugar sobre el que se va a realizar el diseño geomorfológico, y todo ello junto a una serie de medidas obtenidas a partir del referente geomorfológico utilizado. Todos estos parámetros, y los valores obtenidos, se muestran en la tabla 18. La obtención de cada uno de estos parámetros se explica detalladamente en anexos (*Anexo I. Información necesaria para aplicar el método GeoFluv<sup>TM</sup> a través del software Natural Regrade*) que se incluye al final de este informe.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Coefficiente de escorrentía	tanto por uno	0,3
Máxima cantidad de agua producida por una lluvia de 1 hora de duración y periodo de retorno de 2 años	cm	1,30
Máxima cantidad de agua producida por una lluvia de 6 horas de duración y periodo de retorno de 50 años	cm	5,19
Densidad de drenaje	m/ha	12 - 37 m/ha
Ángulo de intersección entre canales secundarios y canal principal	grados sexagesimales	27,7°
Índice de sinuosidad	adimensional	1,2 - 1,41
Área de actuación	hectáreas	600
Área de drenaje que drena sobre la zona de actuación	hectáreas	12773
Relación profundidad/anchura de <i>bankfull</i>	adimensional	8 - 12

Tabla 18. Resumen de los parámetros y valores utilizados en el diseño conceptual para la reconstrucción de la red de drenaje en el Pla de Sant Jordi.

### 3.2.3. Diseño conceptual

A partir de los datos obtenidos y las condiciones fisiográficas del área de actuación se ha elaborado un diseño geomorfológico conceptual, que recrea una red de drenaje que replica a una similar a la que correspondería a este entorno.

Para ello se ha desarrollado una aproximación que incluye tanto aspectos empíricos, basados en canales correspondientes a las tipologías propias de sistemas mareales, como teóricos, con perfiles y sinuosidades características de los canales de la clasificación de Rosgen.

Es preciso dejar claro que el diseño de esta red se establece, única y exclusivamente, a nivel conceptual; es decir, como una muestra de cómo funcionan el método y el *software* para esta situación concreta. En este sentido, los resultados no son directamente trasladables a un proyecto de ejecución construible, por varias razones; (a) un diseño construible precisaría de un trabajo muy laborioso, fuera del objeto de este informe; (b) sería preciso adaptar el trazado de los canales a espacios con la menor ocupación posible de infraestructuras, tales como edificaciones y carreteras (ver Figura 69).

El diseño de reconstrucción de canales meandriformes que se propone tiene un carácter de directriz. En ningún caso quiere decir que tales canales debieran construirse ni con esa forma, ni en la localización en que aparecen. Si su construcción es viable, ésta podría restringirse a determinados tramos, al tiempo que su diseño definitivo tendría un patrón más ‘natural’, es decir, menos regular.

#### 3.2.3.1 Esquema general

La red de drenaje obtenida constituye un sistema que conduce la escorrentía de Norte a Sur, recogiendo el agua de toda la cuenca que fluye posteriormente sobre la zona objeto de estudio, redirigiéndola hacia el punto de desagüe que cruza el aeropuerto. La figura 69 muestra el esquema general de la red de drenaje diseñada, representada sobre la ortofoto de la zona.



Figura 69. Diseño conceptual de la red de drenaje obtenida mediante la aplicación Natural Regrade.

Dicha red recreada como resultado, consta de una canal principal (M, de *main*) con dos tributarios que entran por la parte izquierda (L1 y L2, L de *left*), junto con un canal que entra por su derecha (R1, R de *right*) y un tributario por la derecha de este último (R1L1) (figura 70).



Figura 70. Diseño conceptual de la red de drenaje propuesta, en la que se indican la nomenclatura correspondiente a cada canal.

### 3.2.3.2. Detalles de los canales (trazados y perfiles)

Tal y como se ha comentado, la red de drenaje obtenida está constituida por un canal principal, tres tributarios, más un tributario de uno de estos tres afluentes (figura 71). Estos canales muestran unos trazados caracterizados por una sinuosidad alta (variable para cada canal) y unos perfiles transversales adaptados a los valores del *bankfull* medidos en campo.

En la figura 14 se puede observar el trazado de la red de drenaje sobre un modelo obtenido a partir de una red de triángulos irregulares (TIN) de este sector, y en las Figuras 72, 73 y 74 unas representaciones tridimensionales sobre la ortofoto de la zona de estudio. Todo ello obtenido a partir de aplicar el método GeoFluv<sup>TM</sup> en la aplicación *Natural Regrade* (ver Anexos, apartado II. Plano).

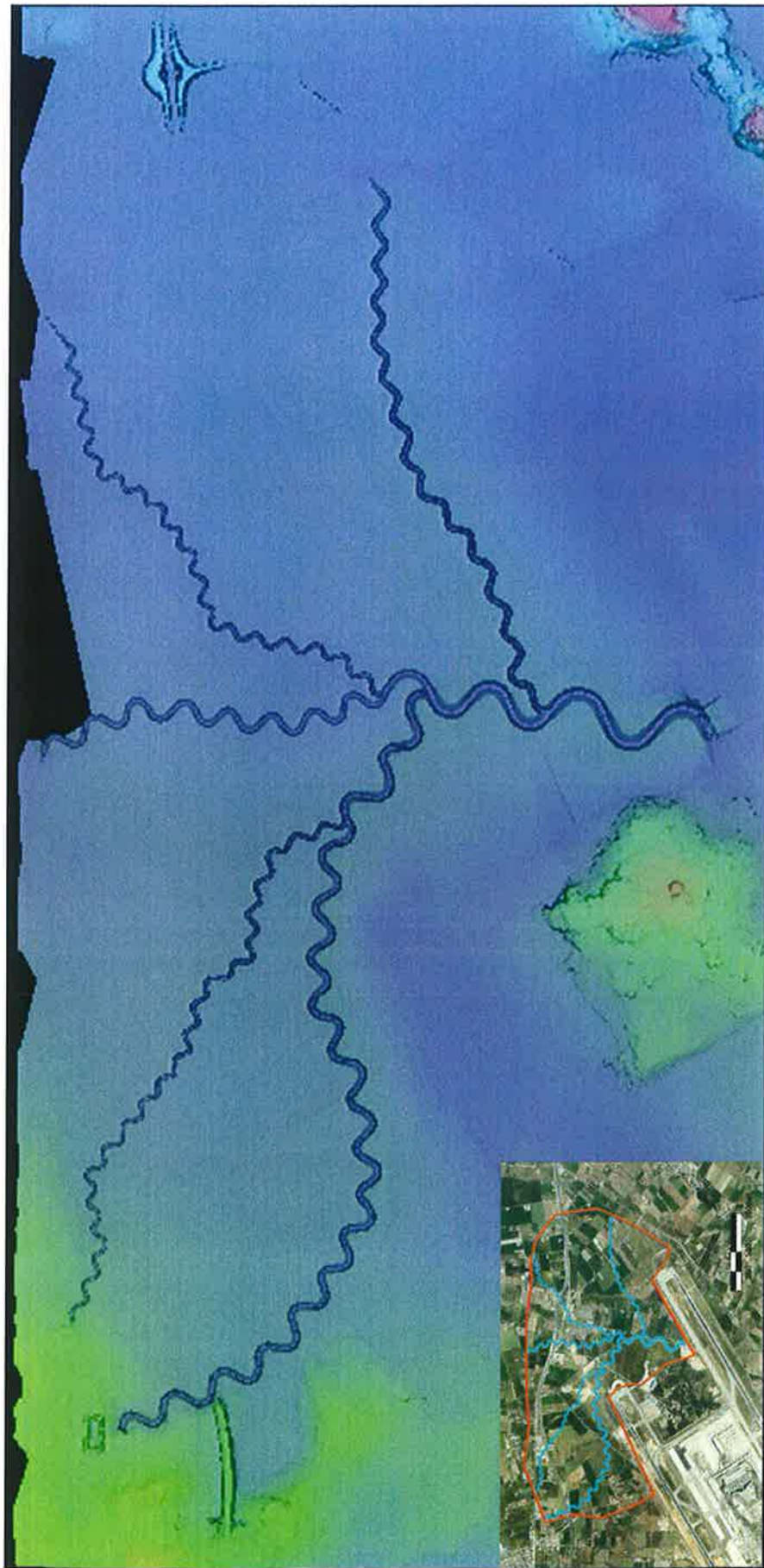


Figura 71. Representación de la red de drenaje diseñada sobre un modelo obtenido a partir de una red de triángulos irregulares (TIN) del sector objeto de estudio.



Figura 72. Representación tridimensional de los trazados de los canales de la red diseñada con Natural Regrade sobre la ortofoto correspondiente a la zona de estudio.



Figura 73. Representación tridimensional en las que se muestra la confluencia de los canales M- R2 y M-L1, obtenidas mediante Natural Regrade, sobre la ortofoto correspondiente a la zona de estudio, en la que se ve como los meandros cruzan caminos y campos de cultivo.



Figura 74. Representación tridimensional de los trazados de los canales de la red diseñada con Natural Regrade sobre la ortofoto correspondiente a la zona de estudio (vista desde el Noreste).



El trazado de los canales está diseñado de tal manera que la conexión entre ellos respete una coherencia geomorfológica, que replique las circunstancias en que estos canales se conectan en paisajes naturales. Estas conexiones se producen normalmente en el punto de inflexión de la curvatura de los meandros, y respetando el sentido del flujo (Figura 75).

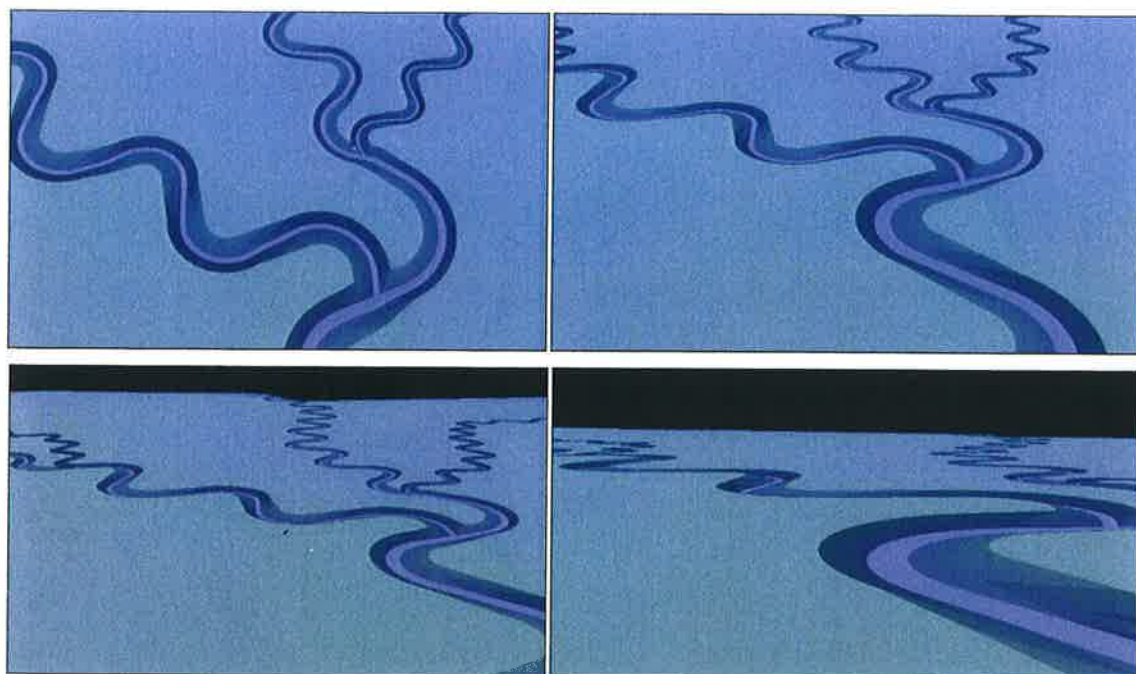


Figura 75. Diferentes vistas, en planta (figuras superiores) y tridimensionales (figuras inferiores), obtenidas mediante el *software Natural Regrade*, en las que se muestra la confluencia de los canales M- R2 y M-L1 desde diferentes ángulos (ver texto una explicación adicional sobre la coherencia natural de estas conexiones).

### 3.2.3.3. Secciones transversales de los canales fluviales diseñados

Con el fin de adaptar al máximo los resultados obtenidos mediante el método y el *software* a las características de los canales naturales objeto de réplica, se han llevado a cabo mediciones de campo acerca de las relaciones anchura / profundidad en canales equivalentes, y las relaciones obtenidas se han incorporado al modelo. Estas secciones transversales (ver detalle en la figura 76) serían equivalentes a secciones de *bankfull*, si bien no serían exactamente equivalentes, al tratarse de canales basados en canales mareales.

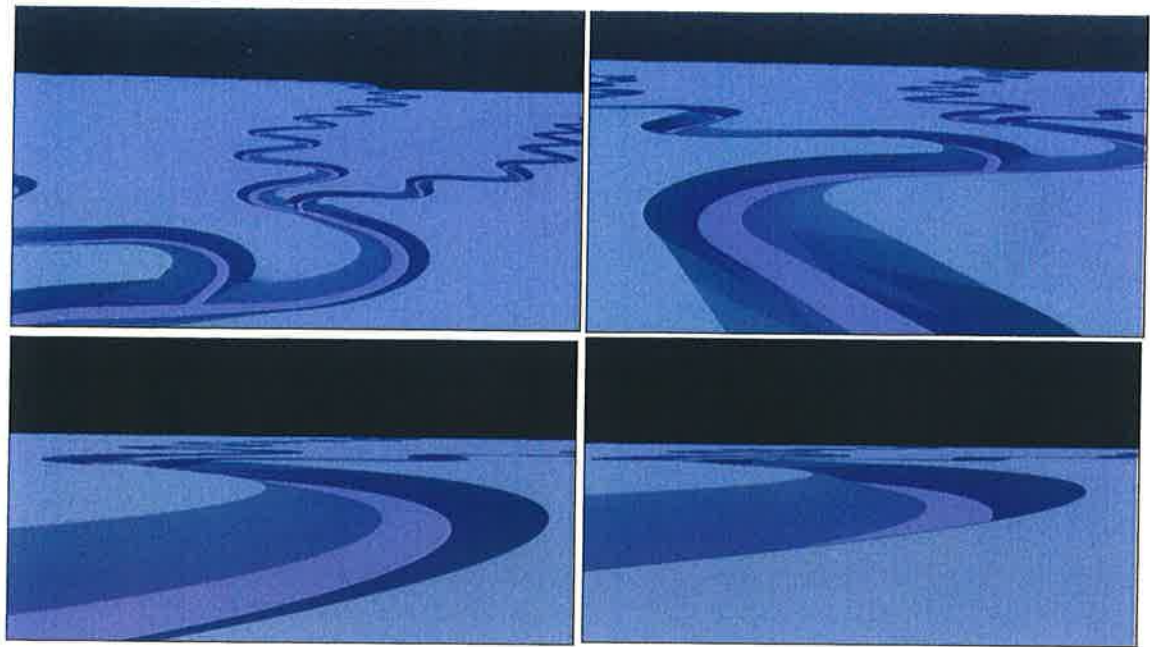


Figura 76. Representaciones tridimensionales de algunos de los arcos de meandro diseñados, obtenidas mediante Natural Regrade. En dichas secciones puede observarse cómo estos canales, a diferencia de los diseñados desde la ingeniería civil (con secciones trapezoidales simétricas), replican la verdadera morfología de los arcos de meandro, según la cual la margen externa tiene siempre una pendiente elevada, fruto del flujo helicoidal que tiene a erosionar estas orillas, y la margen interna tiene un perfil que reproduce las barras de meandro o *point bar*, como resultado de procesos de sedimentación del arco de meandro situado inmediatamente aguas arriba.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Discusión de los resultados del estudio hidrológico-hidráulico

Una vez presentados los principales resultados obtenidos en las sucesivas fases que componen los análisis hidrológico e hidráulico, se procede a su discusión breve, para valorar someramente su validez y limitaciones. 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.

#### 4.1.1. 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 en el ámbito de la consultoría, pero con una mayor presencia de las fuentes de datos geológico-geomorfológicas.

Se ha optado por hacer el análisis estadístico con las precipitaciones máximas diarias anuales de nueve 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, se ha encontrado el problema de que algunas zonas de la cuenca no tenían ninguna estación cercana representativa, ya que las estaciones no estaban repartidas homogéneamente por la cuenca, sino que había varias cercanas entre sí, concentradas en una zona. Para solucionar este problema se propuso hacer una interpolación de los valores disponibles para toda la cuenca, y se ha utilizado el método del 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 se consiguió 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 puede seleccionar la función de mejor ajuste, que en este caso correspondía a las funciones *Log Pearson III* y GEV. 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, con estimación de parámetros por máxima verosimilitud. Esto puede deberse fundamentalmente a dos razones: i) 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); ii) 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.

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 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 cuatro 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 los valores de 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 aparentemente erróneos (en muchas ocasiones la suma de las precipitaciones por horas no totalizaban el valor del evento máximo diario proporcionado por la AEMET). En tal caso se optó por solo trabajar con los cuatro eventos anteriormente descritos y por lo tanto con cuatro hietogramas más fiables.

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 información procedente de *SIOSE* en vez de *CORINE LAND COVER*, para ganar definición (*CORINE* generalizaba muchos usos, y para este trabajo era importante catalogar bien hasta las parcelas más pequeñas). Hacer corresponder 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 ocurre 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 presenta valores creíbles es que al introducirla posteriormente en los programas de análisis hidrológicos, éstos dan resultados coherentes.

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. El tiempo de simulación, que el programa usa para obtener los caudales punta, no era suficiente; al tener muy poca pendiente el flujo consumía mucho tiempo en transitar 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 cómo 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 máximo de caudal se da en el punto final de desagüe para una hora determinada del día siguiente al inicio, lo que indica que el modelo está bien calibrado y no se produce una laminación interna significativa.

#### **4.1.2. 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; lo que se ha llevado a cabo mediante los programas informáticos HEC-RAS e 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 en el ámbito de la consultoría; pero de nuevo las condiciones especiales de la cuenca (topografía muy plana) hicieron necesario añadir del análisis bidimensional.

Como era previsible en una zona tan llana, 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 las cartografías resultantes. Para el periodo de retorno T500 años sí 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; ver figura 55), aparecen inconexas, dispersas y trianguladas; no se observa una lámina de agua homogénea, continua y coherente.

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, no se consideran los desbordamientos en los que el agua se mueve en la dirección ortogonal al flujo principal. Otro problema que nos genera estos resultados, es que la zona analizada tiene un ancho fijo, y el programa no es capaz de analizar qué pasa fuera de ella. Está pensado para actuar en zonas donde la pendiente es algo mayor y el río por tanto discurre algo encajado en el cauce. Como lo que interesa es caracterizar cómo el río desborda e inunda los campos de cultivos adyacentes (ver cuáles y cuánto son anegados) y HEC-RAS no ha sido capaz de proporcionar estos resultados, 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 se produjo con este programa fue la elaboración de la malla (de la cual parten todos los cálculos) ya que se necesitaba un MDT con mucha resolución, debido de nuevo a la topografía plana del terreno. Este programa 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 se necesitaba la máxima resolución, ya que un simple murete que actué como límite entre parcelas, por ejemplo, puede ser un obstáculo que represe el agua y genere un remanso.

Los cálculos que lleva el programa una vez empezada la simulación son muy complejos; incluso con un equipo informático de tipo estación de trabajo (*workstation*), puede llegar a tardar días para generar una simulación completa (para el caudal de periodo de retorno T50 años, tardó casi dos días y para el de T500 años, casi una semana) y en muchas ocasiones se acaba colapsando y el programa se queda bloqueado. 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, apurando al máximo la resolución.

Para el periodo de retorno de T50 años, los valores de calado del agua muestran buena parte del Pla de Sant Jordi inundado; únicamente quedan exentas 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 de la figura 56, podemos ver que se pueden llegar a dar valores de 2.5 m de agua encharcada).

Los valores de velocidad más elevados se dan en las partes altas de la cuenca (alcanzando los 1.2 m/s), en la zona norte-noreste y dentro de los barrancos o torrentes que desembocan en el Pla: esto se debe a que la pendiente longitudinal de los cauces en esas zonas es mayor. Los valores de peligrosidad surgen como una integración del calado y la velocidad; y en ellos 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 daños en las cosechas 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, ya que el valor máximo alcanzaba cerca de 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 de la modelación hidráulica no han sido adecuadamente calibrados y validados, debido a que en la zona no se dispone de mucha documentación histórica para comparar alturas o superficies inundadas, ni tampoco placas o marcas que puedan indicar inundaciones pasadas.

#### **4.2. Discusión sobre la metodología y resultados de la propuesta de renaturalización**

Si la propuesta de renaturalización se quisiera trasvasar un proyecto de ejecución de obra:

- Se requeriría de la obtención de datos con mayor precisión (incluso restringirse a determinados tramos tanto de la zona de actuación como del referente); así como la integración al diseño de estudios hidrogeológicos y geotécnicos de detalle.
- Habría que introducir factores limitantes por aspectos territoriales socioeconómicos en este estudio no contemplados (límites de fincas, puntos de paso del drenaje transversal de infraestructuras etc.), de tal manera que se cambiarían estos trazados ajustándose a las demandas territoriales (manteniendo siempre la morfometría estable).
- Habría que estudiar con detenimiento su viabilidad en términos de costes económicos y capacidades técnicas de construcción debido a la magnitud del tamaño, longitud y morfología de los canales.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones sobre el análisis de la peligrosidad por inundaciones

- Las mejores metodologías para el análisis hidrológico-hidráulico de la peligrosidad de inundaciones superficiales en el Pla de Sant Jordi han resultado ser una combinación de modelos hidrometeorológicos precipitación-aportación semidistribuidos mediante hidrograma unitario (HEC-HMS) y modelos hidráulicos bidimensionales (Iber).
- El modelo estadístico que mejor ajusta las series de precipitaciones máximas en 24 h generadoras de eventos de inundación es variable según la estación meteorológica considerada, predominando la combinación Log-Pearson y GEV+ ML. Los valores de cuantiles oscilan entre los 39 y 63 mm/día para periodo de retorno de 2 años; y entre 76 y 230 mm/día para periodo de retorno de 500 años; con un predominio de los patrones de hietogramas sesgados al final del evento.
- Los caudales punta de avenida generados en el punto de desagüe final de la cuenca hidrográfica del Pla al mar han sido estimados en 164.2, 191.2 y 295.5 m<sup>3</sup>/s para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente; con característicos hidrogramas de avenida súbita (alta pendiente de la curva de ascenso) y curva de descenso con una punta secundaria.
- Las zonas inundables del Pla de San Jordi se concentran en torno al sector nororiental del aeropuerto y alrededor de éste, con los mayores calados al sureste de las pistas; sin embargo, las mayores velocidades se dan en los fondos de los barrancos y su desembocadura al Pla.
- La peligrosidad por inundaciones integrada en el Pla de Sant Jordi, considerando la combinación de calados y velocidades, así como el tiempo de permanencia de la lámina de agua, es mayor en torno al aeropuerto en su sector oriental.
- El estudio realizado con métodos hidrológico-hidráulicos y con aportaciones geológico-geomorfológicas, a pesar de estar elaborado con metodologías estandarizadas, requeriría de tareas adicionales para considerarse completo, ya que no ha podido ser calibrado y validado por falta de datos observacionales; se ha comprobado cómo la no consideración en los modelos de la posición de la superficie piezométrica, genera incertidumbre y resultados contradictorios en las zonas potencialmente inundables.

### 5.2. Conclusiones sobre la propuesta de renaturalización de la red de drenaje

- El método GeoFluvTM y del software *Natural Regrade* utilizados en este estudio son las únicas herramientas disponibles para realizar reconstrucciones topográficas de superficies afectadas por movimientos de tierras con criterios científicos geomorfológicos. Se basa en la construcción de relieves estables recuperando las redes de drenaje en equilibrio con la dinámica del entorno de la zona de actuación.
- Con carácter demostrativo este estudio desarrolla un diseño conceptual de una red de drenaje estable y natural en el Pla de Sant Jordi, con el fin de restablecer un drenaje en régimen natural de este espacio y en equilibrio con la dinámica actual. Sería interesante valorar

estudios como el presente, el cual se ha desarrollado por primera vez en zonas costeras-litorales.

- Las acequias construidas a mediados del siglo XIX presentes en la actualidad constituyen formas artificiales muy alejadas del entorno natural e implican una baja integración paisajística y calidad visual. El diseño de la configuración general aquí propuesto se basa en el beneficio que aporta su ‘renaturalización’ introduciendo variaciones en la longitud de onda y amplitud de los trenes de meandros dentro de cada tramo de corriente fluvial (mareal), para evitar esa regularidad que le da aspecto artificial. Además de construir así formas que son soporte de ecosistemas funcionales y autosostenibles, que replican a los del entorno.
- El diseño de reconstrucción de canales meandriformes que se propone, recogido en los distintos gráficos y planos, tiene un carácter de directriz o idea general. En ningún caso quiere decir que tales canales debieran construirse ni con esa forma, ni en la localización en que aparecen. En suma, si su construcción es viable, ésta podría restringirse a determinados tramos, al tiempo que su diseño definitivo tendría un patrón más ‘natural’, es decir, menos regular.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su colaboración en este estudio, el aporte de información y los trabajos de campo a todos los miembros del proyecto Poseidón, comenzando por su responsable, Pedro A. Robledo Ardila, a José María López García y Ana Sevillano por su apoyo prestado en todo momento. Este agradecimiento se hace extensivo a José María Pernía, por tramitar las solicitudes de datos meteorológicos; a la AEMET, por suministrar los datos meteorológicos en virtud del convenio de intercambio de información con que tiene suscrito con el IGME; al personal de AENA en el aeropuerto de Son San Joan, por facilitarnos el acceso a las zonas de trabajo y proporcionarnos vehículos de transporte.

Este informe final recoge los estudios y memorias de diferentes trabajos inéditos:

- Al estudio de Robledo, P.A. Díez-Ferrero, A.; Perucha, M.A., Bernat Rebollal, M.; Martín-Duque, J.F. López, J.M.; Sevillano, A.; Fuardiola-Albert, c.; Pardo-Igúzquiza, e.; moreno, I.; Palmer, E. y Cantón, J.J. Aspectos hidrogeomorfológicos en el estudio de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca). En: S. Schnabel y Á. Gómez Gutiérrez (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, pp. 60-63, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Extremadura y Sociedad Española de Geomorfología, Cáceres. 2014
- Trabajo Fin de Master de Dña. Cristina Morello Martín, titulado “Análisis hidrológico e hidráulico de la componente superficial de la peligrosidad por inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca)” y codirigido por el Dr. Andrés Díez Herrero (IGME) y la Lcda. M<sup>a</sup> Ángeles Perucha Atienza (IGME), y que fue presentado para la obtención del título de *Máster en recursos hídricos y medio ambiente (RHYMA)* de la Universidad de Málaga en junio de 2014.
- Trabajo Fin de Master de Dña. Virginia Díaz de la Cruz, titulado “Análisis hidrológico e hidráulico mediante técnicas SIG de la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del Pla de Sant Jordi (Mallorca)” y codirigido por la Dra. Nuria de Andrés de Pablo (UCM) y el Dr. Manuel Bernat Rebollal (IGME), y que fue presentado para la obtención del título de *Máster*



*en tecnologías de la información geográfica (TIG) de la Universidad Complutense de Madrid, en noviembre de 2014.*

Los autores desean agradecer a los directores, tutores y miembros de los respectivos tribunales de evaluación, su contribución para mejorar el estudio realizado.

## REFERENCIAS

ABAQA (2010): Estudi hidrològic 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.

BUGOSH, N. (2000): Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation. In: OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop, January 2000. Office of Surface Mining: Farmington, NM; no pagination.

BUGOSH, N. (2002): Slope and channel reclamation using fluvial geomorphic principles at San Juan Coal Company Mines in New Mexico. In: Approaching bond release: Postmining land use in the arid and semi-arid west, Abstracts, August 25–30, 2002, Office of Surface Mining, North Dakota State University and North Dakota Public Service Commission: Bismarck, ND; no pagination.

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.

D.G.C. (1999): Máximas lluvias diarias en la España peninsular. Serie monografías, Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento), Madrid, 28 pp.

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

DÍAZ DE LA CRUZ, V. (2014): Análisis hidrológico e hidráulico mediante técnicas SIG de la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del Pla de Sant Jordi (Mallorca). Trabajo Fin de Master. Máster en tecnologías de la información geográfica (TIG), Universidad Complutense de Madrid, 96 pp. Inédito.

DÍEZ-HERRERO, A. y GARCÍA, M. (in press): Riesgos por avenidas e inundaciones. En: Lario, J. (Coord.), *Riesgos Naturales, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)*, Madrid.

- 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 CARRETERAS (M. O. P. U., 1997): Instrucción de carreteras 5.2-IC. Madrid, 17 pp.
- DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MALLORCA (2012): Plan de Gestión del Agua en las Islas Baleares. Mallorca, 55 pp.
- DUNNE, T. y LEOPOLD, L. B. (1978): Water in Environmental Planning. Freeman, San Francisco, CA, 818 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 POLO, F. J. (2000): Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas. CEDEX, 74 pp.
- 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.
- 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., y 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.
- HERNANDO RODRÍGUEZ, N., MANZANARES ROMÁN, C., PORTUONDO SEIJO, L., y MARTÍN DUQUE, J.F. (2014): *Aplicación del equipo y software Natural Regrade para el estudio de una configuración hidrogeomorfológica estable para la recuperación del drenaje natural del Pla de Sant Jordi (Mallorca, España)*. Instituto Geológico y Minero de España, informe inédito, 45 páginas + planos.
- 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.
- M.O.P.U. (1990): Instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Boletín Oficial del Estado, 123, 23-5-1990.
- MARTÍN DUQUE JF y BUGOSH N. (2013): El remodelado del terreno en la restauración ecológica del espacio afectado por actividades mineras. Del uso de criterios geomorfológicos al método GeoFluv. En: García A., Travieso JR (Eds.), Restauración ecológica en minería. De la teoría a la práctica (CD). Ciudad de la Energía, Ponferrada, pp. 31-46.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. y NAVARRO HEVIA, J. (1996): Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico. Universidad de Valladolid. Valladolid. 283 pp.
- MORELLO MARTÍN, C. (2014). Análisis hidrológico e hidráulico de la componente superficial de la peligrosidad por inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca). Trabajo Fin de Master. Máster en recursos hídricos y medio ambiente (RHYMA), Universidad de Málaga, 50 páginas + anexos (219 pp.). Inédito.
- PHILLIPS, J.V. y 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.
- ROBLEDO, P.A.; DÍEZ-HERRERO, A.; PERUCHA, M.A.; BERNAT REBOLLAL, M.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; LÓPEZ, J.M.; SEVILLANO, A.; GUARDIOLA-ALBERT, C.; PARDO-IGÚZQUIZA, E.; MORENO, L.; PALMER, E. y CANTÓN, J.L. (2014): Aspectos hidrogeomorfológicos en el estudio de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca). En: S. Schnabel y Á. Gómez Gutiérrez (Eds.), Avances de la Geomorfología en España 2012-2014, pp. 60-63, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Extremadura y Sociedad Española de Geomorfología, Cáceres.
- 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.
- ROSGEN, D.L. (1994): A Classification of Natural Rivers. Catena, 22, 169-199.
- ROSSELLÓ I VERGER, V.M. (2000): El Prat de Sant Jordi (Mallorca) i la sevadessecació. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, 50 - Vol. XV, 119-139.
- 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 desperta 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”.

<http://www.ideib.cat>, Visor de la IDEIB (Infraestructura de DadesEspacials de les Illes Balears).



## **PARTE 8**

# **ANÁLISIS DE SISTEMAS GEOMORFOLÓGICOS MEDIANTE TÉCNICAS MORFOMÉTRICAS EN EL PLA DE SANT JORDI, MALLORCA**

### **Equipo de trabajo**

Pedro A. robledo Ardila  
Eulogio Pardo Iguzquiza  
Ana Cabrera Ferrero

## ÍNDICE

1. IDENTIFICACIÓN Y DELINEACIÓN DE LAS DEPRESIONES EN EL PLA DE SANT JORDI, PALMA DE MALLORCA, BALEARES, MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.....	3
1.1. Introducción.....	4
1.2. Metodología.....	4
1.3. Caso de estudio.....	5
1.4. Resultados.....	9
1.5. Conclusiones.....	12
2. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE INUNDABILIDAD EN EL PLA DE SANT JORDI, PALMA DE MALLORCA.....	14
2.1. Introducción.....	14
2.2. Objetivos.....	15
2.3. Metodología.....	15
2.4. Resultados.....	17
2.4.1 Cálculo de las variables aplicadas en el método.....	17
2.4.2. Cálculo de la por el método del valor máximo.....	25
2.4.3. Cálculo del valor medio de las variables de influencia.....	26
2.4.4. Cálculo de la Sumatoria Lineal Ponderada.....	27
3. CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDADAS EN EL PLA DE SAN JORDI MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.....	27
3.1. Metodología.....	28
3.2. Resultados	
IMÁGENES DEL 25 DE OCTUBRE DE 2001 (sin inundaciones).....	30
3.2.1. Tratamiento digital de la imagen de satélite.....	40
3.2.1.1. Composición de falso color.....	40
3.2.1.2. Ratios de bandas.....	45
3.2.1.3. Índices.....	47
3.2.1.3.1. Índice de vegetación normalizado (NVDI).....	47
IMAGEN DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2001 con nubosidad e inundaciones.....	50
3.3. Analogías y diferencias entre los métodos propuestos y eventos de inundaciones reales.....	59
3.4. Conclusiones.....	64
4. Referencias.....	66

# 1. IDENTIFICACIÓN Y DELINEACIÓN DE LAS DEPRESIONES EN EL PLA DE SANT JORDI, PALMA DE MALLORCA, BALEARES, MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 1.1. Introducción

Los modelos digitales de elevaciones (MDEs) son una representación tridimensional de la topografía del terreno. Debido a su naturaleza digital, están especialmente indicados para su procesamiento numérico, y presentan amplias aplicaciones en Ciencias de la Tierra e ingeniería. Los MDEs se usan extensivamente en análisis del terreno (Deng, 2007) aprovechando las posibilidades tecnológicas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Algunos de los mapas derivados de los modelos digitales del terreno que podemos obtener son el de pendientes, el de orientaciones o el de cotas, entre otros. Tradicionalmente, en hidrología superficial se han usado los MDEs para la delimitación de redes de drenaje, cuencas vertientes y parámetros relacionados con el flujo acumulado en los canales de drenaje. En todas estas aplicaciones, las depresiones constituían un problema y por esta razón se ha dedicado un gran esfuerzo para generar MDEs libres de depresiones (Arnold, 2010). Sin embargo, desde el punto de vista geomorfológico, la detección de depresiones y su adecuada delimitación geométrica, resulta de gran utilidad en ámbitos muy diversos, especialmente en zonas aparentemente llanas con cierto riesgo a inundarse, como es el caso del Pla de Sant Jordi.

Metodologías para la detección automática de depresiones se ha realizado en otros estudios realizados con anterioridad, con el propósito de identificar riesgos asociados (USGS, 2011), modelos erosivos (López-Vicente *et al.*, 2009) y cartografía geomorfológica (Siart *et al.*, 2009). Ésta ha demostrado que se trata de una técnica que presenta grandes ventajas con respecto a la delineación manual, especialmente cuando se trata de estudiar áreas de gran extensión, inaccesibles, cubiertas de vegetación o con otros rasgos de la superficie de terreno que impiden observar con nitidez estas formas. En este estudio, se aplicará la metodología llevada a cabo para la detección automática de depresiones que ya ha sido aplicada a otros lugares del territorio español con resultados satisfactorios. (Pardo *et al.*, 2013)

## 1.2. Metodología

Existen muchos algoritmos capaces de generar MDEs libres de depresiones. En este sentido, el procedimiento propuesto por Jenson y Domingue (1988), implementado en muchos programas informáticos de SIG y en el que se han basado todas las variantes posteriores más modernas ha sido fundamental (Grimaldi *et al.*, 2007). Jenson y Dominguez (1988) proporcionan el algoritmo básico de relleno de depresiones, derivado de otros algoritmos descritos igualmente en el mismo trabajo, como el cálculo de direcciones de flujo y la construcción de la tabla de puntos de drenaje. Esta metodología se ha implementado en diversos programas informáticos de tipo SIG, y consiste en eliminar las depresiones de un MDE de entrada, generando un MDE de salida libre de depresiones. Por consiguiente, para obtener un mapa sólo con depresiones, bastará con realizar una operación de álgebra de imágenes ráster, que consiste en sustraer del MDE original, el MDE libre de depresiones. El procedimiento tiene ciertas limitaciones, ya

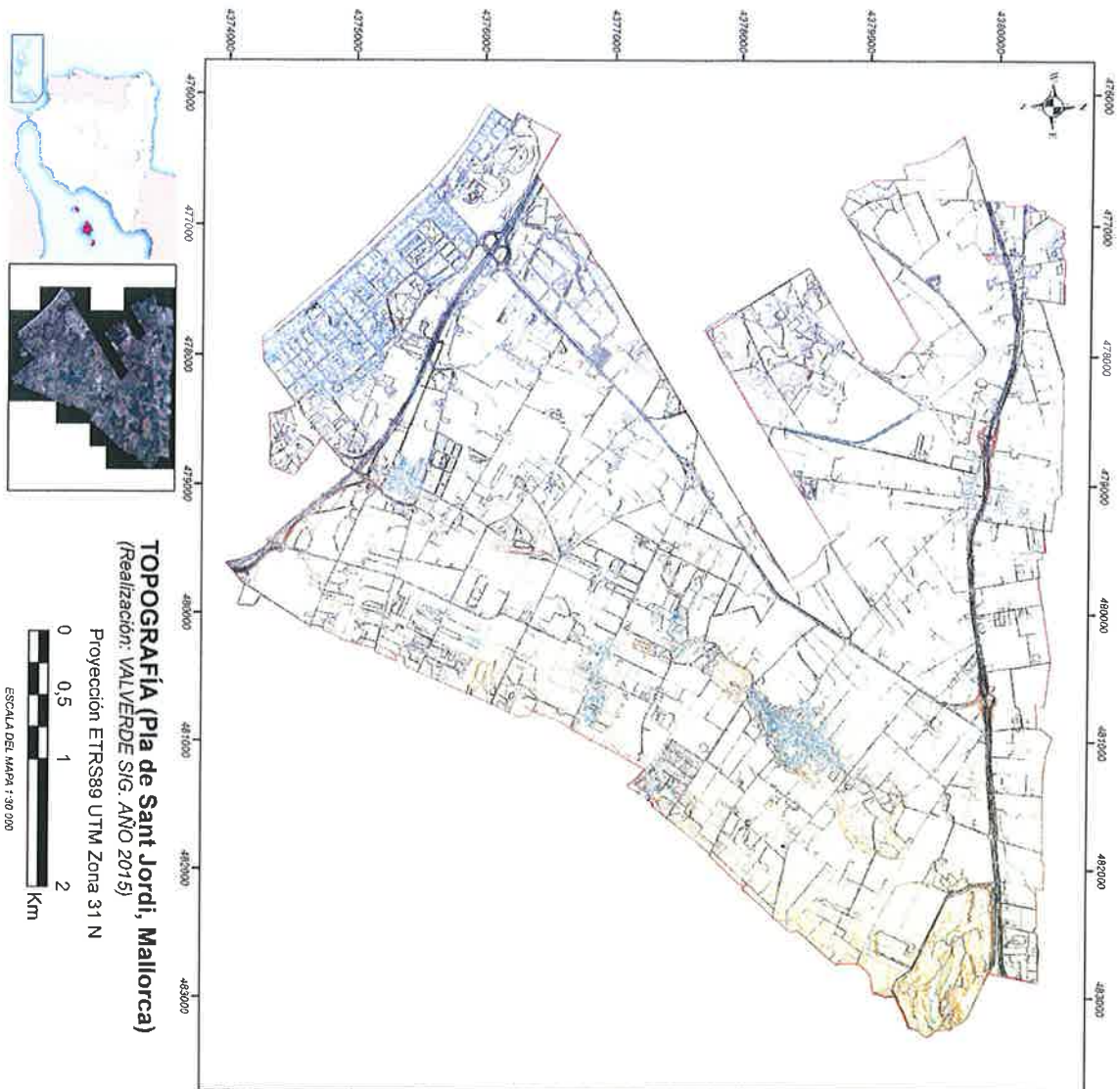
que utiliza para el cálculo de depresiones el método denominado de *vecindad inmediata*, que consiste en comparar cada celda con sus ocho celdas vecinas (vecindad-8). Esto implica que se considera la existencia de flujo entre dos celdas que sólo comparten una esquina (esto es, un punto), lo que puede dar lugar al desagüe de conjuntos de celdas que de otro modo se interpretarían como una depresión, por ejemplo si se considerasen como vecinas únicamente las celdas que comparten una cara (vecindad-4). Otro problema es el que presentan las depresiones desarrolladas dentro de otras depresiones mayores. La solución propuesta para este problema es degradar el MDE a una menor resolución (mayor tamaño de celda o píxel), de modo que se identifique la cuenca endorreica como una depresión normal para dicha escala, en la cual está ya cae dentro de la resolución de la celda. Un problema adicional es la existencia de falsos positivos y falsos negativos. Los falsos positivos son depresiones ficticias creadas por el algoritmo. Por ejemplo, el algoritmo interpreta como depresiones cerradas ciertos barrancos encajados, tramos de ríos que presentan algunas infraestructuras antrópicas, canales antrópicos, como Sa Siquia o el Siquiò, puentes, rotondas elevadas o presas. En cuanto a los falsos negativos, se producen cuando no se detectan depresiones naturales verdaderas, y esto puede ocurrir por el problema anteriormente mencionado con la vecindad-8. Finalmente, al analizar la información obtenida hay que considerar que en ocasiones, algunas de las depresiones detectadas, aun siendo reales, no son naturales, sino de origen antrópico. Esto ocurre con ciertas canteras y minas a cielo abierto, en grandes balsas de agua o en zonas integradas o adyacentes a infraestructuras urbanas, como zanjas en los márgenes de las autopistas o rotondas, patios interiores o áreas de estacionamiento, entre otras.

### 1.3. Caso de estudio

La zona de estudio se localiza en el margen central y este de la Masa de Agua Subterránea de Sant Jordi, en Mallorca, Islas Baleares. Se trata de un área muy antropizada ubicada sobre un antiguo humedal desecado (Rosselló-Verger, 1959) muy parcelada para el uso agrícola y con un gran número de urbanizaciones y viales diseminados por todo el área de estudio (figura 1). Presenta cuatro bordes que limitan el área y, que técnicamente pueden considerarse como barreras de alta permeabilidad. Al norte la autovía de Palma-Manacor, al sur la autovía de Palma-Llucmajor y toda la zona urbana de El Arenal; al este cierra la cuenca en primer término un pequeño relieve donde se asienta la localidad de Sant Jordi, pero en términos globales los relieves de Xorrigo son los que limitan la cuenca, poniendo en contacto el Pla con la plataforma carbonatada de Llucmajor. Y al oeste el aeropuerto, que actúa como barrera impermeable dividiendo el Pla en márgenes bien diferenciados: la zona que drena Sa Siquia al este y la zona que drena el Torrent Gros al Oeste y, una pequeña parte el Torrent d'en Barberà.

Desde el punto de vista orográfico, es un área muy plana en la que apenas hay diferencias importantes de cota topográfica y que presenta pendientes que no superan en la mayor parte de la zona de estudio los dos grados de desnivel (figura 2). Se trata de una cuenca terciaria bajo condiciones climatológicas mediterráneas, que registra bajas precipitaciones, generalmente concentradas en primavera y otoño. El Pla de Sant Jordi ha sido estudiado por diversos autores desde el punto de vista de la geológico, hidrogeológico y geomorfológico (Rosselló-Verger, 1959; Barón, 1985; IGME, 2012) siendo una zona especialmente interesante por el acuífero detrítico libre que ha explotado durante muchos años para abastecimiento agrícola y urbano.





**TOPOGRAFIA (Pla de Sant Jordi, Mallorca)**  
 (Realización: VALVERDE SIG. AÑO 2015)

Proyección ETRS89 UTM Zona 31 N



ESCALA DEL MAPA 1:30 000

**Leyenda**

- ACERCA LINEAL
- ADARBADE DE ESPINO
- ASARCCAMENTO ESTACIONAMIENTO
- AZUDO
- BALSA ALBERCA
- BONDA QUITA\_MIEDOS
- BOCA\_TUHEL
- BORDE ASFALTO
- BORRILLO
- CABEZA MURO CONTENCIÓN
- CAMINO
- CANA\_MARSHI
- CASITA\_TRANFORMADOR
- CAUCE LINEAL
- CAUCE SUPERFICIAL
- CHARCA
- CHIMBELA INDUSTRIAL TORRE REFR
- CONDUCCION A NIVEL
- CONDUCCION ELEWADA
- CONSTRUCCION LISERA
- CONSTRUCCION SIN ESPECIFICAR
- CONTORNO PISTA DEPORTIVA
- CURVA NIVEL DEPRESION DIRECTO
- CURVA NIVEL DEPRESION FINA
- CURVA NIVEL DIRECTORA
- CURVA NIVEL FINA
- DEPOSITO AGUA A NIVEL
- DEPOSITO AGUA\_ELEVADO
- DEPOSITO ELEVADO CONALIBRE
- DESCARQUE CUNETA
- DIVISION DE ALTURA
- EDIFICIO DE CARACTER RELIGIOS
- EDIFICIO EN RUINAS
- EDIFICIO EN CONSTRUCCION
- EDIFICIO RESIDENCIAL CIRCUNAS
- EDIFICIO SINGULAR
- ESCALERA
- ESTACIONAL DE SERVICIO GASOLINE
- ESTANQUE
- FUENTE ORNAMENTAL
- GRADA
- INVERNADERO
- LAGO LAGUNA
- LIMITE DE TRABAJO
- LINEA BLANCA DE VIAL
- LINEA DE COSTA
- LINEA DE JARDIN
- LINEA DE MASA ARBOLADA
- LINEA DE PATIO
- LINEA ELECTRICA
- LINEA MASA PALABRAL
- LINEA SEPARACION DE EDIFICIOS
- LINEA SEPARACION DE USOS
- MARQUEJUNA VOLADIZO
- MOLINO DE VIENTO
- MONUMENTO ESTIPUA
- MURO O TAPA DE ALBAJERIA
- NAVE
- PASARELA
- PIE MURO CONTENCIÓN
- PISCINA
- PISTA PAVIMENTADA
- PISTA SIN PAVIMENTAR
- PLAYA/GRASA
- POZO
- PUENTE
- PUENTE ACCESO
- P CULTIVO REGADIO
- RAMPA
- RODONA
- S BONDA QUITA\_MIEDOS
- S BORDE ASFALTO
- S BORRILLO
- S CANINO
- SINCLA BLANCA DE VIAL
- SANRIO O TAPA DE ALBAJERIA
- S VERIA VALLA METALICA
- SENDA
- SETO
- SIFON
- TALUD CABEZA
- TALUD PIE
- TORRE ANTENA TELECOMUNICACION
- TUBERIA ELECTRICA
- TUBERIA INDUSTRIAL ELEWADA
- VERIA VALLA METALICA
- VIAL ABANDONADO
- ZONA DELIMITADA
- ZONA ENCARCABALE



Figura 1. Mapa topográfico del Pla de Sant Jordi obtenido de la cartografía 1:1000.

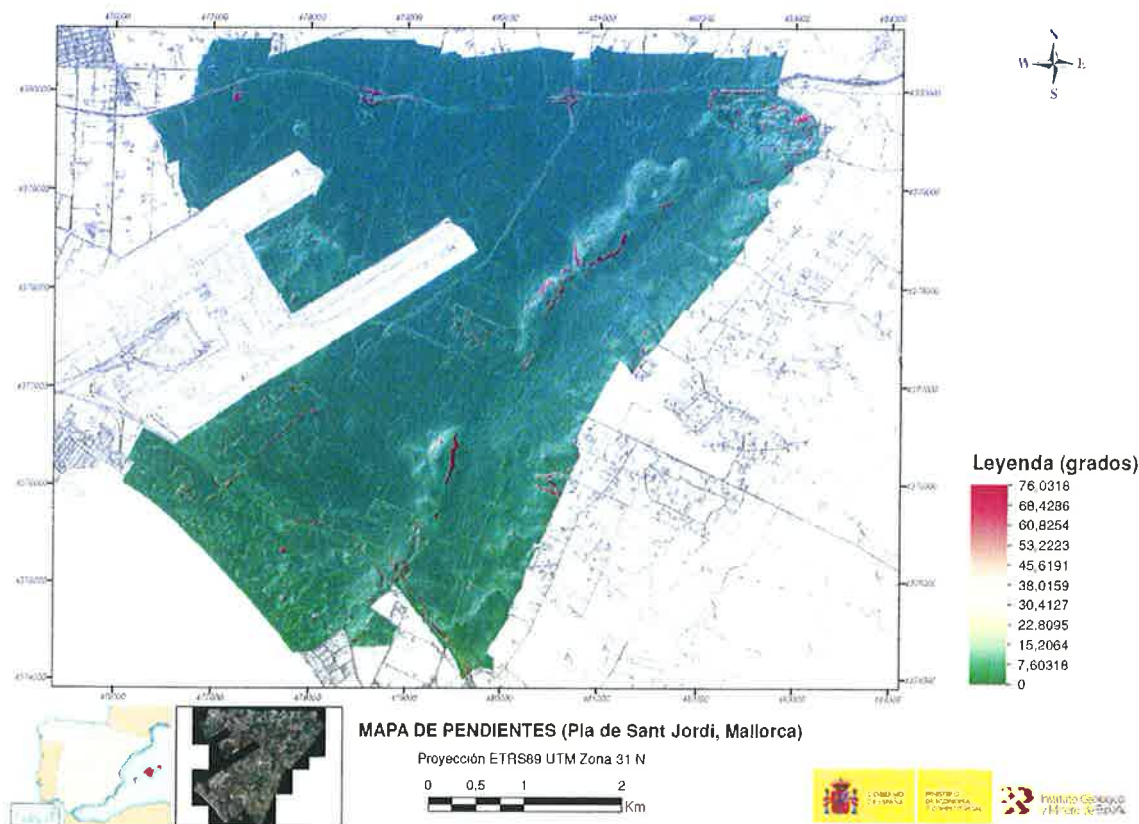


Figura 2. Mapa de pendientes en la Pla de Sant Jordi obtenido a partir del MDE.

El procedimiento descrito en la metodología se ha aplicado a un MDE con una resolución de 5 m facilitado por AENA, cuya cartografía previa se realizó a 1:5000; y una cartografía a 1:1000 con una resolución del MDE de 1 m, realizada específicamente para este proyecto. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 1, donde también se han representado los límites de la zona susceptible de presentar inundaciones, delimitada a partir del mapa topográfico 1:1000, en la que se han detectado la mayor parte de las depresiones existentes.

El procedimiento de detección automática de depresiones ha permitido localizar zonas deprimidas en el terreno con una importante dispersión en cuanto a tamaños y profundidades. Para la detección de los diferentes tamaños ha sido preciso hacer aproximaciones parciales, aplicando en cada caso la misma metodología, pero con una serie de degradaciones sucesivas del MDT a resoluciones de 10, 50, 100, 200 y 500 m. En la zona de estudio, también se han identificado varios falsos positivos correspondientes a tramos de canales, rotondas o puentes elevados que actúan frente al programa a modo de presa. Son muchas las depresiones detectadas, algunas de ellas muy poco evidentes sobre el terreno y que, generalmente, pasan desapercibidas, tanto en los reconocimientos de campo como en las inspecciones cartográficas y de las fotografías aéreas u ortofotos. Un detalle de las depresiones complejas de este tipo se muestra en la figura 3, 4 y 5. La precisión de los bordes exteriores de las depresiones en esta zona queda diluida por la suavidad de la pendiente en la mayoría de casos y, la falta de un control estructural, por lo que han tenido que ser revisadas sobre el terreno para constatar que se trata de zonas endorreicas, naturales o antrópicas. En la figura 4 y 5 se muestra un detalle algunas de las depresiones detectadas al norte y al sur del Pla de Sant Jordi, con significación especial en la depresión del El Ullal de Son Mir (figura 6).

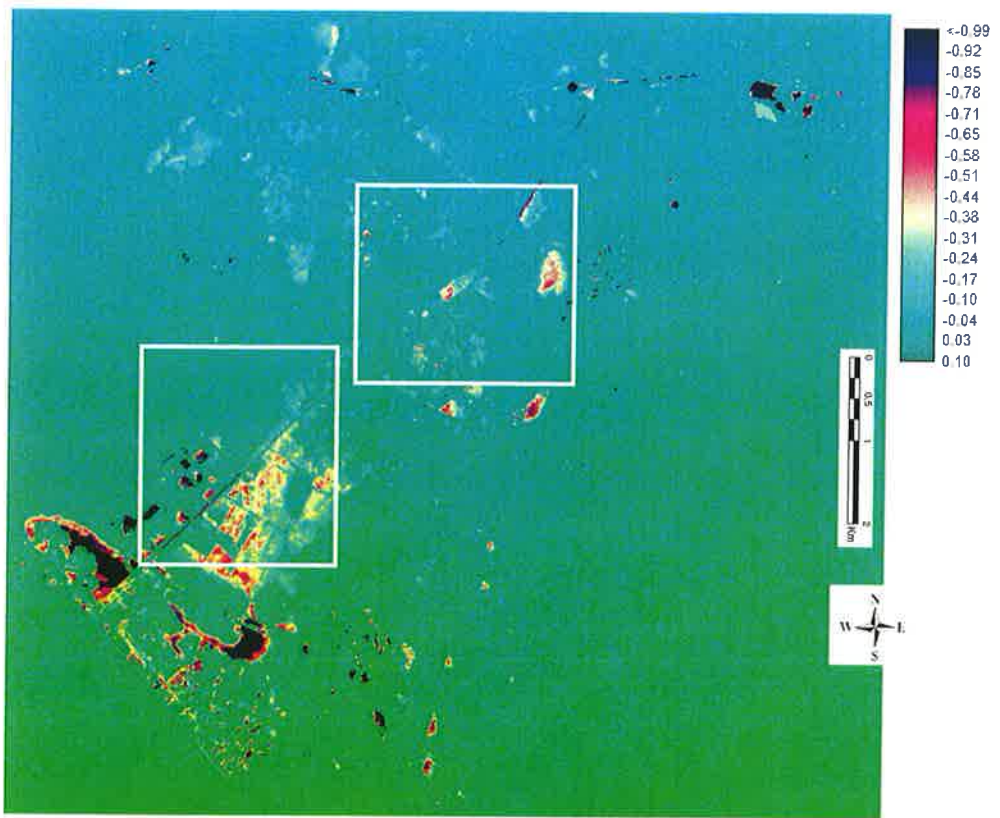


Figura 3. Mapa de depresiones del Pla de Sant Jordi con saturación.



Figura 4. Detalle del margen inferior del mapa anterior de depresiones del Pla de Sant Jordi.

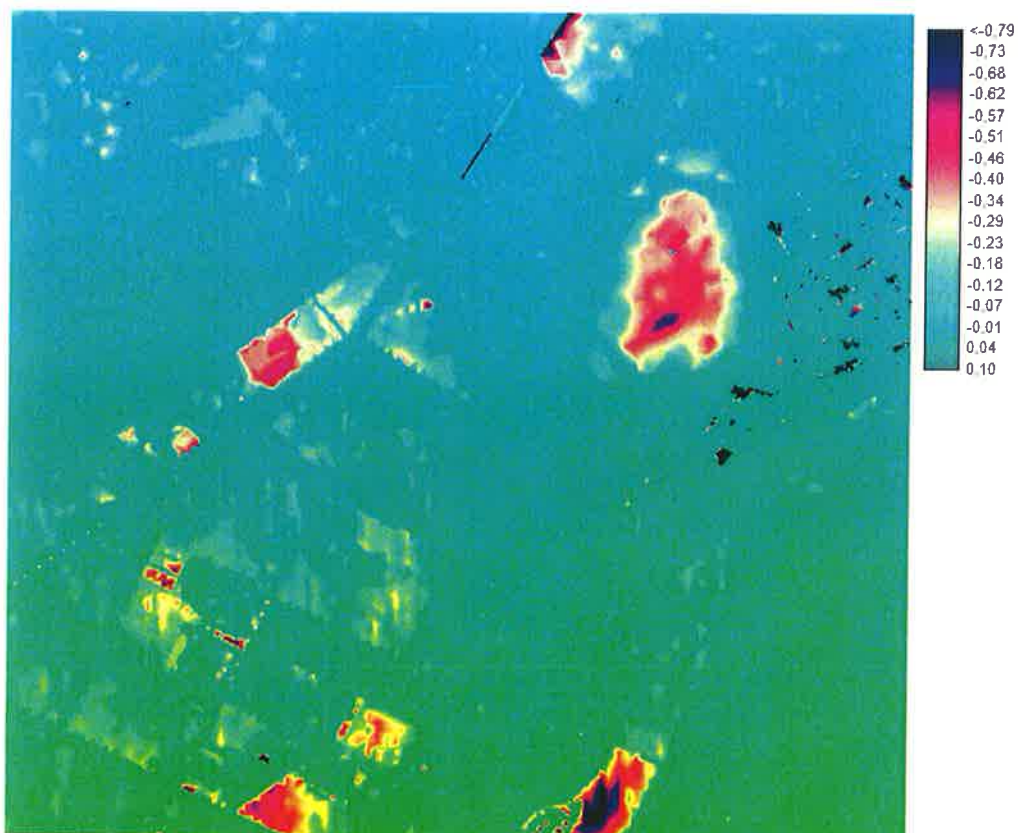


Figura 5. Detalle del margen superior del mapa precedente de depresiones del Pla de Sant Jordi.

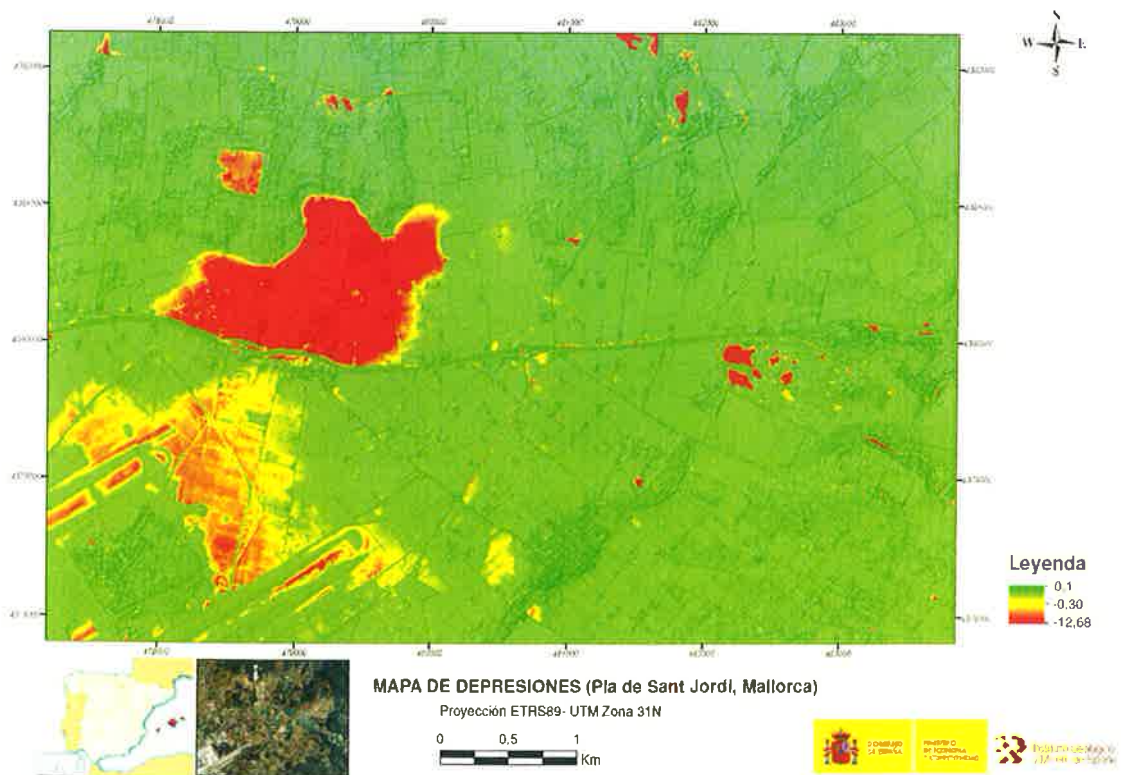


Figura 6. Resultado final de un conjunto de depresiones detectadas al norte del aeropuerto sobre el MDE obtenido de la cartografía 1:1000.

## 1.4. Resultados

De acuerdo con el mapa de depresiones que se muestra en la figura 7 y 8 se han detectado más 500 depresiones en la zona de estudio con superficies muy variables que van desde los 42 m<sup>2</sup> (la de menor tamaño), hasta los 219423 m<sup>2</sup> (la de mayor tamaño). Para un análisis más preciso se han computado las superficies deprimidas por unidad de celda, es decir, que área está deprimida en un mapa dividido en celdas de 500 x 500 m. Existe un amplio abanico en la distribución espacial del tamaño de superficies deprimidas, sumando un total agrupado en el área de estudio de 4137166 m<sup>2</sup> (401,3 ha) con una media de superficie deprimida por celda de 19700 m<sup>2</sup>. El valor de superficie por celda más representado es de 2500 m<sup>2</sup> con 120 celdas, seguido de 7500 m<sup>2</sup> con 14 celdas y 17500 m<sup>2</sup> en 10 celdas (figura 9).

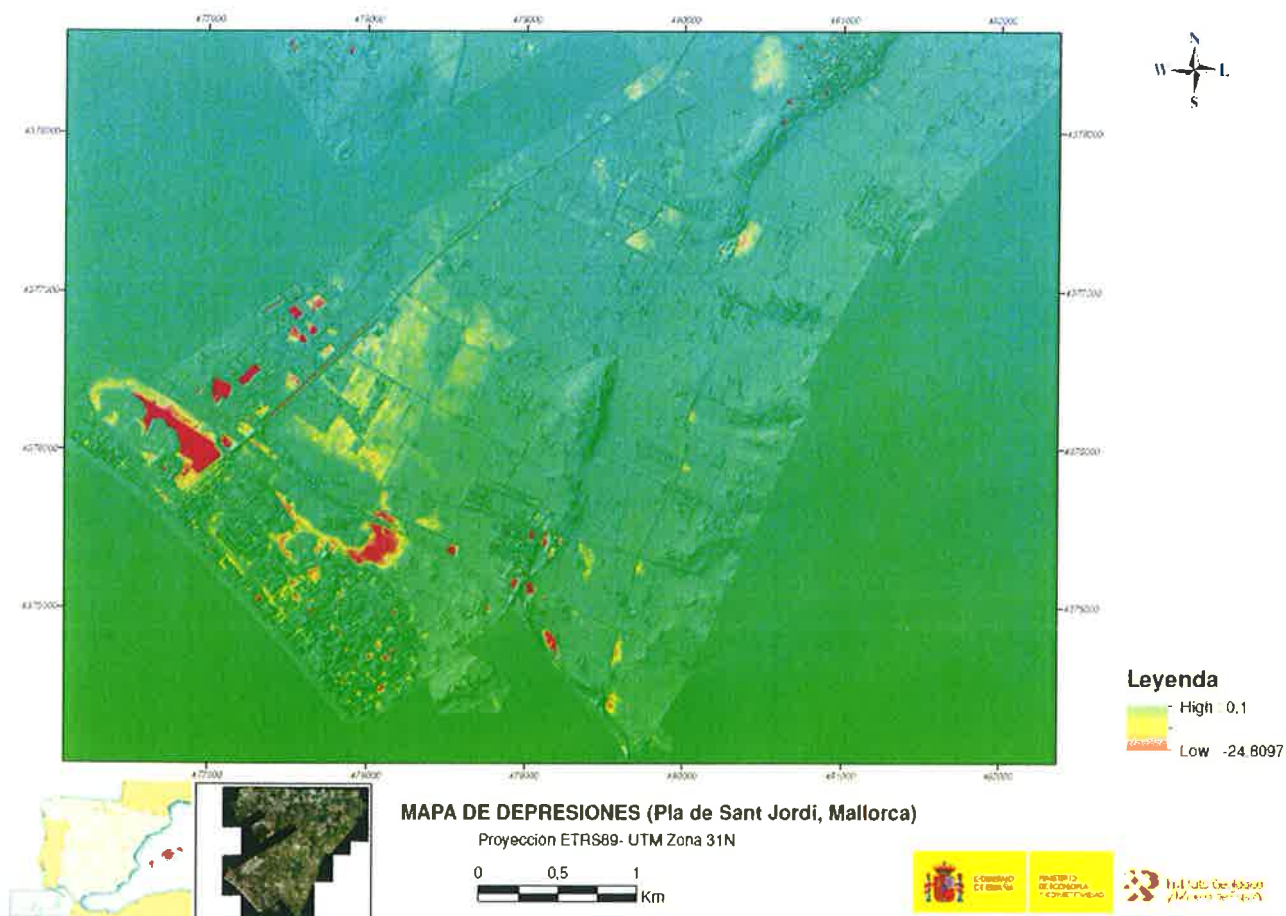


Figura 7. Ejemplos de depresiones detectadas al sur del Pla de Sant Jordi sobre el MDE obtenido de la cartografía 1:1000.

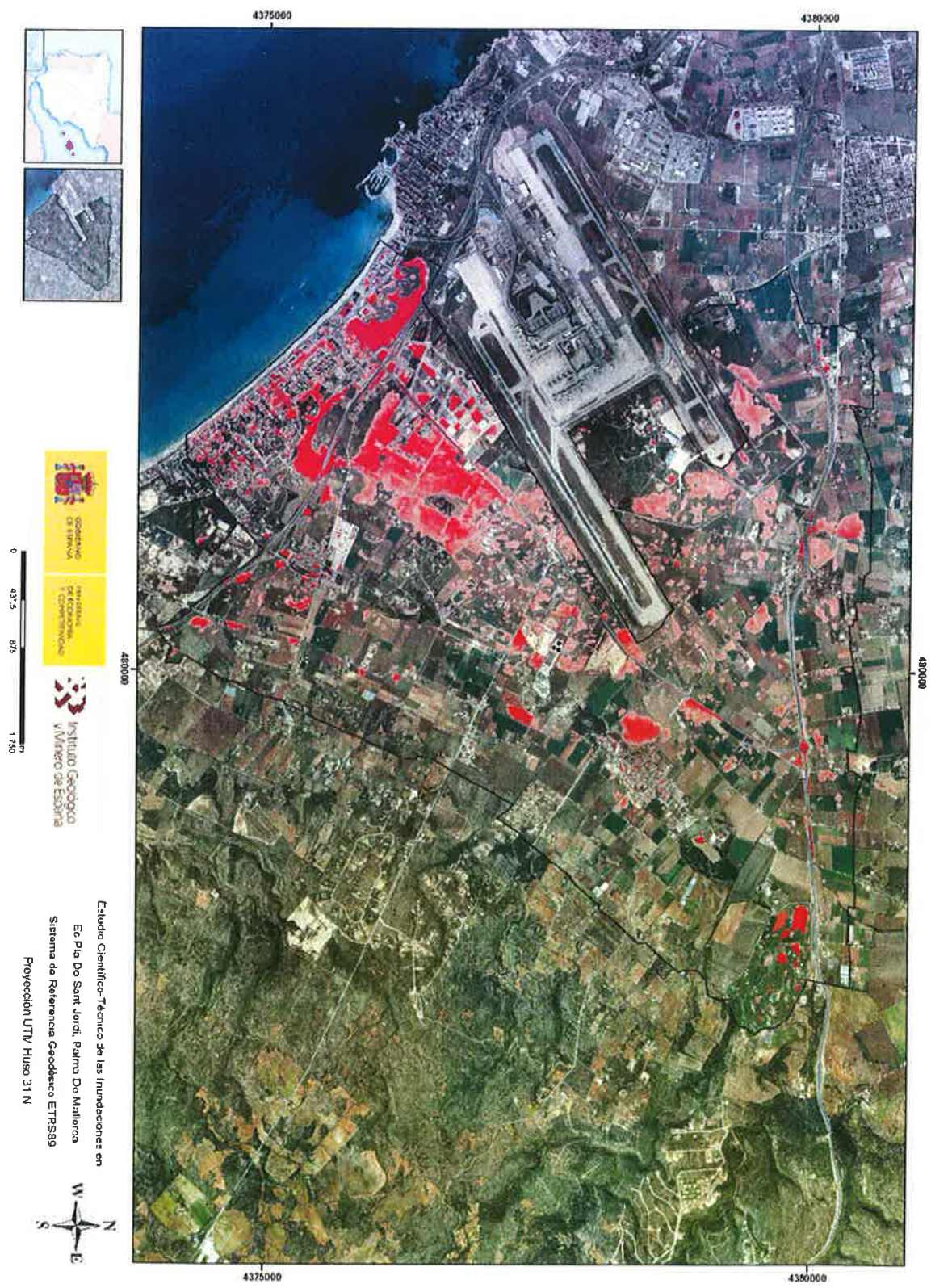


Figura 8. Ejemplos de depresiones detectadas al sur del Pla de Sant Jordi sobre el MDE sobre e PNOA.

Sin embargo, las depresiones pueden ser más o menos importantes por la superficie y por la profundidad de las mismas, es decir, por el volumen de agua que pueden ser susceptibles de retener. Las depresiones de pequeño tamaño y poca profundidad pueden acumular poco volumen de agua y por el contrario, zonas con poca superficie deprimida y más profundidad pueden ser importantes trampas de agua. Este aspecto, trasladado al caso de estudio concreto tiene una especial relevancia, ya que las depresiones son formas de la superficie del terreno, que además de tener mayor capacidad de acumular agua, su base está más próxima al nivel piezométrico del acuífero. Existe una relación directa entre profundidad y lámina de agua freática, es por ello que el conocer la profundidad de la depresión resulta un aspecto clave en estudios de este tipo. Esto significa que existe una relación directa entre profundidad y lámina de agua freática. Las depresiones cuya base esté a mayor profundidad, estarán más próximas al nivel piezométrico del acuífero que a los mismos bordes de las zonas deprimidas o a otras depresiones cercanas menos profundas. Este punto también influye en la susceptibilidad de atrapar agua. En eventos de intensa precipitación la capacidad de retener agua disminuye. Esto puede darse, por el almacenamiento de agua que no puede infiltrarse o porque el nivel piezométrico sube dejando la lámina de agua por encima de la superficie del terreno.

El volumen de agua susceptible de acumularse en el conjunto de las depresiones detectadas supera los  $0,5 \text{ hm}^3$ , si todas estuvieran al máximo de su capacidad. La media es variable dependiendo de los eventos, ya que se han observado algunos eventos de inundación como los ocurridos en 2001, con un volumen acumulado cercano a los  $0,5 \text{ hm}^3$  y otros, como los ocurridos en 2010 que están alrededor del  $0,2 \text{ hm}^3$ .

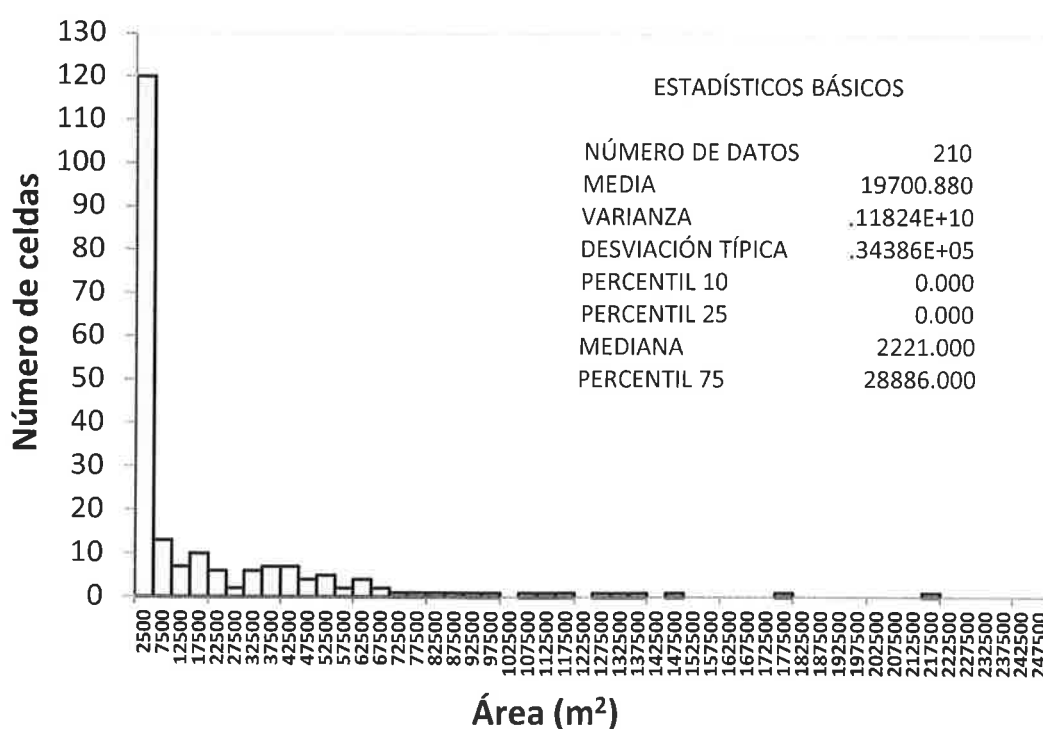


Figura 9. Histograma de frecuencias de las superficies de las depresiones detectadas

Se ha realizado una estimación de la profundidad media de las depresiones (figura 10) lo que nos da un valor medio aproximado de 2,2 cm por celda. El valor de profundidad por celda más representado es de 0,25 cm con 125 celdas, seguido de 0,75 cm en 23

celdas y 1,25 cm en 9 celdas (figura 10). Destaca sobre todo, la presencia de un gran número de depresiones por celda con profundidades entre 0,25 cm y 0,75 cm en contra de un número que no supera la treintena mayores de 2 m. Es importante destacar también, que algunas de las depresiones que han sido detectadas y que se pueden observar en el histograma de frecuencias de profundidades con valores superiores a 5 m de profundidad, son anomalías ligadas a construcciones de edificios, puentes o rotondas entre otras. Sin embargo, muchas se han tenido en cuenta porque el grado de susceptibilidad a inundarse es muy alto, como las bases de las rotondas de las autopistas del sur y del norte del Pla de Sant Jordi.

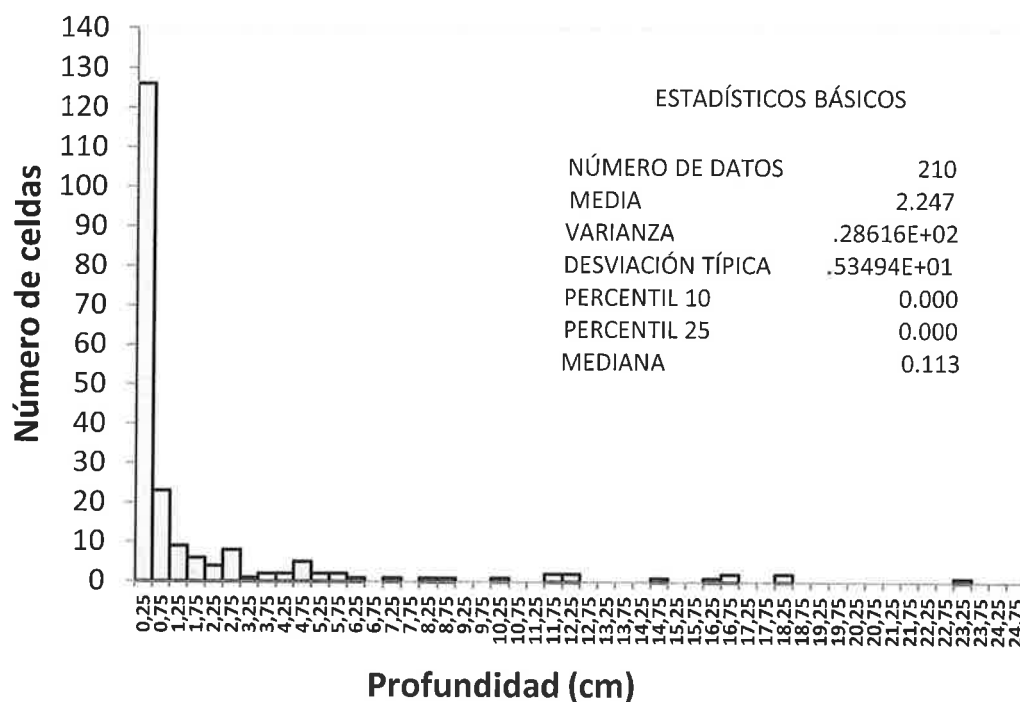


Figura 10. Histograma de frecuencias de las profundidades de las depresiones por celda.

### 1.5. Conclusiones

La detección automática de depresiones ha resultado de gran interés como una herramienta eficiente para la cartografía geomorfológica de las depresiones del Pla de Sant Jordi. Mediante su uso combinado con otras técnicas complementarias, como el análisis del mapa topográfico, la fotografía aérea, las imágenes satélite y, con el imprescindible apoyo del trabajo de campo, la detección automática ha permitido poner de manifiesto la presencia de depresiones que podrían pasar desapercibidas, bien por el elevado grado de antropización de la zona de estudio, por la huella morfológica del propio terreno o por la presencia relicta de un antiguo humedal. Los falsos positivos por lo general, corresponden a depresiones antrópicas o están relacionadas con cauces artificiales, como Sa Siquia o el Siquiò. Los falsos negativos ligados a grandes vertientes endorreicas en la zona de estudio a penas han sido producidos y no son destacables.

En el caso de estudio del Pla de Sant Jordi la detección automática de depresiones ha mostrado una imagen muy nítida de la evolución geomorfológica de un humedal natural fuertemente antropizado y de la paleogeomorfología de la zona. Se han detectado un número de depresiones muy elevado que ocupn 1/3 parte de la superficie total estudiada,



alrededor de 400 ha. Las depresiones no presentan una geometría clara y homogénea aunque cuantitativamente son más importantes las de menor tamaño y poca profundidad. No obstante, existen grandes áreas deprimidas, como la zona del Ulla de Son Mir o el sector ese y noreste del aeropuerto, en los que todavía existen reductos del antiguo humedal. Al sur del aeropuerto, el humedal de Ses Fontanelles aparece como una gran depresión que está permanentemente inundada.

El análisis combinado superficie-profundidad de depresión ha permitido estimar el volumen de agua que pueden almacenar estas zonas endorreicas, en torno a  $0,5 \text{ hm}^3$ , aunque el desborde de las mismas puede suponer que durante un periodo de inundaciones intenso supere el  $1 \text{ hm}^3$ .

Por un lado, los límites al norte, sur, este y oeste derivados de construcción urbanas y viales, han dado lugar a que el margen este del Pla de Sant Jordi se pueda considerar como una gran depresión limitada por grandes barreras impermeables. El aeropuerto como núcleo central de mayor influencia en el área y zona elevada, ha dado lugar a que en este margen haya generado una gran depresión sobre la que han ido desarrollándose nuevos usos del suelo a lo largo del todo el siglo XX y XXI

Las infraestructuras de viales juegan también un rol muy significativo puesto que su desarrollo continuado en el tiempo ha supuesto la formación de zonas deprimidas en sus márgenes y en la base de las rotondas o puentes. Estos puntos, pueden considerarse zonas de alto riesgo de inundación ya que, en casi todos los casos, actúan como trampas de agua y se inundan rápidamente, con el consiguiente efecto que tiene sobre las propias infraestructuras. Las construcciones urbanas son otro elemento que en algunos casos da lugar a depresiones, especialmente en los bordes de las mismas o en los parques o patios interiores, actuando en su conjunto como barrera impermeable natural de áreas deprimidas

En el caso de las depresiones derivadas de otros usos del suelo, destacan por un lado la parcelación agrícola. Muchas parcelas estudiadas han ido cambiando sus usos del suelo para lo cual, han tenido que modificar y/o renovar la tierra de cultivo. Esto ha provocado que muchas estén elevadas con respecto a otras que no han sufrido modificaciones y, que actúan, como pequeñas cuencas endorreicas. Es destacable la depresión del Ulla de Son Mir no sólo, por ser una zona deprimida sino porque en ese punto se ubica la descarga natural de un acuífero kárstico que drena al Pla y por tanto, si entra en carga hidráulica y drena es otro punto susceptible de inundarse.

Desde una perspectiva global e integral el mapa de depresiones del Pla de Sant Jordi muestra una gran zona deprimida entorno al aeropuerto (especialmente al norte y al este) dentro de la cual se han detectado depresiones de menor tamaño y profundidad variable. La distribución heterogénea y la gran densidad de depresiones por unidad de superficie muestra un sistema fuertemente transformado por la acción humana que dibuja un puzzle complejo. Este hecho, viene condicionado por la evolución del territorio, pasando de ser un humedal natural a un área antropizada con una extensa variedad de usos del suelo. El estudio de las depresiones constata que existe un permanente intento natural de reequilibrio del humedal donde, tanto las aguas del acuífero de Pla como las aguas del mar, intentan ocupar un área que durante muchos años fue una zona húmeda. Por ello, cuando existen periodos de menor presión sobre este territorio, bien por el abandono o retardo de cultivos, porque se bombea menos

volumen de agua o porque se produce una deceleración en la construcción de áreas urbanas y viales, el sistema intenta recuperarse de manera natural, ocupando como sucede en este caso, áreas habitadas o cercanas a ellas con los consiguientes problemas de inundaciones.

## **2. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE INUNDABILIDAD EN EL PLA DE SANT JORDI, PALMA DE MALLORCA**

### **2.1. Introducción**

El acuífero de Pla de Sant Jordi constituye una parte significativa del patrimonio geoambiental de Palma y es el continente de una de las mayores fuentes de recursos hídricos de su término municipal, Además posee importantes valores científicos (geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, mineros), culturales (construcciones hidráulicas como los molinos, pozos artesanales, paisajes característicos) y económicos (agricultura, ganadería o los distintos usos del agua en ellos almacenada).

Contiene un registro geológico nítido que, en muchos casos, es de los pocos lugares que ha preservado la historia reciente de la Tierra grabada en los sedimentos detríticos de relleno de la cuenca y de la ocupación humana, con los restos de construcciones rurales y urbanas, poniendo de manifiesto el importante papel que jugó en la vida de las poblaciones más recientes. El Pla de Sant Jordi presenta también importantes valores económicos, entre ellos se encuentra la agricultura y el turismo, debido a que la desecación del antiguo humedal para reconvertirlo en tierras de cultivos en marzo de 1846, mediante la constitución de la *Compañía de desecación del Prat de Sant Jordi S.A.*, dirigidos por el ingeniero holandés Paul Bouvij de Schorenberg (Rosselló-Verger, 1959). Estos trabajos duraron hasta principios del siglo XX con la construcción de los cueces de drenaje más importantes como Sa Siquia y los siquios de Can Puigcerver, que atravesaban desde el norte (El Ullal de Son Mir) por el municipio de sa Casa Blanca. Esta acequia en concreto ha sido intersectada y, por tanto, inoperativa, por las pistas del aeródromo militar y, otras por las del aeropuerto de Son San Joan. Sólo Sa Siquia y el Siquiò son operativas totalmente en este momento (Rosselló-Verger, 1959).

Por tanto, la historia reciente muestra que procedemos de un humedal desecado hace casi dos siglos, aspecto este fundamental en las inundaciones intermitentes objeto de este trabajo, ya que estas son consecuencias de un el reequilibrio permanente que fuerza el propio sistema. De hecho, las inundaciones en el Pla datan de un registro que se inicia en el siglo XIX cuando en 1814 se produjo una gran inundación en los terrenos de Sant Jordi en los que murió un número considerable de habitantes (Rosselló-Verger, 1959). Ese fue un punto de inflexión que marcó un antes y un después cuando el Marqués de Campofranco empezó con las primeras obras en los años 1815 y 1816 a en los terrenos de Son Sunyer mediante la construcción de una Siquia desde la Bassa d' en Vidrier hasta a la Bassa de So n'Oms (figura 11).

Todo ello, no ha llevado a plantear un método novedoso que permitiera analizar las diferencias por unidad de superficie en cuanto a la susceptibilidad de inundación del Pla de Sant Jordi. Este método, INUJORDI, se ha basado en la elección de diferentes variables ligadas a la superficie del terreno y asociadas al conconiendo histórico de trabajar sobre un área húmeda desecada. El análisis morfométrico de inundabilidad permitirá cuantificar en qué medida influye cada variable elegida, que peso tiene cada

una en relación a las inundaciones y el peso conjunto de todas las variables ponderadas aplicando diferentes fórmulas.

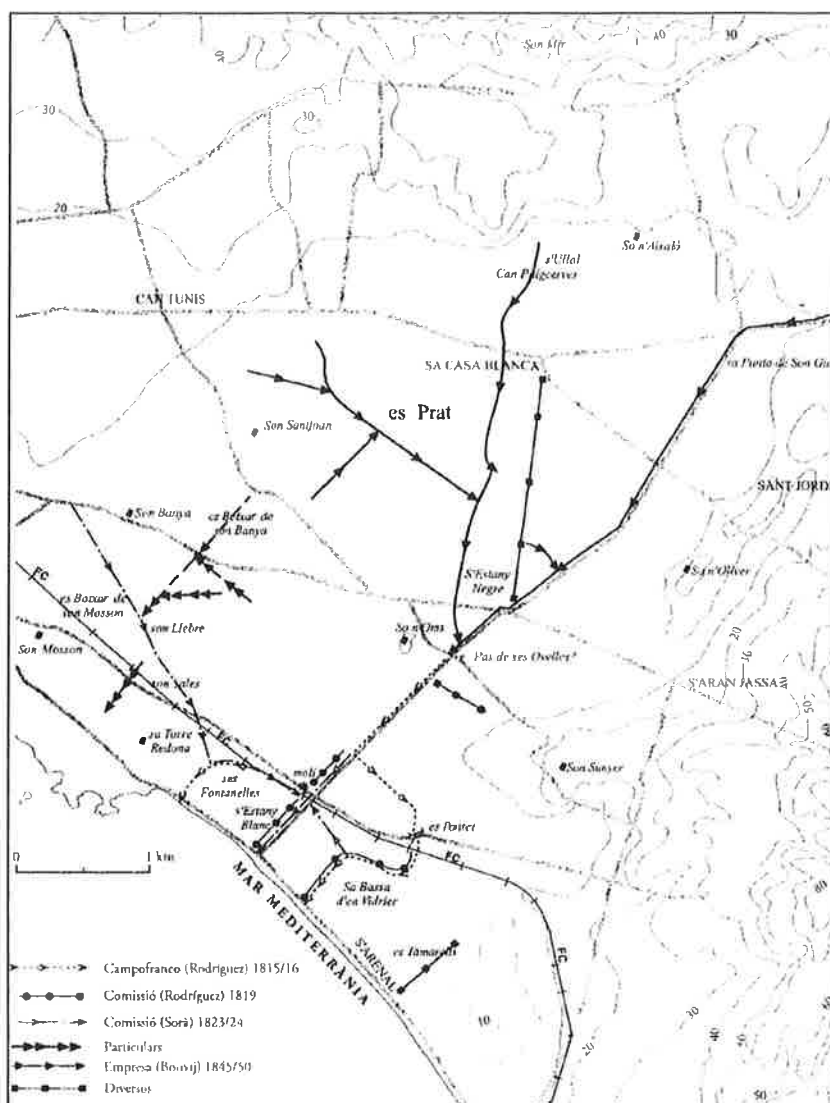


Figura 11. Etapas de la obra de desecación del Pla de Sant Jordi (Rosselló-Verger, 1959).

## 2.2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es la aplicación de una nueva metodología que nos permita obtener las áreas más susceptibles de ser inundadas en el Pla de Sant Jordi. Para ello, se plantean dos objetivos:

1. La cuantificación de la distribución espacial que tiene cada variable elegida y la mayor o menor influencia en relación a las inundaciones.
2. La cuantificación del conjunto de variables, ponderadas de acuerdo con un peso asignado, que permita obtener un índice de inundabilidad.

## 2.3. Metodología

El método aplicado para el desarrollo de la cartografía morfométrica de inundabilidad se basa en la realización de diferentes capas temáticas de los diferentes factores que favorecen la inundabilidad, que posteriormente, se integran en un único mapa final con un índice donde se delimitan diferentes zonas desde baja inundabilidad a alta inundabilidad. Se combinan tanto la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como Técnicas de Evaluación Multicriterio (TMC). Este método se basa en la metodología aplicada en la protección de áreas kársticas, PROTEKARST (Carrasco *et al.*, 2015). A continuación, se exponen la secuencia de pasos y criterios seguidos para el cálculo de cada una de las cartografías:

1. El primer paso es determinar qué factores influyen a la inundabilidad teniendo en cuenta al mismo tiempo la disponibilidad de datos para cuantificar dicho factor. Se han considerado 7 variables de influencia:
  - A. Depresiones (D)
  - B. Pendientes (P)
  - C. Geomorfológico (G)
  - D. Usos del suelo (U)
  - E. Geológico (E)
  - F. Permeabilidad (R)
  - G. Infraestructuras y viales (T)
2. Creación de unidades analíticas espaciales coincidentes. Para poder tener celdas comparables y operables fue necesario obtener una división de la zona de estudio en celdas que coincidieran espacialmente. Para ello, se creó una malla de tamaño de celda de 500 x 500 m implementada con el software ArcGis, que fue superpuesta a cada una de las variables cartografiadas seleccionadas previamente.
3. Conversión de formatos. Para llevar a cabo las tareas de análisis espacial fue necesario convertir los datos originales (en formato vectorial de tipo poligonal) al formato común de salida raster.
4. El cuarto paso es cuantificar los valores de cada factor y reclasificarlos entre un valor de 1 a 5. Uno considera es baja inundabilidad de acuerdo con dicho factor y cinco es alta inundabilidad de acuerdo a dicho factor.
5. Establecimiento de criterios de importancia de cada factor y pesos, o lo que es lo mismo, el establecimiento de valores específicos de cada criterio de acuerdo con su nivel de importancia relativa.
6. Finalmente se aplica un criterio determinado para integrar todos los factores en un mapa final. Este criterio puede ser tomar el valor máximo de los factores, el valor medio o cualquier otro estadístico que se considere significativo con el objetivo del trabajo. Con cualquiera de estos criterios estamos considerando que todos los factores tienen la misma importancia en la determinación del índice de

inundabilidad. Cuando los factores tienen diferente importancia es posible obtener un índice final donde cada factor se pondera por un peso que representa su importancia.

$$II = \frac{w_D D + w_P P + w_G G + w_U U + w_E E + w_R R + w_T T}{w_D + w_P + w_G + w_U + w_E + w_R + w_T}$$

Donde (II) es el índice de inundabilidad y  $w_D$  es el peso que se asigna al factor de depresiones (D).

Tanto para la ejecución de las tareas de análisis, así como para el remuestreo y la elaboración de las diferentes cartografías, se ha utilizado el software ArcGIS en su versión 10.2.1. A continuación se desarrollan los valores asignados a cada variable y las tres metodologías que han sido aplicadas para la obtención de las diferentes representaciones espaciales relativas al grado de inundabilidad del Pla de San Jordi.

## 2.4. Resultados

### 2.4.1 Cálculo de las variables aplicadas en el método

Se estableció un nivel de importancia relativa de cada variable de seleccionada. Para ello, se realizó una reclasificación de los datos de acuerdo a la nueva escala común, con valores comprendidos entre 1 y 5 (a la que se asigna una paleta de colores representativos para cada valor). Las zonas de valor 1 (azules) representan áreas con baja susceptibilidad a inundarse y las que tiene valor 5 (rojas) zonas con alta susceptibilidad a la inundación.

Los criterios que se tomaron para establecer el nivel de importancia relativa de cada variable fueron:

- a) **Geológica.** Para la cuantificación de esta variable se han tenido en cuenta dos aspectos el mapa litológico del la zona de estudio (tabla 1 y figura 12).

Cuantificación de las variable geológica	Valor	Peso
Dolomías	1	Muy bajo
Calizas	1	Muy bajo
Calizas bioclásticas	1	Muy bajo
Margocalizas	2	Bajo
Areniscas	2	Bajo
Bloques y clastos rocosos	3	Medio
Gravas	3	Medio
Arcillas	4	Alto
Limos	5	Muy alto

Tabla 1. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa litológico del la zona de estudio.

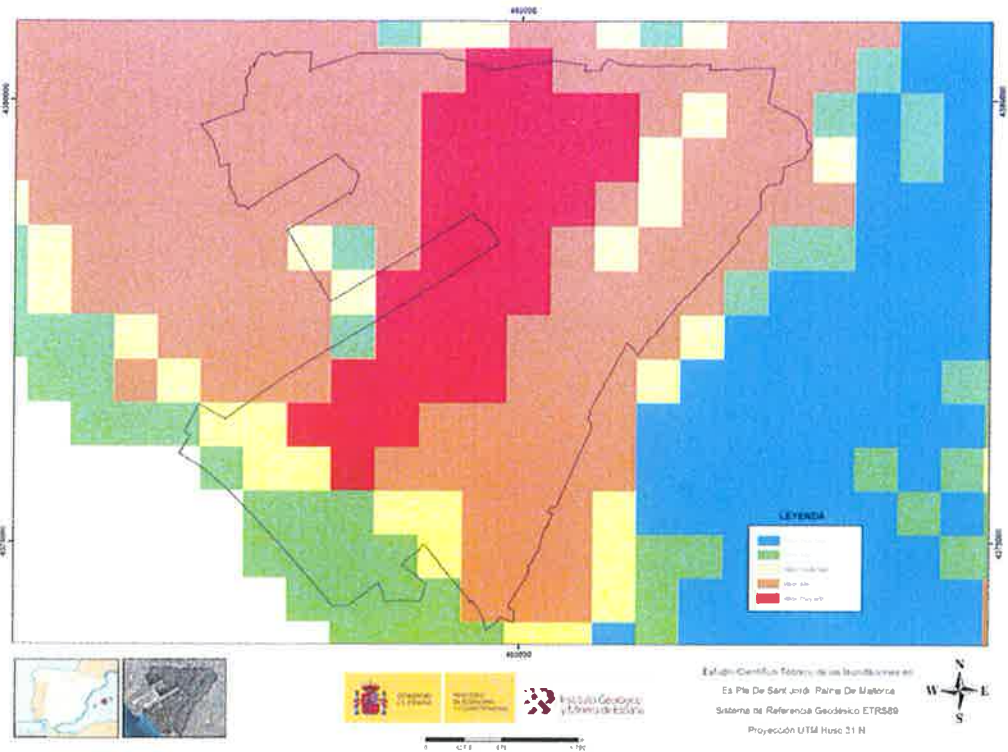


Figura 12. Mapa de la cuantificación de la variable geológica en el Pla de Sant Jordi.

En el caso de celdas con varias litologías, se les asignó el valor de la litología que ocupara una mayor superficie. Los elementos estructurales como contactos mecánicos, cambios laterales, fallas o pliegues existentes por celda, no fueron tenidos en cuenta puesto, debido a que su relevancia en la zona de estudio era poco significativa (tabla 1 y figura 2).

- b) **Geomorfológica.** Para la cuantificación de esta variable se ha tenido en cuenta la capacidad de retener agua de las formas existentes, derivadas de procesos geomorfológicos (tabla 2 y figura 3).

Cuantificación de las variable geomorfológica	Valor	Peso
Abanicos aluviales	2	Bajo
Depósitos de vertientes	3	Medio
Fondos de valle	4	Alto
Fondos húmedos	5	Muy alto
Lagoon	5	Muy alto

Tabla 2. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa geomorfológico del la zona de estudio.

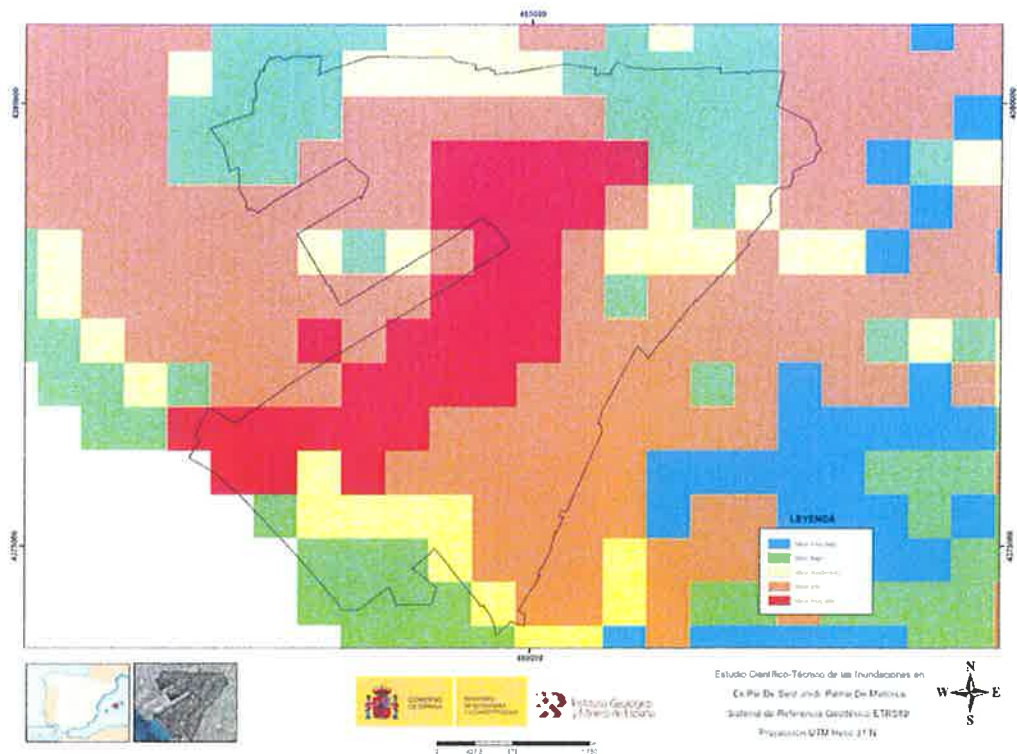


Figura 13. Mapa de la cuantificación de la variable geomorfológica en el Pla de Sant Jordi.

- c) **Permeabilidad.** La cuantificación de esta variable se ha realizado tomando como base el mapa de permeabilidad de la zona de estudio realizado por el IGME (2002), mediante una metodología específica que relaciona la litología con la permeabilidad a través de distintos parámetros hidráulicos (tabla 3 y figura 4).

Cuantificación de las variable Permeabilidad	Valor	Peso
Muy baja	1	Muy bajo
Baja	2	Bajo
Media	3	Medio
Alta	4	Alto
Muy alta	5	Muy alto

Tabla 3. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa geomorfológico del la zona de estudio.

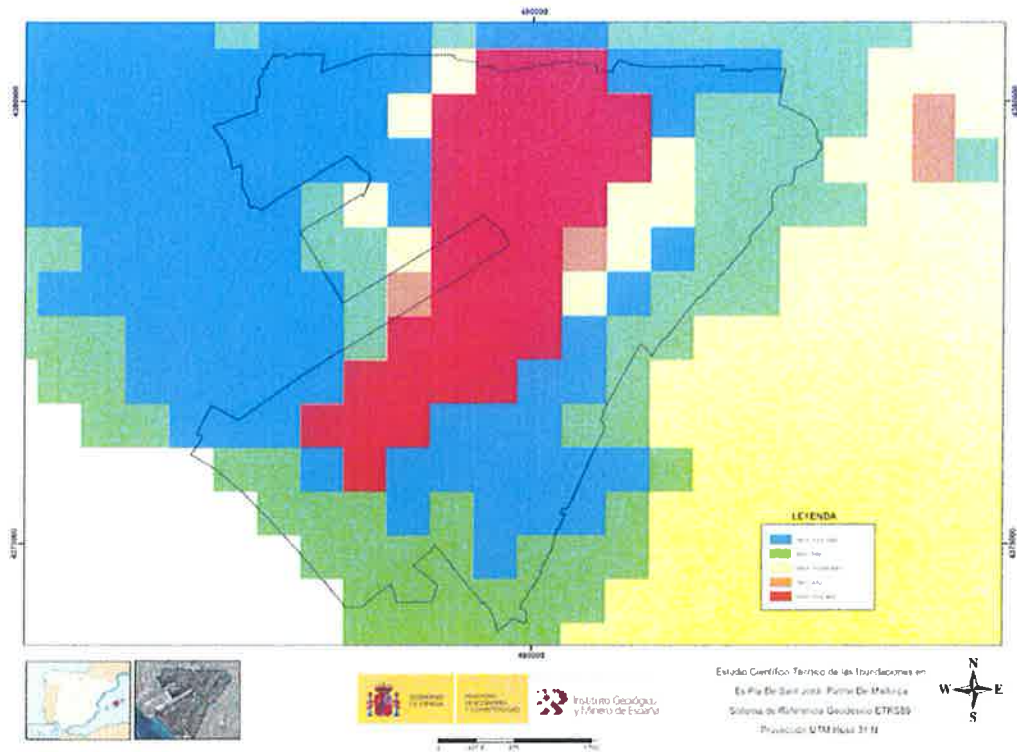


Figura 14. Mapa de la cuantificación de la variable permeabilidad en el Pla de Sant Jordi.

- d) **Usos del suelo.** Esta variable es la que presenta más elementos de cuantificación. En la siguiente tabla quedan reflejados los más significativos. Para la cuantificación de la variable se ha tenido en cuenta la capacidad de retener agua cada distinto usos del suelo (tabla 4 y figura 5).

Cuantificación de las variable Usos del Suelo	Valor	Peso
Rocas desnudas de fuerte pendiente	1	Muy bajo
Matorral boscoso de coníferas	2	Bajo
Frutales cítricos	3	Medio
Mosaico de cultivos mixtos de secano y regadío	4	Alto
Zonas industriales y comerciales	5	Muy alto

Tabla 4. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa usos del suelo en la zona de estudio.



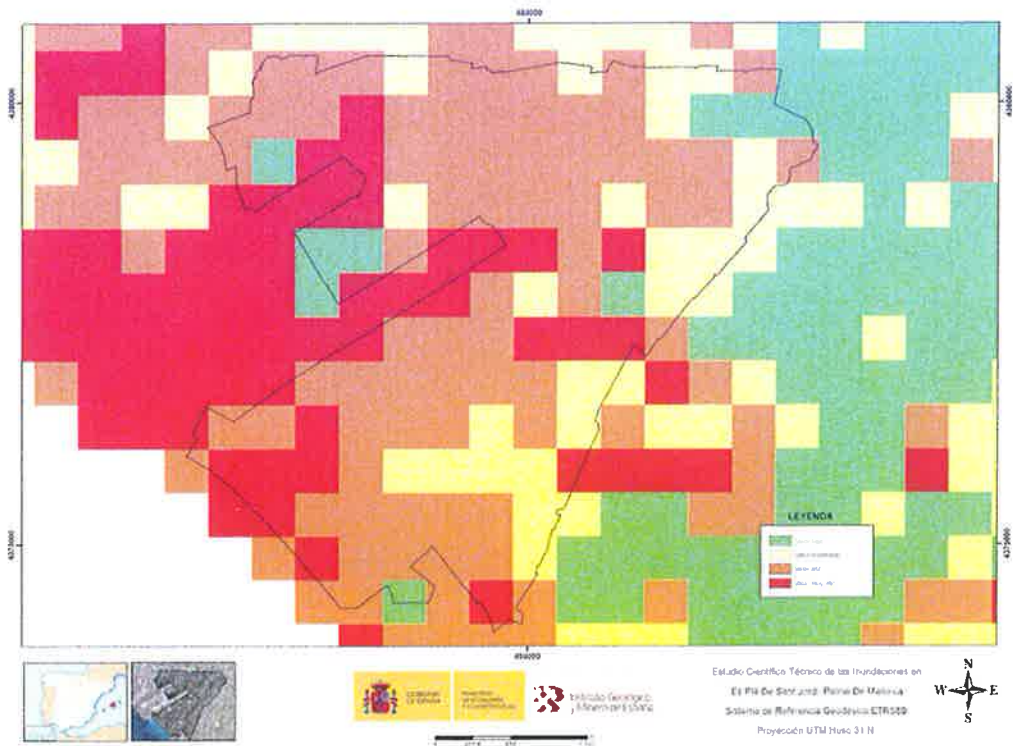


Figura 15. Mapa de la cuantificación de la variable usos del suelo en el Pla de Sant Jordi.

- e) **Infraestructuras urbanas y viales.** En este caso, se parte de la base que el cualquier infraestructura presenta índices de permeabilidad muy bajos. Se consideró que zona urbana o vial debe tener un peso de 5, por lo que la cuantificación realizada utilizó el porcentaje de superficie ocupada por celda (tabla 5 y figura 6).

Cuantificación de las variable infraestructuras urbanas y viales	Valor	Peso
≤20%	1	Muy bajo
20-40%	2	Bajo
40-60%	3	Medio
60-80%	4	Alto
> 80%	5	Muy alto

Tabla 5. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa infraestructuras urbanas y viales en la zona de estudio.

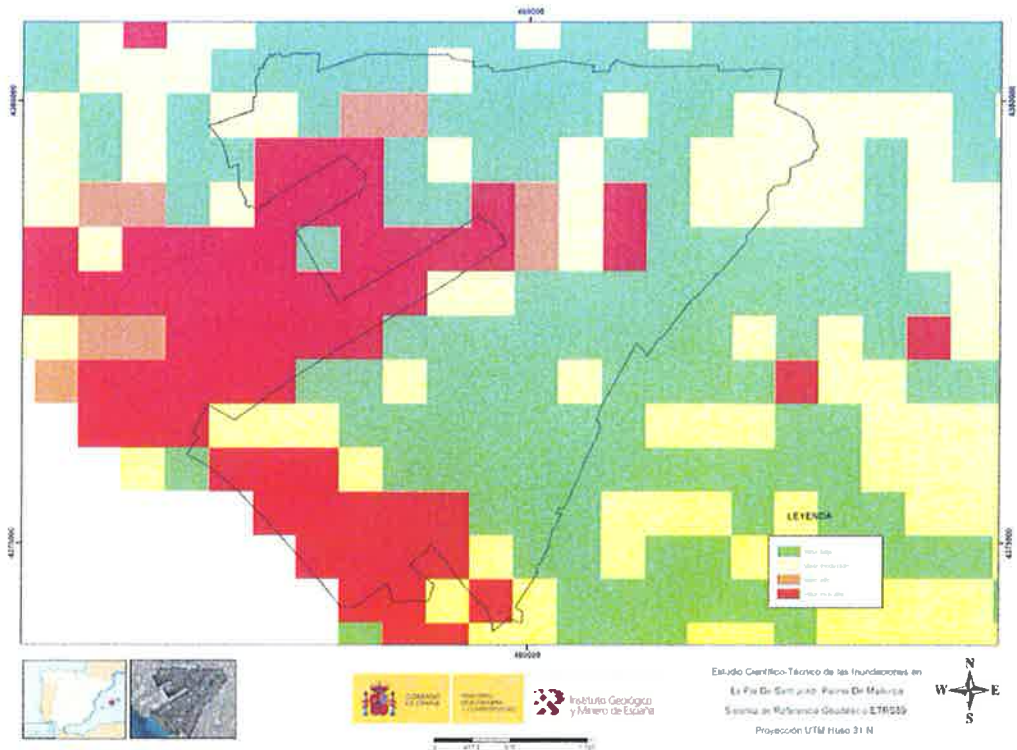


Figura 16. Mapa de la cuantificación de la variable Infraestructuras en el Pla de Sant Jordi.

- f) **Pendientes.** Para el sistema de cuantificación de pendientes se tuvo en cuenta, en primer lugar los grados de desnivel que se observan en la leyenda de la figura XXX y el porcentaje que ocupan estos por unidad de superficie. Sin embargo, muchas celdas presentan gran diversidad dentro de la clasificación de valores, por lo que se ponderaron aquellas zonas que presentaban alguna parte de la superficie con pendiente superiores a  $12,5^\circ$ , dándole mayor peso al valor final asignado (tabla 6 y figura 7).

Cuantificación de las variable pendientes	Valor	Peso
0 - $1,7^\circ$	1	Muy bajo
$1,7-5,3^\circ$	2	Bajo
$5,3-12,5^\circ$	3	Medio
$12,5-23,3^\circ$	4	Alto
$25,3-76^\circ$	5	Muy alto

Tabla 6. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa pendientes en la zona de estudio.

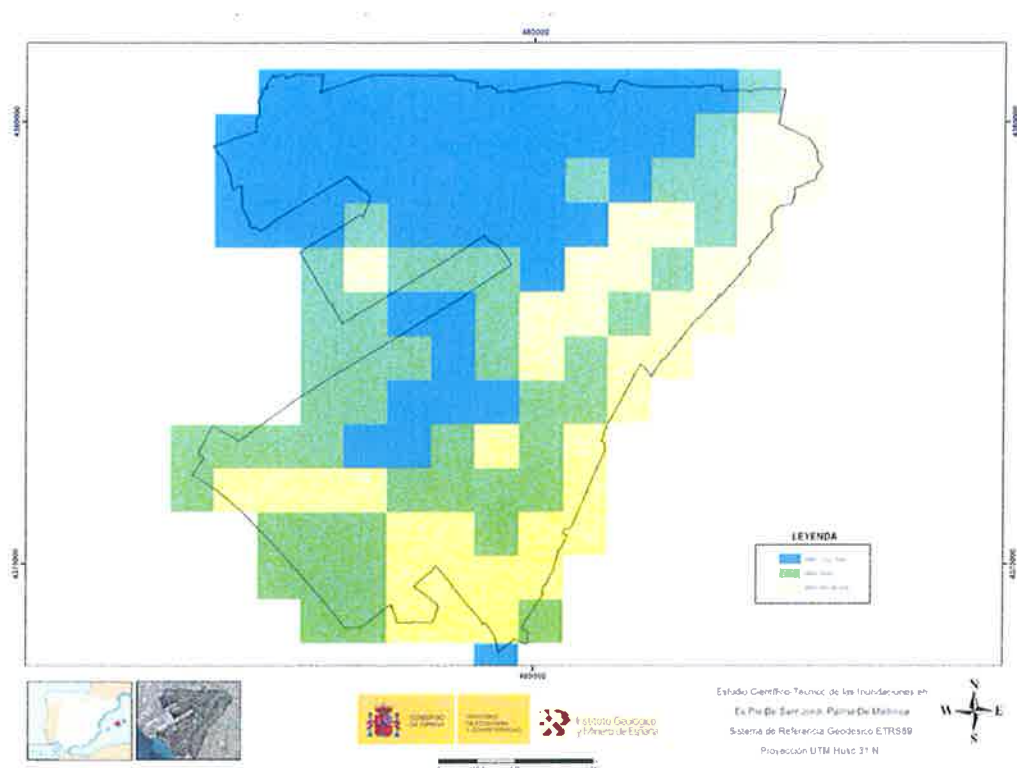


Figura 17. Mapa de la cuantificación de la variable pendientes en el Pla de Sant Jordi.

- g) **Depresiones.** Para las depresiones se obtuvo un coeficiente que tenía en cuenta la relación profundidad-superficie ocupada. La variable superficie se multiplicó por 1,5 para depresiones con profundidad mayor a -2 m con el fin de obtener un peso final que fuese más real en la cuantificación de las celdas (tabla 7 y figura 8).

Cuantificación de las variable Depresiones	Valor	Peso
≤20%	1	Muy bajo
20-40%	2	Bajo
40-60%	3	Medio
60-80%	4	Alto
> 80%	5	Muy alto

Tabla 7. Cuantificación de acuerdo con los aspectos el mapa depresiones en la zona de estudio.

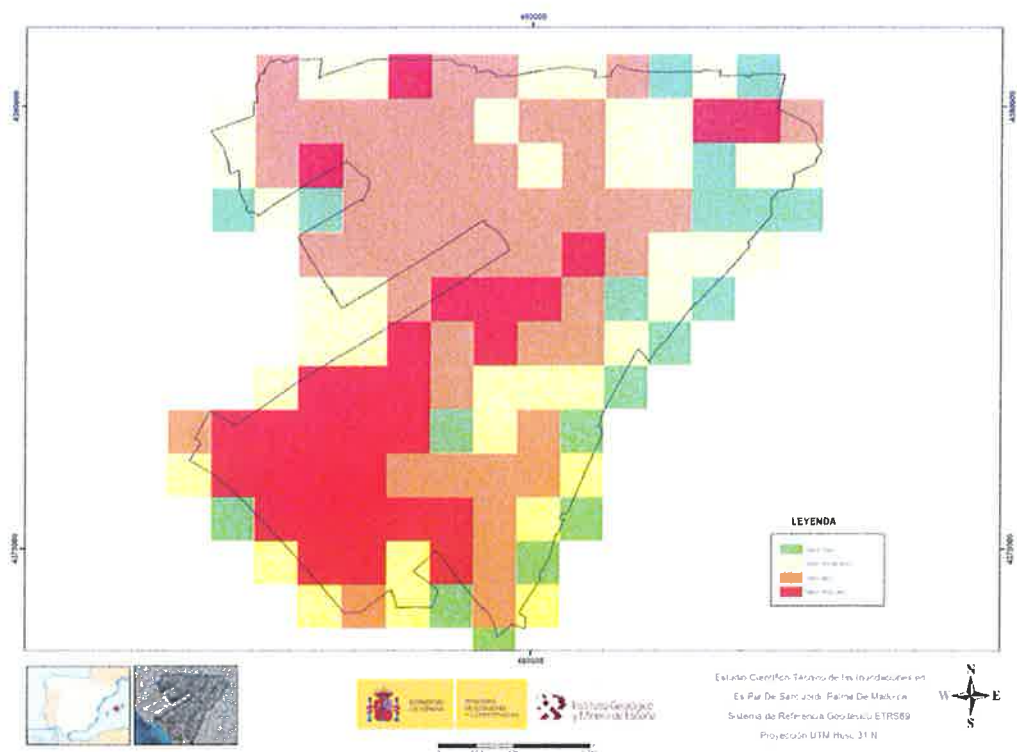


Figura 18. Mapa de la cuantificación de la variable depresiones en el Pla de Sant Jordi.

Por último el cálculo del valor máximo de cada celda se realizó mediante la superposición de todas las variables raster elegidas, asignando a en cada celda el valor máximo obtenido en cualquiera de las variables (figura 9)

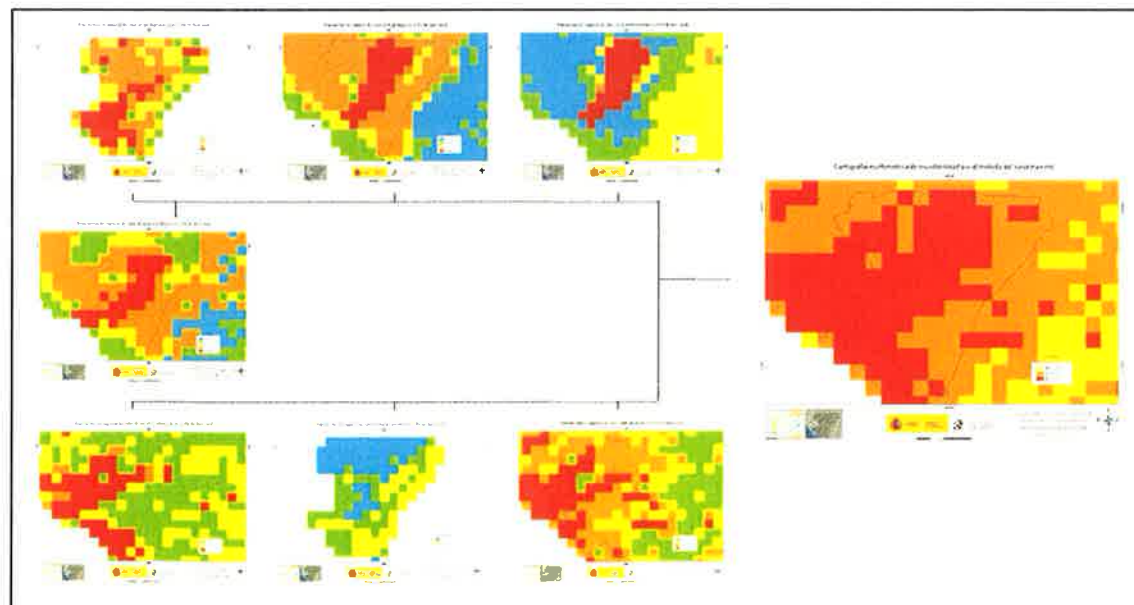


Figura 19. Desarrollo metodológico de INUJORDI.

#### 2.4.2 Cálculo de la por el método del valor máximo

El desarrollo de la primera cartografía se realizó mediante la asignación el valor maximo en cada celda que resultó de la asgnación de pesos a las diferentes variables. Es decir, se reclasificó el mapa asignando en cada celda de 500 x 500 m el valor más alto obtendio de la cuantifiación de las variables y, por consiguiente el peso resultante (geológico,

geomorfológico, depresiones, permeabilidad etc.). De tal forma el mapa refleja una distribución espacial de inundabilidad en la que cada celda representa el peso máximo de cada variable considerada como el factor del control inundabilidad.

Es resultado muestra una distribución de pesos obtenidos en la zona de estudio cuya variabilidad está entre muy alta (peso 5, representado en rojo) y alto representada (peso 4, en naranja). Sólo las zonas adyacentes al norte y al este al área de estudio presentan valores medios, representadas en amarillo con peso 3. Los valores muy altos abarcan la mayor superficie, cupando todo el borde sur, central y norte de la zona de estudio con más de 800 ha. Este valor obtenido viene determinando por el resultado del peso que tienen las variables permeabilidad, infraestructuras urbanas y viales y geología en la zona central y norte, y depresiones en la zona sur. Los valores altos están prácticamente limitados al margen este del Pla de Sant Jordi en el área seleccionada con cerca de 400 ha de superficie. En este caso los factores de control más importantes son geología, geomorfología y usos del suelo.

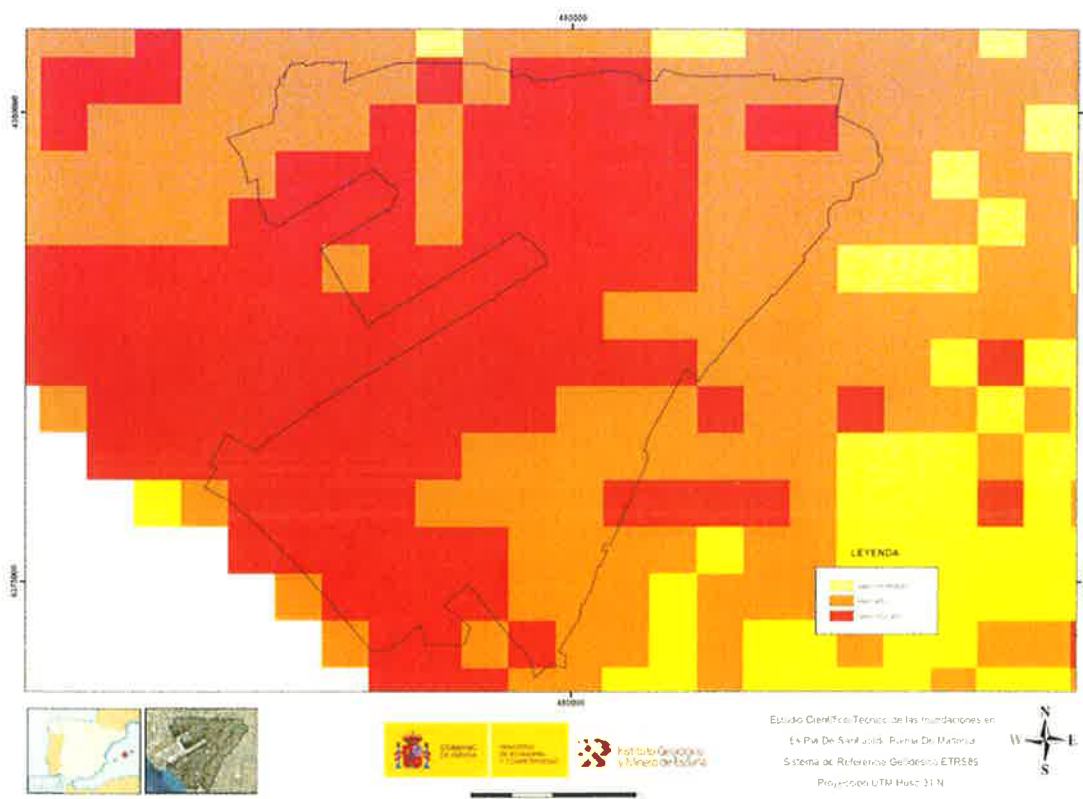


Figura 20. Cartografías morfométrica de inundabilidad por el método del valor máximo.

### 2.4.3 Cálculo del valor medio de las variables de influencia

Para la obtención de la segunda cartografía se calculó el sumatorio de los valores ponderados de cada variable obtenidos en el primer paso de la metodología anterior y el resultado obtenido se dividió por 5. Posteriormente, con objeto de unificar la escala de valores inicial (valores comprendidos entre 0 y 1), se llevó a cabo una nueva reclasificación de los valores obtenidos entre 1 y 5. El mapa resultante obtenido muestra más variabilidad espacial de pesos que el primero (figura 11) con un 500 ha con valor muy alto en la zona central y norte; un superficie similar que se distribuye en los márgenes este y oeste, y entorno a 200 ha de valor medio en los bordes noreste y

noroeste. Debido a que este mapa resulta de un valor ponderado, los pesos relativos de las variables son más importantes. La presencia de valores muy altos en la zona central significa que existen un gran número de variables que presenta una muy alta susceptibilidad a inundarse. Lo mismo sucede con los valores altos, muy similares al mapa anterior lo que indica que entre ellas las variables tienen una distribución de pesos muy parecidos. La menor similitud entre la distribución espacial de valores en las diferentes variables es la que da lugar a que existan susceptibilidades moderadas en los bordes noreste y noroeste.

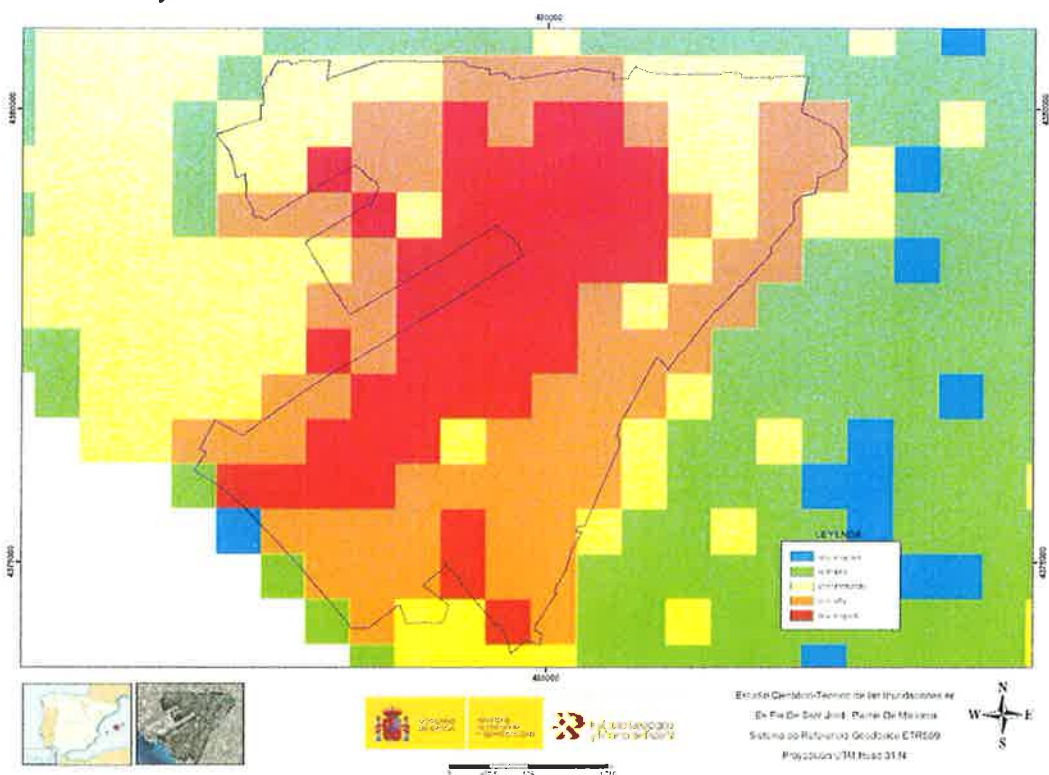


Figura 20. Cartografías morfométrica de inundabilidad por el método del valor ponderado.

### 2.4.4 Cálculo de la Sumatoria Lineal Ponderada

Por último para obtener un tercer mapa que redujera el umbral de incertidumbre con respecto a los dos anteriores, y que además éstos pudieran ser comparados entre ellos, se aplicó el método de análisis multicriterio: Sumatoria Lineal Ponderada. Esta metodología utiliza la siguiente fórmula:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Donde:

- $r_i$  es el índice de inundabilidad de cada celda  $i$
- $w_j$  es el peso asignado a cada variable de influencia  $j$
- $v_{ij}$  es el valor ponderado de cada factor considerado

Para la implementación del método se tomaron los valores ponderados de cada variable calculados en primera metodología aplicada. Posteriormente, tratando de adoptar un modelo de decisión que permitiera seleccionar la alternativa de mejor comportamiento en base a su importancia cuantitativa relativa, se llevó a cabo una ponderación de las variables de influencia. Para ello, se establecieron una serie jerarquías y pesos teniendo en cuenta que la influencia total de todas las variables debía ser al 100% (tabla 8).

	Depresiones	Pendientes	Geomorfológico	Usos del suelo	Geológico	Permeabilidad	Infraestructuras y viales	TOTAL
Pesos evaluador 1	5	2	3	4	3	4	3	25
Pesos evaluador 2	5	2	3	4	3	4	4	25
Pesos evaluador 3	5	2	4	3	4	5	4	25
X pesos evaluadores	5	2	3	4	3	4	4	25
%	20	8	12	16	12	16	16	100

Tabla 8. Pesos definidos para cada variable de influencia.

El mapa que resulta de la aplicación de este método (figura 12) muestra por una parte, un descenso en una unidad de medida y en las zonas donde en las cartografías anteriores presentaba valores muy alto y alto (peso 5 y 4), ahora ofrece valores alto y medio (peso 4 y 3). Puntalmente, sucede lo mismo en una pequeña zona al noreste y otra al este, cuyo resultado muestra valores bajos y por tanto, poca susceptibilidad a inundarse.

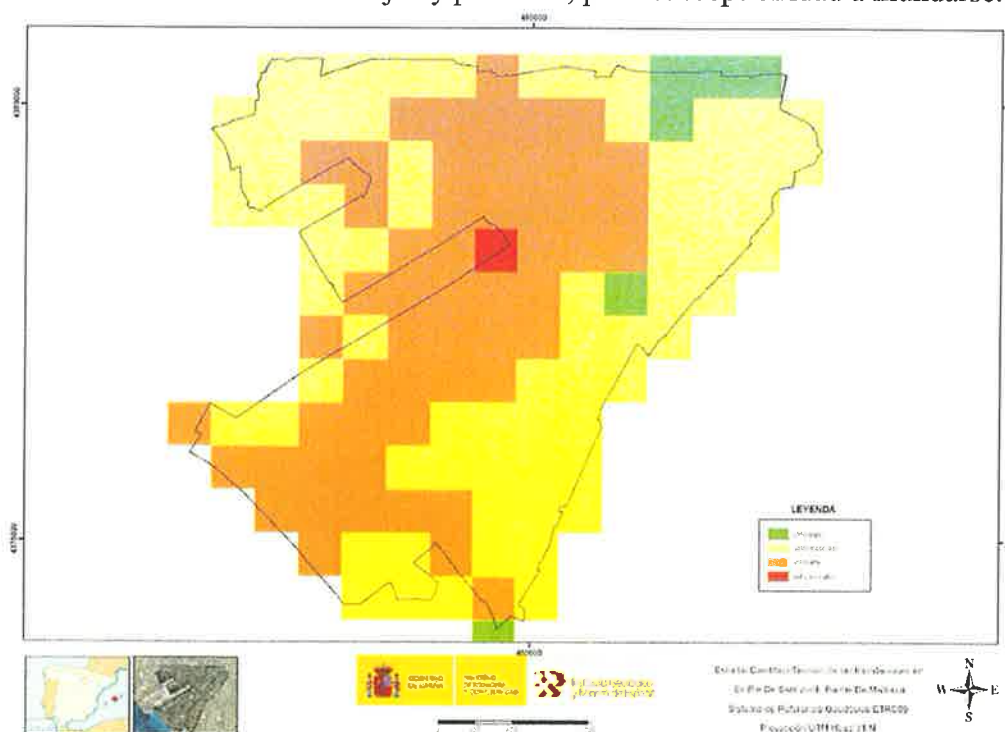


Figura 21. Cartografías morfométrica de inundabilidad por el método del valor doblemente ponderado.

### 3. CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDADAS EN EL PLA DE SAN JORDI MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

La teledetección es una técnica que se ocupa de la adquisición de imágenes de la superficie terrestre desde el espacio así como de su tratamiento digital y de su interpretación en el marco de una determinada aplicación (por ejemplo la cartografía de zonas inundadas).

El fundamento físico de la teledetección se basa en la detección y registro de los valores de radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos y el terreno en la superficie de la Tierra. Cada objeto o material de la superficie terrestre tiene su propia firma espectral es decir tiene un comportamiento característico para diferentes intervalos de longitudes de onda (bandas espectrales). Por ejemplo el comportamiento del agua es muy característico pues su reflectancia es pequeña para el intervalo de longitudes de onda de 0.4 a 0.7 micrómetros y es nula fuera de dicho intervalo. Sin

embargo estas condiciones pueden alterarse debido a la profundidad del agua o su turbidez entre otros factores.

Por otra parte, cada satélite se caracteriza por el sensor que tiene a bordo y que es capaz de proporcionar imágenes con un determinado tipo de resolución espacial, espectral y temporal. La resolución espacial es el tamaño del píxel en unidades del terreno. La resolución espectral es el número de bandas espectrales y su anchura y la resolución temporal es el intervalo temporal empleado por el satélite para proporcionar una imagen del mismo lugar.

Existen muy pocas estimaciones realizadas sobre qué porcentaje superficie inundada mediante imágenes satélite. Históricamente, el estudio de zonas inundadas se ha centrado en datos tomados sobre el terreno. Sin embargo, en el campo que más se ha avanzado en los últimos años y que mejores resultados ha dado ha sido el estudio a partir de modelos digitales del terreno, de lo que se deriva principalmente aspectos orográficos como la pendiente y su relación con la acumulación de agua. Pero, fundamentalmente ha sido la aplicación de la teledetección, por la importancia que tiene la variación espaciotemporal de las precipitaciones en su comportamiento hidrológico y por lo que la herramienta ha supuesto un salto cualitativo en este campo (Blöschl, 1999; Cline y Dosier, 1998). La observación mediante imágenes satélite presenta algunas dificultades, como la resolución espacial, disponer de imágenes en periodos continuos de tiempo, la calibración de la imagen o el sensor del satélite que se haya utilizado (Chuvieco, 1996) . En zonas extremas de relieve, montañosas o muy planas, este aspecto se hace más importante, ya que la topografía junto con las propias condiciones meteorológicas puede generar errores importantes de calibración y, por defecto, de interpretación y cálculo de la distribución del agua a partir de la imagen. A pesar de ello, la teledetección se muestra eficaz para el estudio de la posibilidad potencial de inundaciones ya que podemos obtener el dato espacio-temporal de superficie inundada, aunque el cálculo mediante este método, es un dato aproximativo e indirecto. No obstante, el método se puede complementar con datos tomados sobre el terreno que si proporcionan registros directos y reales del volumen y de agua acumulada.

### **3.1. Metodología**

Para la estimación de la superficie Nieves se han utilizado imágenes LANDSAT en 2 periodos diferentes de 2001 exportadas en formato TIFF, la primera sin presencia de agua ligada a inundaciones y la segunda con presencia en periodos en los que se han detectados inundaciones. Las correspondientes al satélite SPOT no han podido utilizarse ya que hay pocas imágenes que coincidan con los días en los que se han producido inundaciones en la zona de estudio, además de que este satélite no tiene banda en el infrarrojo medio (banda 5 del LANDSAT TM con una resolución de 30 m).

Para el satélite LANDSAT ETM+ se disponen de 8 bandas espectrales



BANDA	NOMBRE	BANDA ESPECTRAL	RES. ESPACIAL
BANDA 1	AZUL	0.45-0.52	30 m
BANDA 2	VERDE	0.52-0.60	30 m
BANDA 3	ROJO	0.63-0.69	30 m
BANDA 4	IR CERCANO	0.76-0.90	30 m
BANDA 5	IR MEDIO	1.55-1.75	30 m
BANDA 6	IR TÉRMICO	10.4-12.5	60 m
BANDA 7	IR MEDIO	2.08-2.35	30 m
BANDA 8	PAN	0.52-0.90	15 m

Tabla 9. Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+.

Las imágenes LANDSAT que se han utilizado han sido para momentos sin inundaciones han sido (figuras 24-41):

A) 25 de octubre de 2001

Las imágenes LANDSAT para momentos con inundaciones han sido (figuras 41-50):

A) 7 de septiembre de 2001

Las imágenes en color corresponden a composiciones en color 542 RGB (infrarrojo medio-infrarrojo cercano-verde) ya que es una composición que permite realzar el agua y diferenciarla de las nubes. Así pues, aunque nubes aparecen en blanco en este caso, la el agua aparece en tonos azules turquesa.

Se ha diseñado también una imagen que corresponde a un “índice de vegetación normalizado” (NDVI) (figura 38) aplicando la fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$$

También se ha realizado una reclasificación de la banda 7 para obtener valores donde los que muestra un número digital (ND) menor a 11 se le da un valor de 1 y para los valores ND mayores a 10 se les da un valor de 0. Los valores 1 se aproximan a la clase temática agua (figura 39).

### 3.2. Resultados

#### IMÁGENES DEL 25 DE OCTUBRE DE 2001 (sin inundaciones)

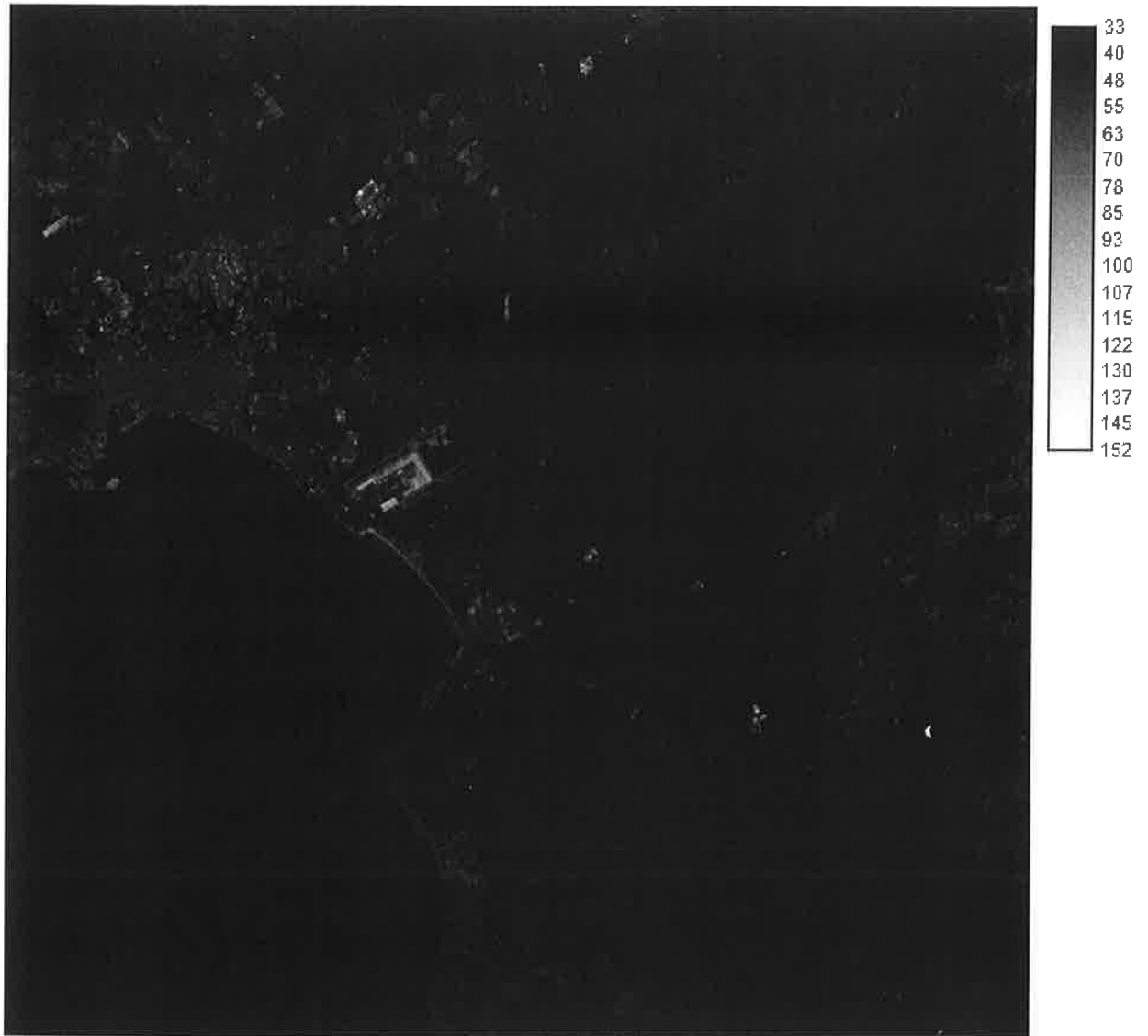


Figura 22. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 1 con 30 m de resolución espacial.



Figura 23. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 2 con 30 m de resolución espacial.

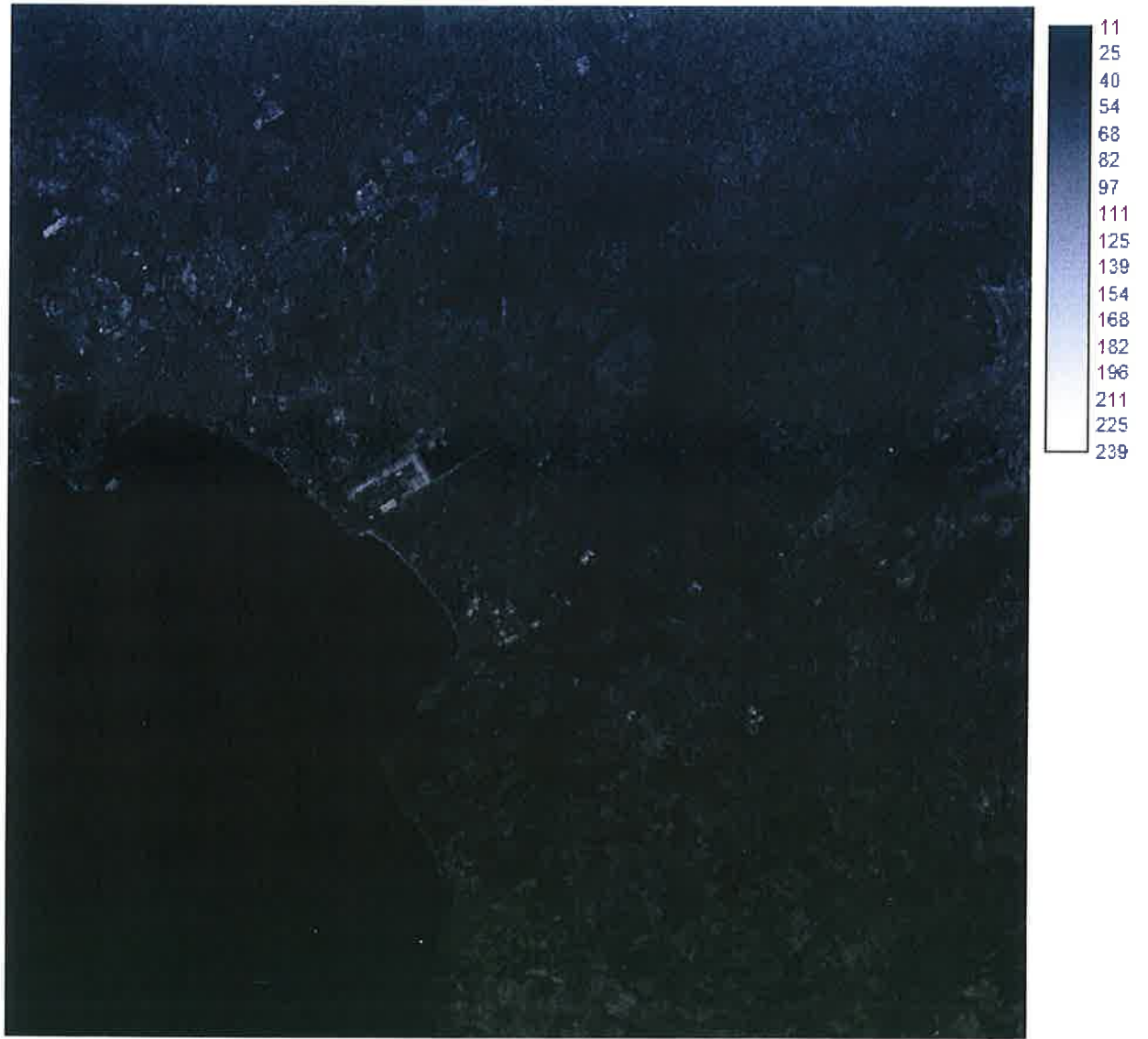


Figura 24. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 3 con 30 m de resolución espacial.



Figura 25. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 4 con 30 m de resolución espacial.



Figura 26. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 5 con 30 m de resolución espacial.



Figura 27. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 6 con 30 m de resolución espacial (modo 1).



Figura 28. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 6 con 30 m de resolución espacial (modo 2).



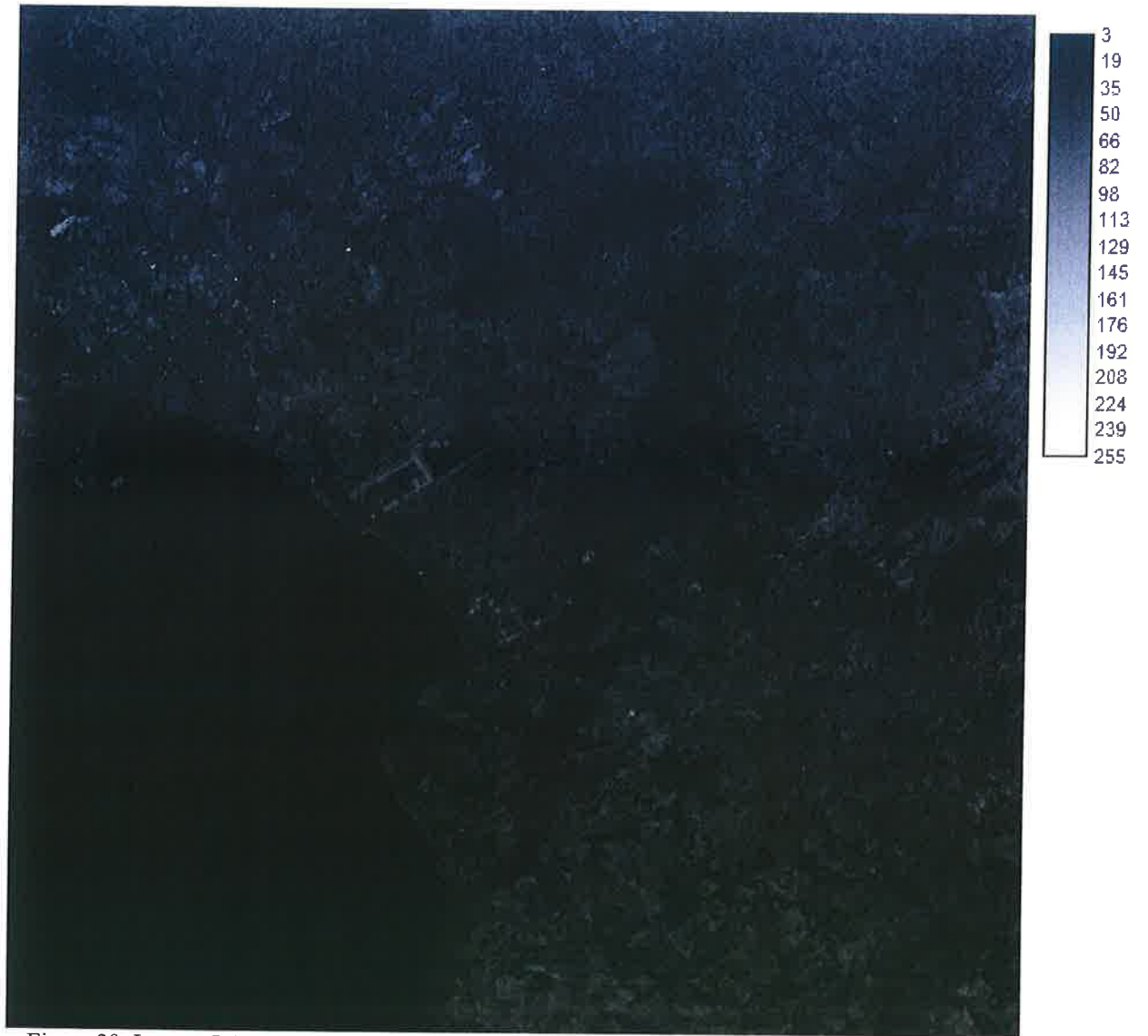


Figura 29. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 7 con 30 m de resolución espacial.

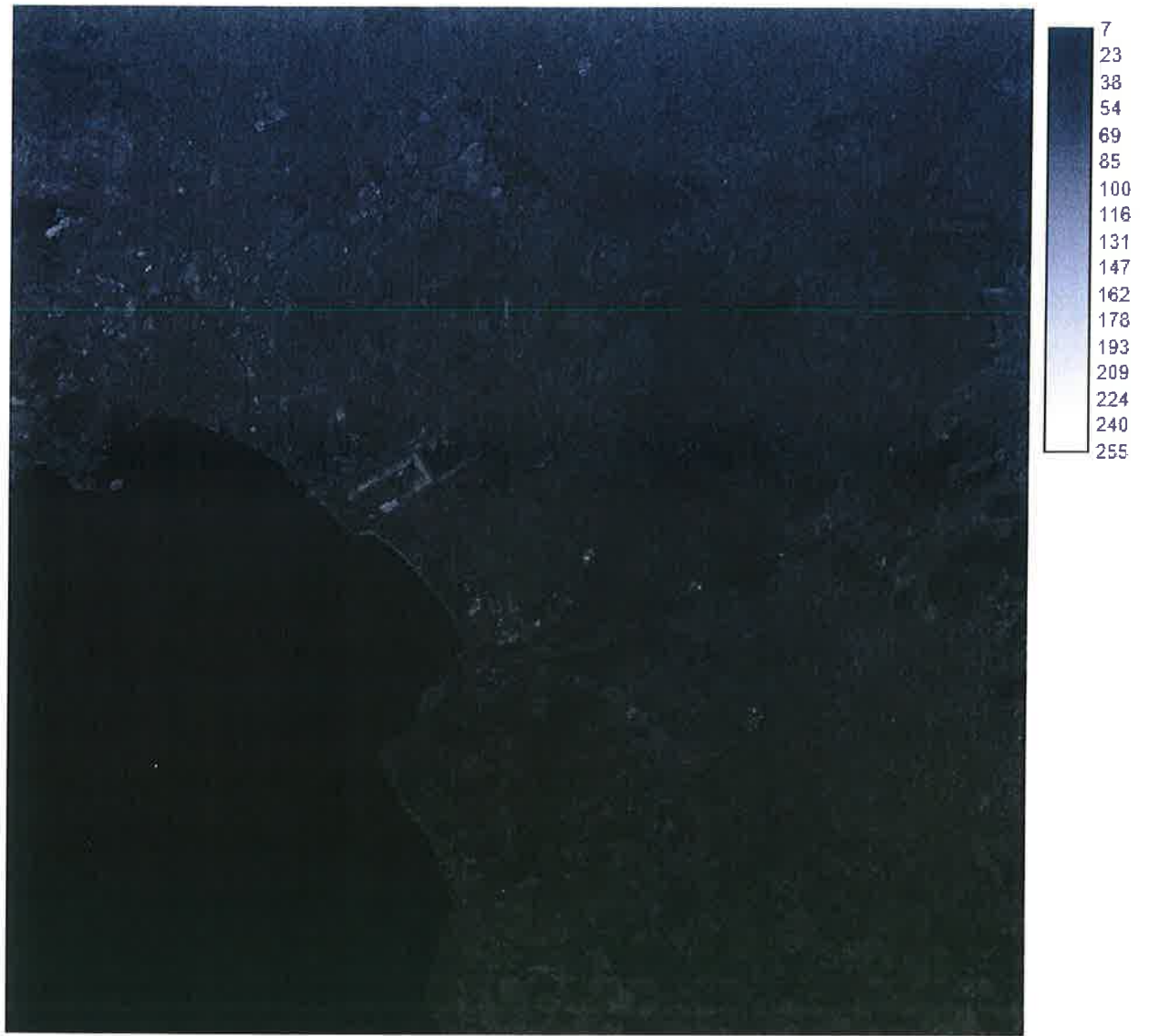


Figura 30. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 8 con 30 m de resolución espacial.



Figura 31. Detalle de la imagen de la banda 8 (15 m de resolución espacial)

### **3.2.1. Tratamiento digital de la imagen de satélite**

#### **3.2.1.1. Composición de falso color**

Las diferentes bandas espectrales captadas por los sensores electrónicos de un satélite de teledetección pueden combinarse para generar imágenes coloreadas que mejoran la visualización de determinadas escenas. En el procesado de imágenes de satélite, se generan a menudo imágenes en falsos colores porque incrementan la percepción de determinados detalles de la superficie. Una imagen en falso color es una representación artificial de una imagen multispectral. En algunas aplicaciones de teledetección, puede ser útil asociar las clases de cobertura del suelo con colores familiares, por ejemplo, la hierba con el verde. En otros casos, se prefieren los colores contrastados para resaltar objetos de interés en el fondo como el agua (Chuvieco, 1996).

La codificación que se emplea en las imágenes multibanda, se basa en la numeración de las bandas que integran dicha imagen, siguiendo el orden específico de rojo, verde y azul. De esta manera, una imagen que use la banda 7 para el rojo, la banda 4 para el verde, y la banda 2 para el azul se la designa como 7 4 y 2, o si se usa la banda 1 para el azul, la banda 2 para el verde y la banda 3 para el rojo se le denomina 1,2 y 3; y así sucesivamente (Chuvieco, 1996).

Con este tipo de técnicas para tratar imágenes satélite, en el caso que nos ocupa podremos distinguir mejor el elemento central del caso de estudio, como es el agua, de forma que nos permita observar zonas inundadas y comparar estas con otras que no lo están en el mismo momento o diferentes momentos.



Figura 32. Composición de bandas 123. Banda azul: banda1; Banda verde: banda 2; Banda roja: banda 3



Figura 33. Composición de bandas 321. Banda azul: banda 3; Banda verde: banda 2; Banda roja: banda 1

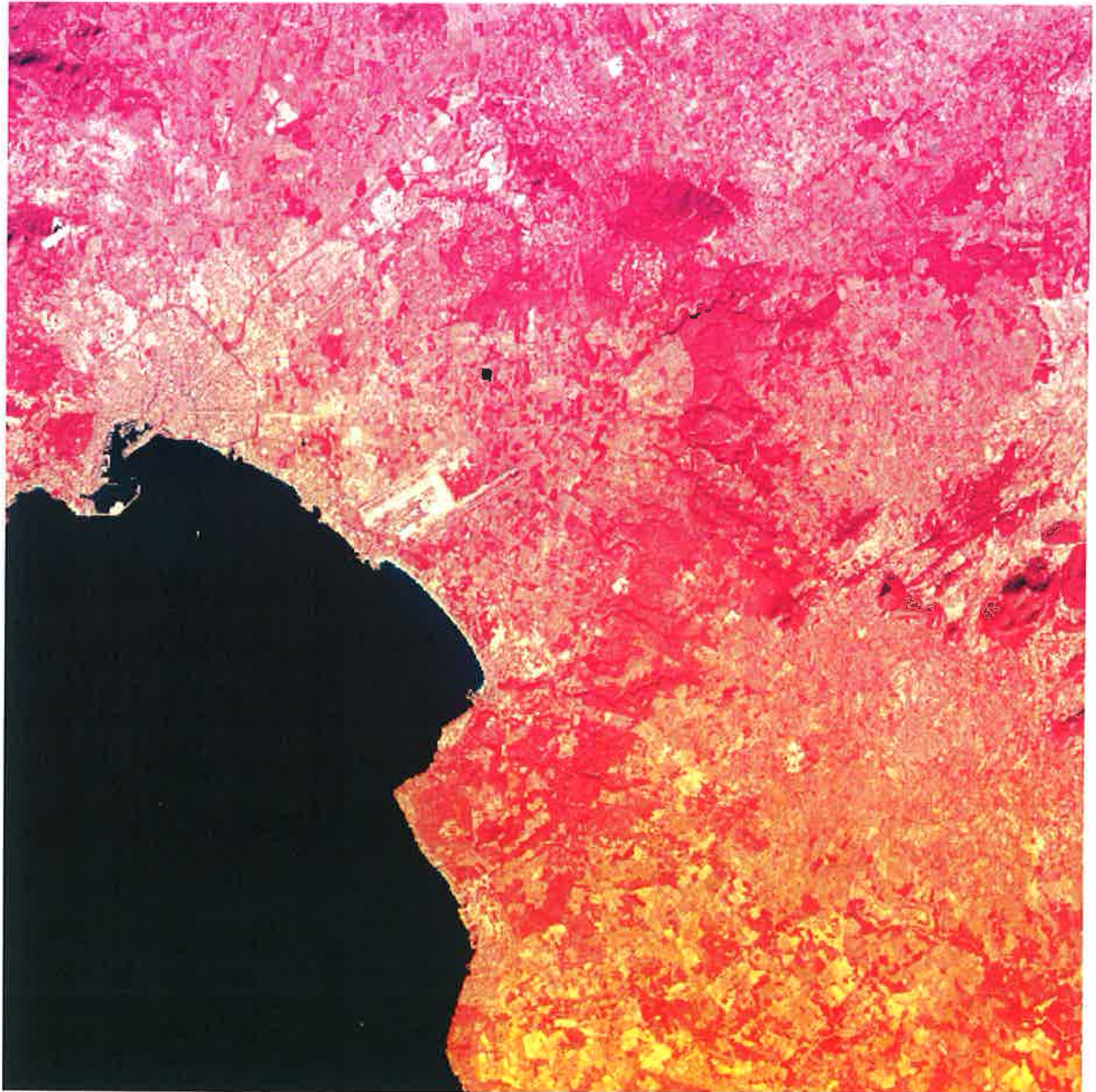


Figura 34. Composición de bandas 234. Banda azul: banda 2. Banda verde: banda 3.  
Banda roja: banda 4



Figura 35. Composición de bandas 345. Banda azul: banda 3; Banda verde: banda 4;  
Banda roja: banda 5



### 3.2.1.2. Ratios de bandas



Figura 36. Ratio banda 2 dividido banda 3: banda 2/banda 3

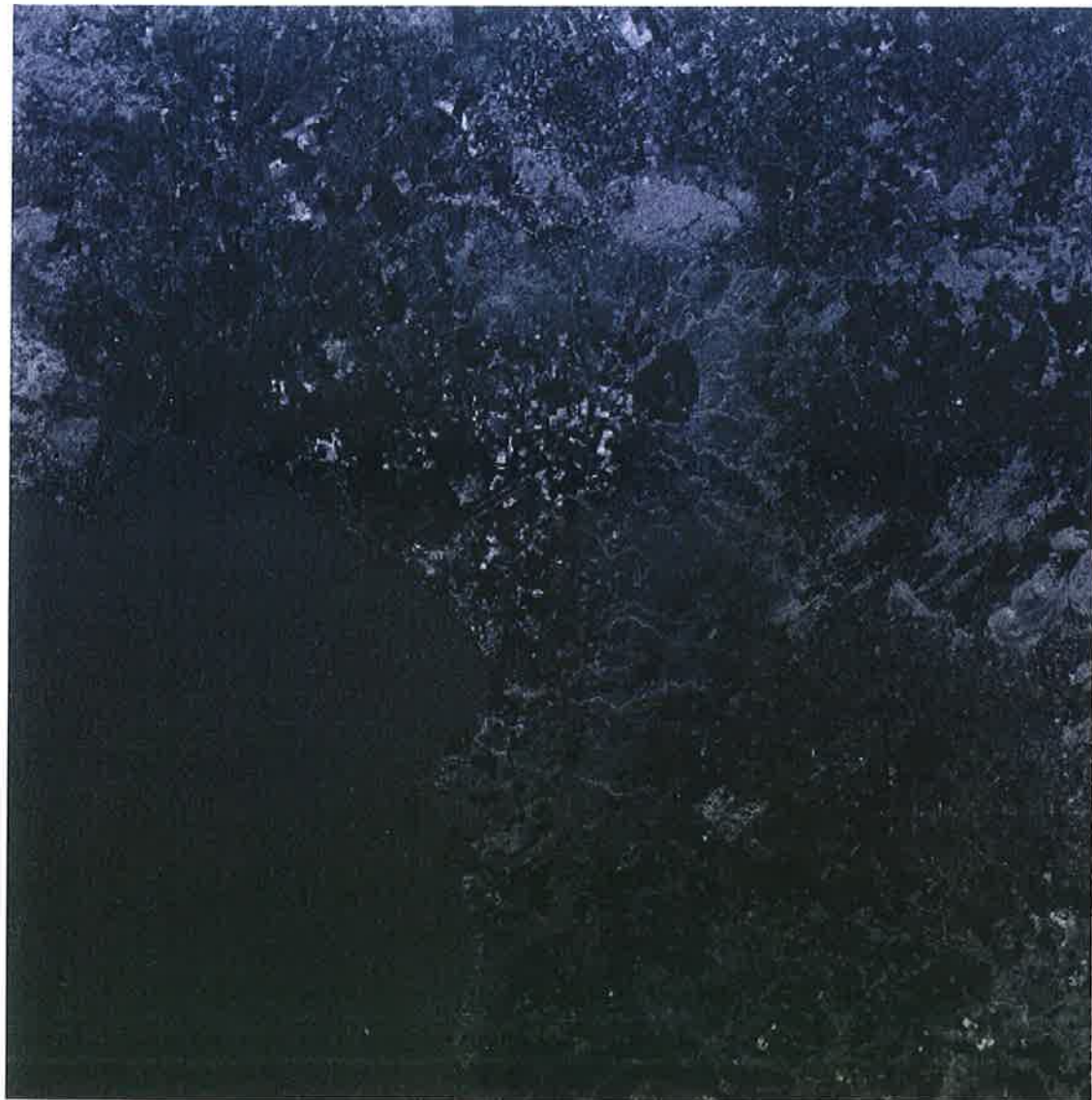


Figura 37. Ratio banda 4 dividido banda 7:  $\text{banda 4} / \text{banda 7}$

### 3.2.1.3 Índices

#### 3.2.1.3.1 Índice de vegetación normalizado (NDVI)

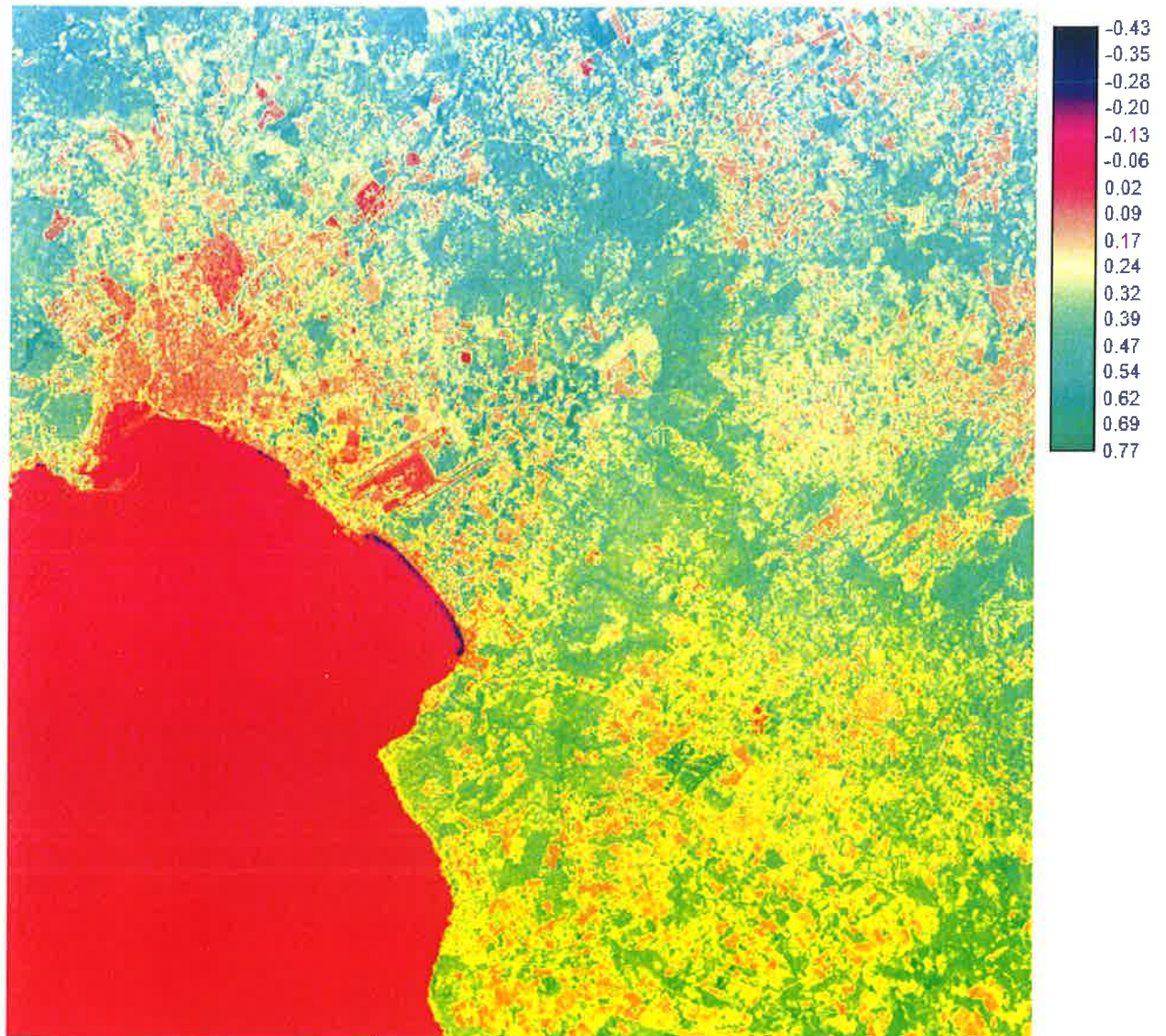


Figura 38. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

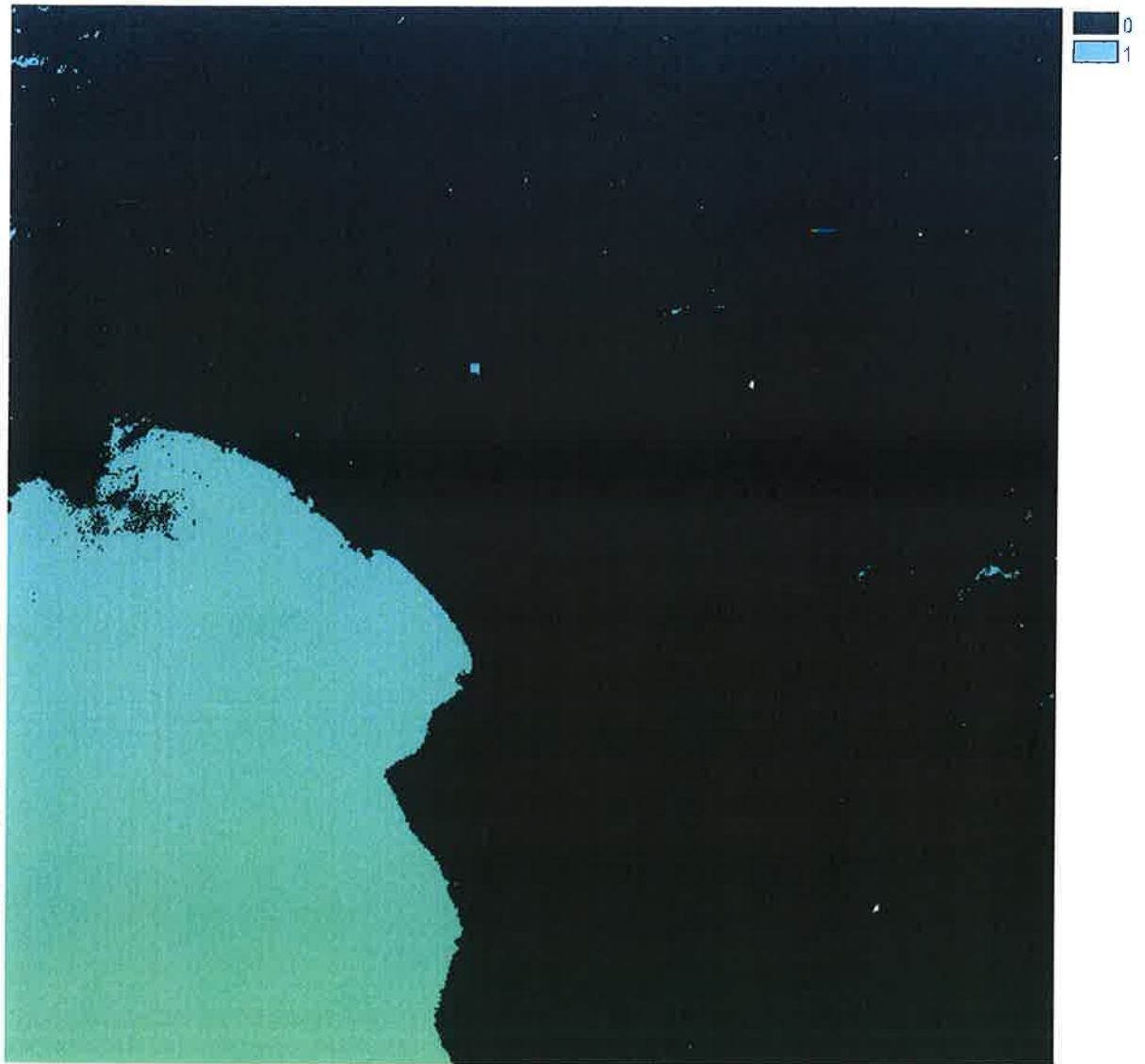


Figura 39. Reclasificación de la banda 7 donde los valores 1 se aproximan a la clase temática agua los valores 0, representan zonas con ausencia de agua. La imagen refleja una escasa presencia de agua en el área de estudio.

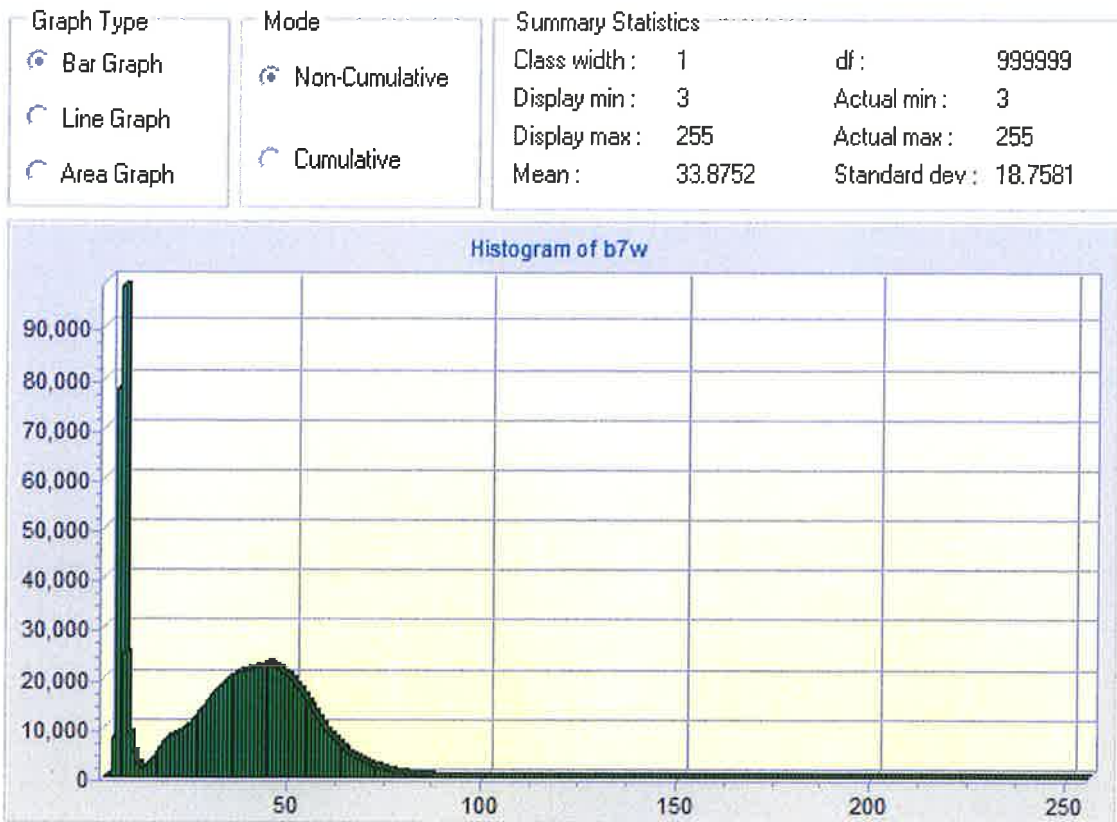


Figura 40. Histograma del ND de la banda 7. Se observa claramente el pico de valores pequeños (menores a 10) del agua del mar.

**IMAGEN DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2001 con nubosidad e inundaciones**



Figura 41. Composición de falso color. La zona está cubierta de nubes en su mayor parte pero también se perciben, con poca calidad, las zonas inundadas.

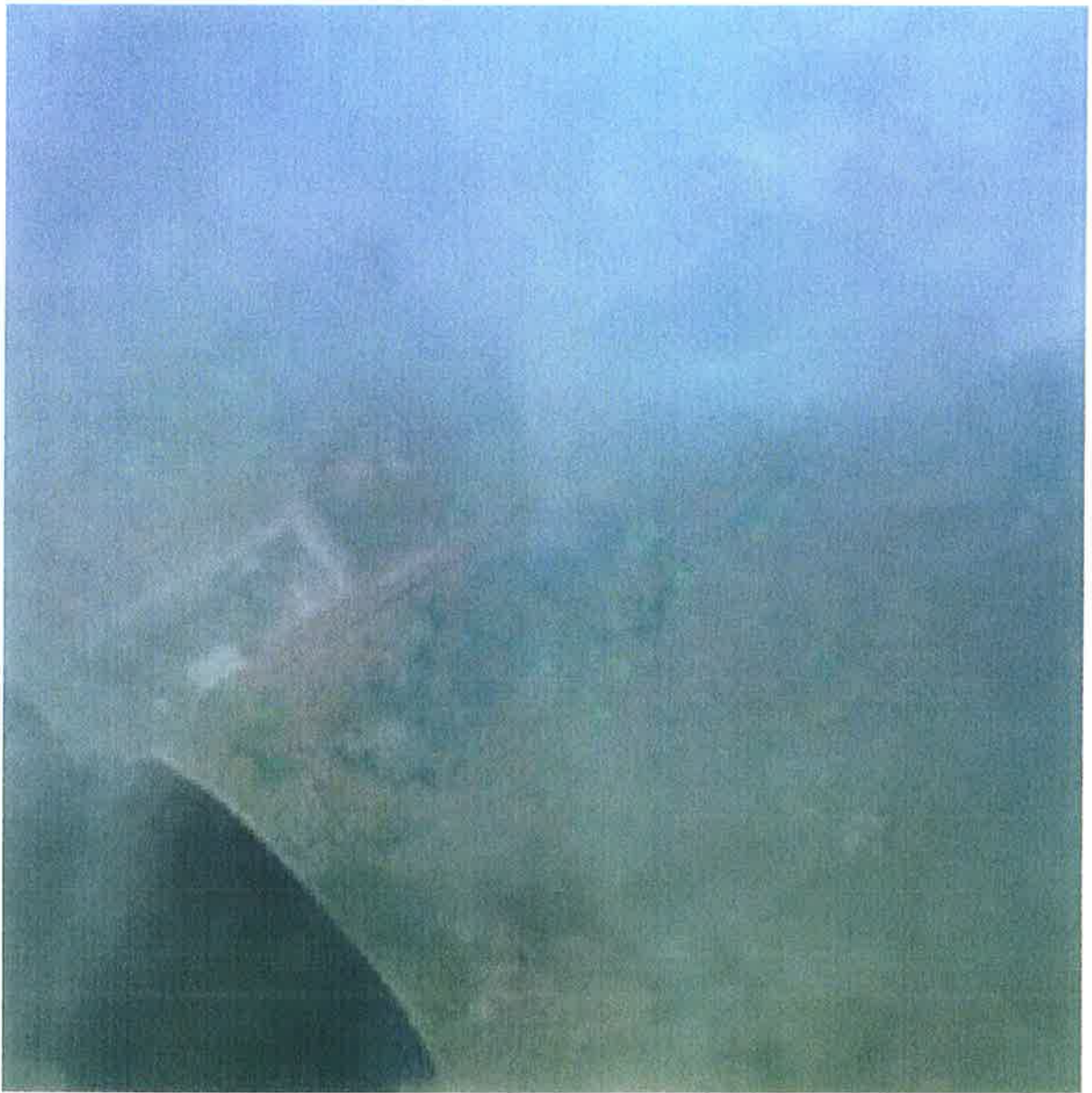


Figura 42. Detalle de la zona del aeropuerto en al que apenas se aprecian por la presencia de nubes zonas inundadas.

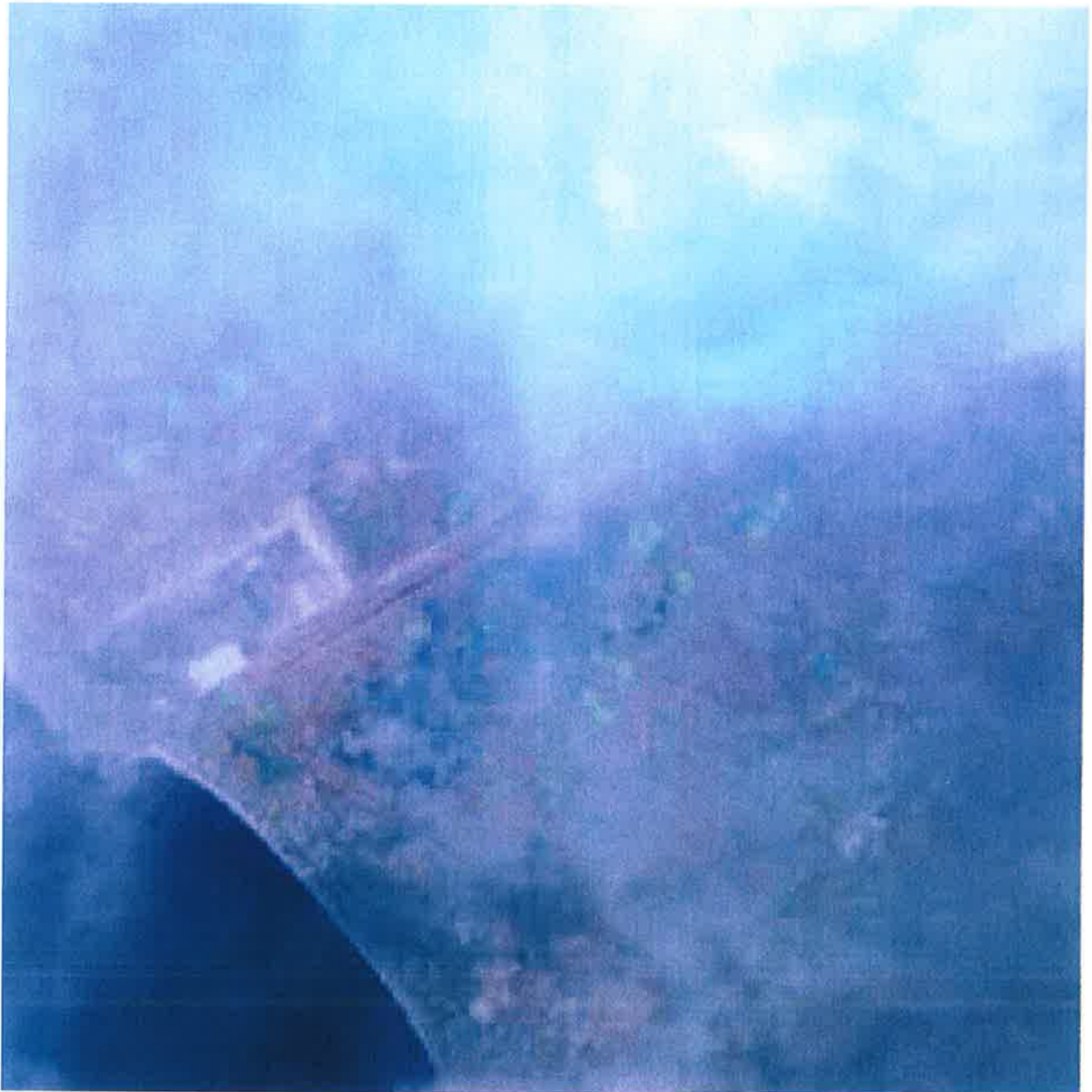


Figura 43. Detalle de la zona del aeropuerto con un cambio de escala de los colores.





Figura 44. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 1 con 30 m de resolución espacial y



74
82
90
99
107
115
123
131
140
148
156
164
172
180
189
197
205

Figura 45. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 2 con 30 m de resolución espacial y

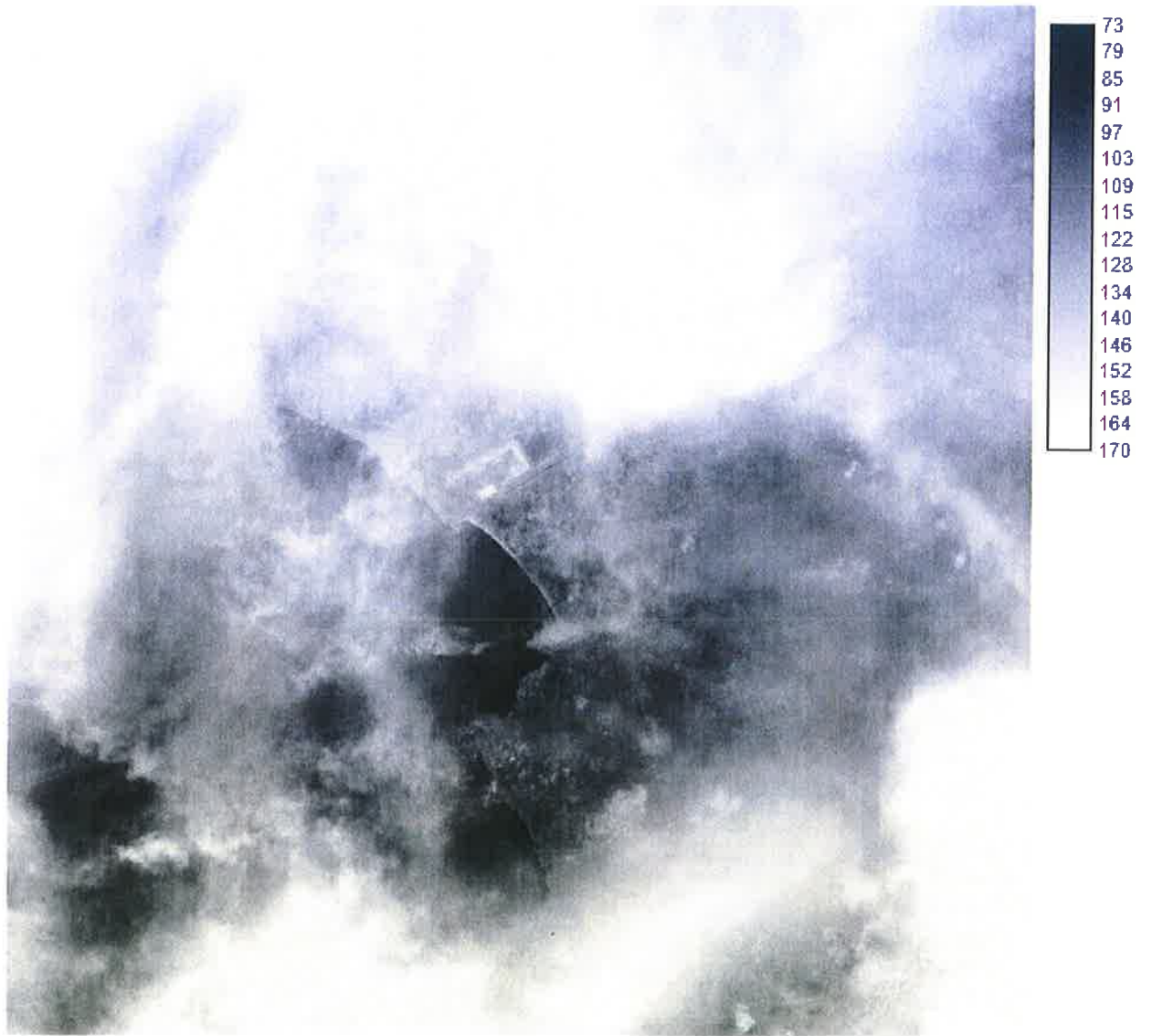


Figura 46. Imagen LANDSAT Satélite LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 3 con 30 m de resolución espacial.

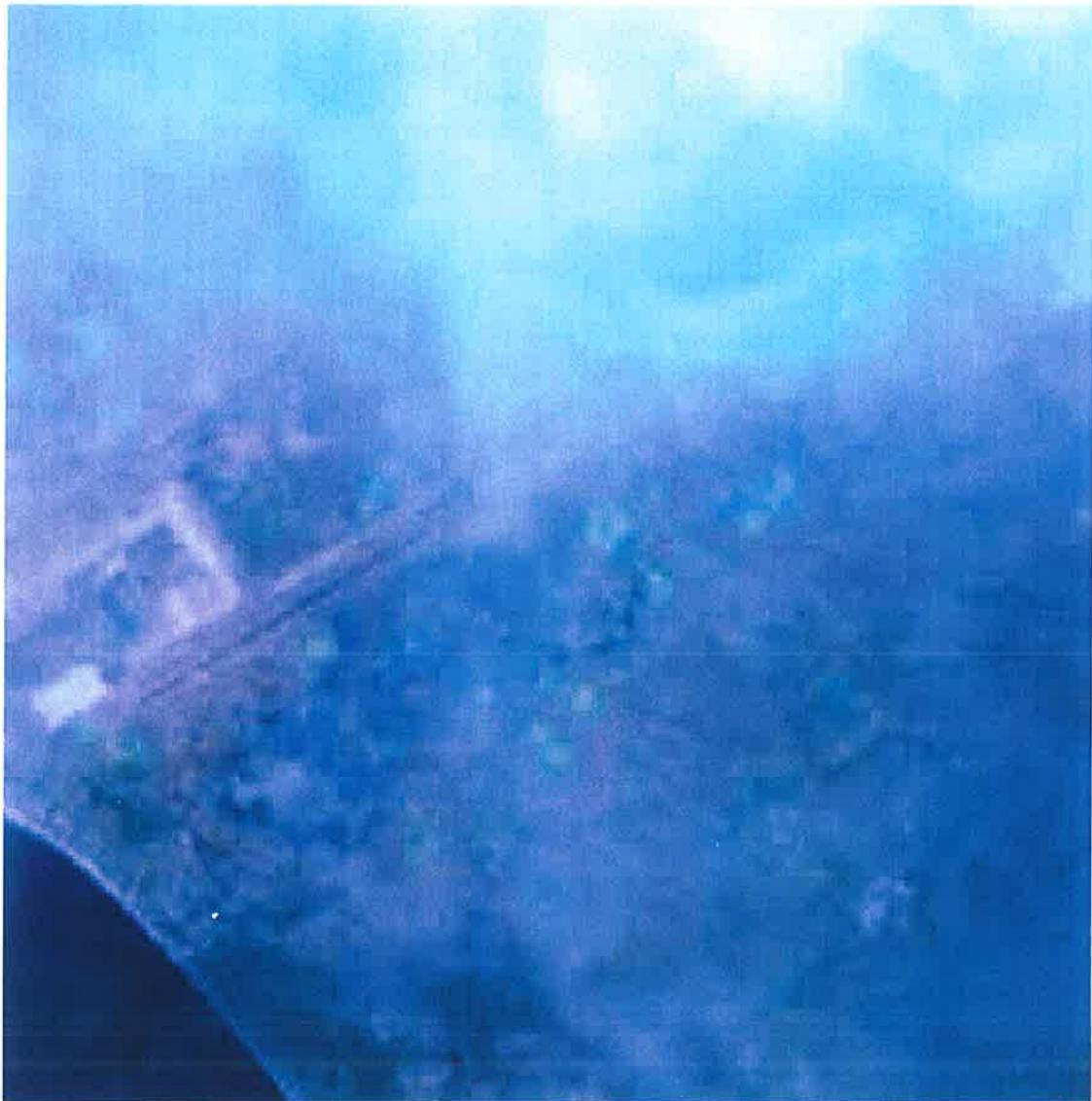


Figura 47. Composición de banda 321. Detalle de la zona del aeropuerto con un cambio de escala de los colores en las que se aprecian las zonas inundadas al norte, sur y este del aeropuerto.

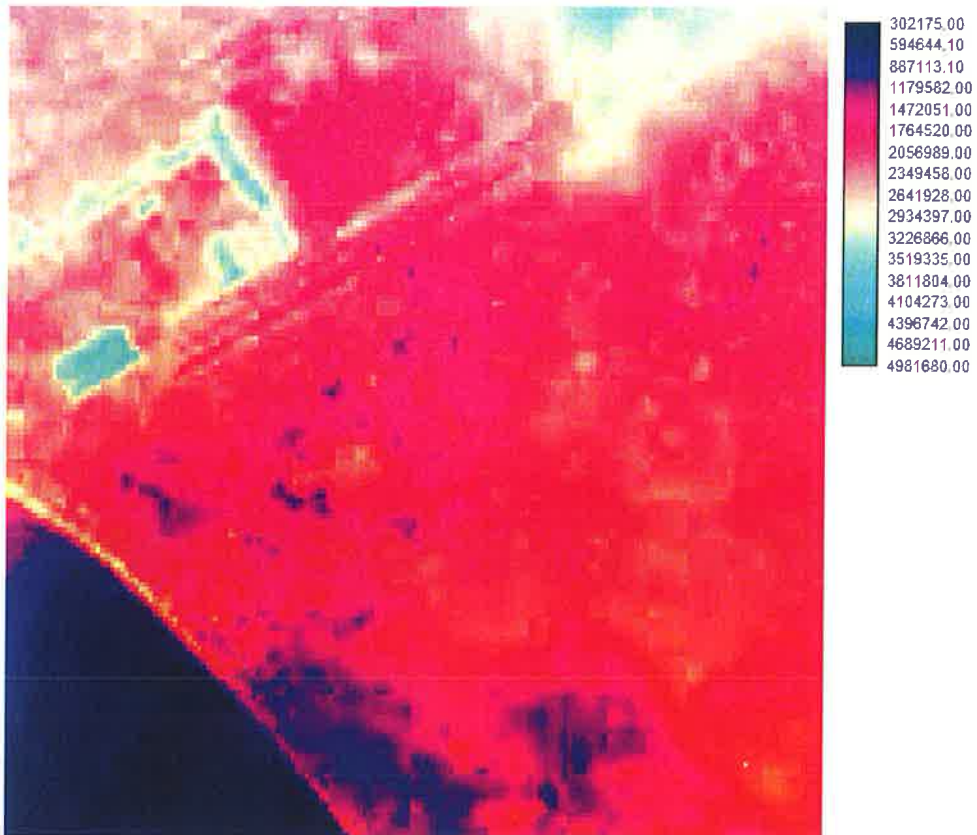


Figura 48. Composiciones en color 542 RGB (infrarrojo medio-infrarrojo cercano-verde) que permite realzar el agua, en color azul, y diferenciarla de las nubes.

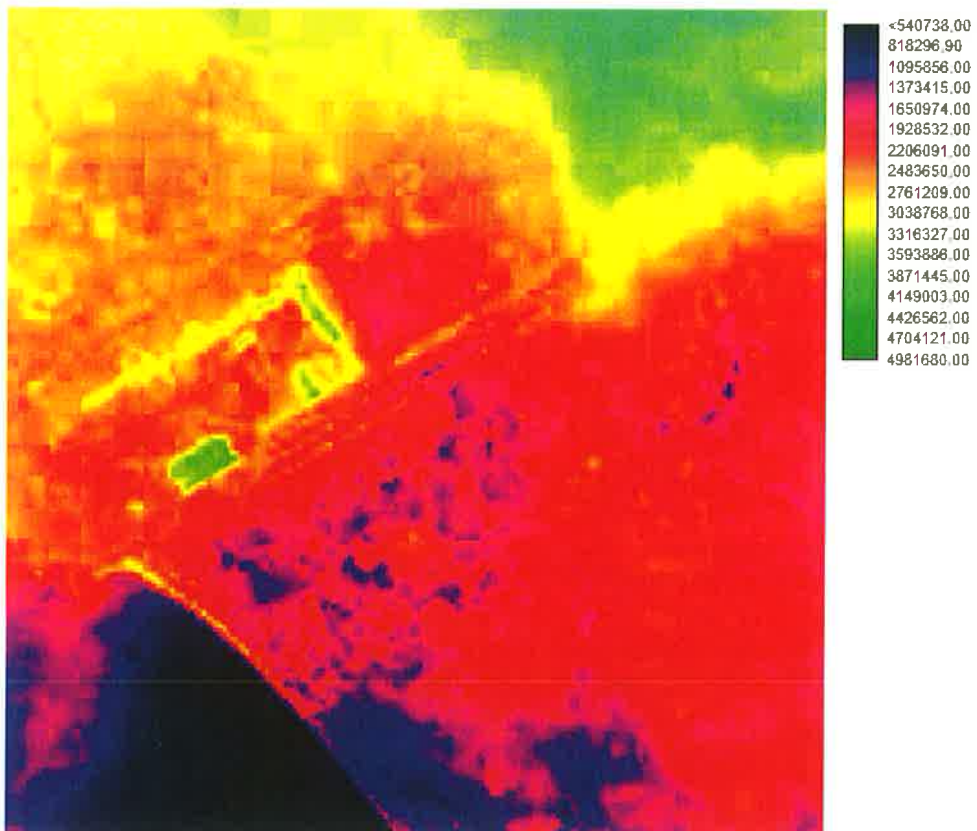


Figura 49. Composiciones en color 542 RGB incrementando la saturación con respecto a la anterior que permite realzar más el agua, en color azul.

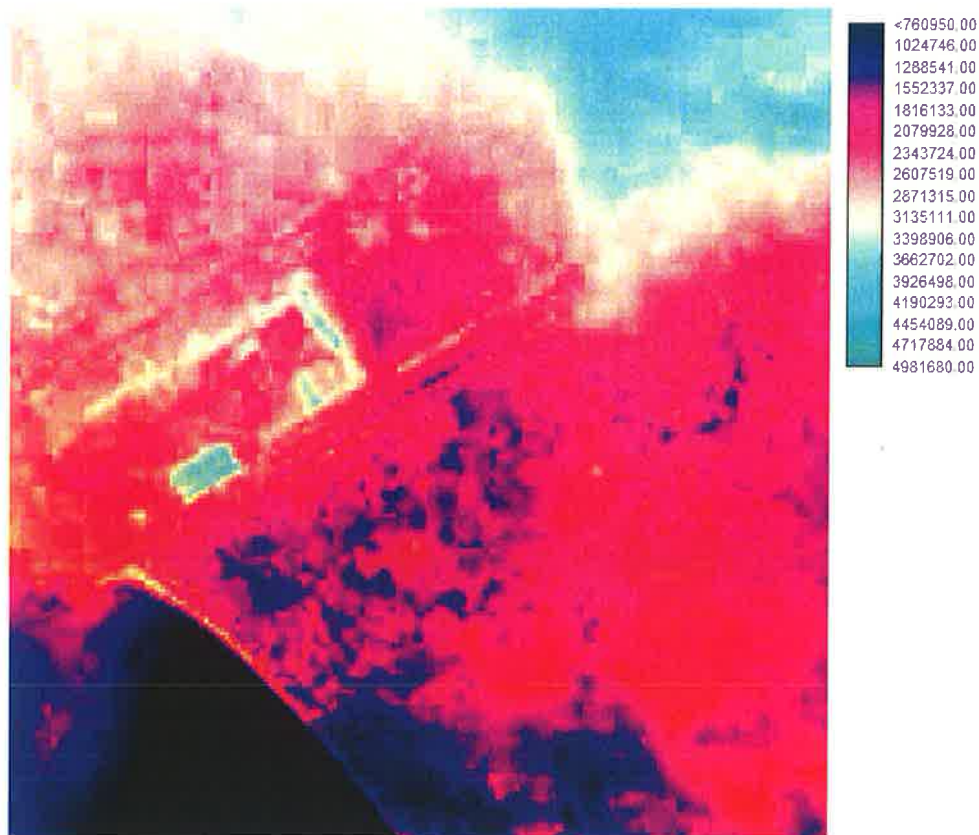


Figura 50. Composiciones en color 542 RGB incrementando más la saturación que permite realzar más el agua, en color azul, que en las anteriores. Se observa claramente un área inundada en el norte y este del aeropuerto.

Una vez analizadas las imágenes de los años de octubre y septiembre de 2001, se ha podido identificar con gran claridad las diferencias entre los días que permanece inundada la zona de estudio. Aunque las imágenes de LANDSAT 7, sensor ETM+ Banda 1-9 con 30 y 15 m de resolución espacial, son poco nítidas en los momentos con presencia de nubes, el detalle con una composición de colores, azul turquesa (figura 47), como en las imágenes en color (composiciones en color 542 RGB del infrarrojo medio-infrarrojo cercano-verde y azul marino) si se distingue nítidamente las zonas inundadas. Esto permite por un lado, observar las zonas inundadas en octubre de 2001 con respecto a las imágenes de septiembre del mismo año (Figuras 28 a 50). Este aspecto nos indica también que la permanencia del agua es relativamente corta, pocos días o semanas

También, se observa nítidamente que la concentración de agua se distribuye en septiembre de 2001, de forma muy homogénea en la zona norte, sur y este del aeropuerto, con muy poca presencia de agua en la zona oeste y el en el resto de la zona de estudio (figuras 48, 49 y 50). Esta correlación de las imágenes satélite entre ambas fechas muestra un límite a partir del cual se acumula agua de forma permanente, desde el margen central del área de estudio a su margen este. Si se compara la imagen de un mismo año con el “NDVI”, la distribución espacial de las inundaciones parece estar ligada relativamente a un tipo de cultivo, pero sobre todo, a una zona mucho menos urbanizada. Sin embargo si coincide con el área que presenta mayor número de zona deprimidas (figura 8) y, coincide además casi perfectamente en su distribución espacial. En la figura 39, a modo de ejemplo, donde el agua tiene valores 1 (aparece en azul turquesa) y el resto valores 0 (se observa en negro), se pueden ver pequeñas zonas en las que se ha acumulado agua, a priori, coincidiendo con esa misma variable pero en un

momento seco el año. Estas zona puntales también aparecen en el mapa de depresiones lo que valida el método utilizado para este análisis.

### 3.3. Analogías y diferencias entre los métodos propuestos y eventos de inundaciones reales

A partir de las fotografías cedidas por EMAYA de eventos de inundaciones en los años 2001, 2008 y 2010 se ha podido realizar una comparación con el resto de análisis geomorfológicos y morfométricos en este estudio y analizar las área vulnerables en estos periodos.

Durante el año 2001 se identificaron dos eventos de inundación, el 7 de septiembre y el 23 de noviembre. El análisis muestra una distribución espacial que se extiende de forma heterogénea en la zona norte, sur y este del aeropuerto. La comparación entre ambos eventos muestra un primero momento que ocupa una gran parte del área de estudio, con más de 500 ha, y un segundo momento residual con una pequeña zona al sureste inundada que amplía en muy poco la superficie de la primera (figura 51, 52 y 53).

#### Zonas inundadas en el evento 07/09/2001



Figura 51. Cartografía del evento de inundación ocurrido en septiembre de 2001. Las zonas azules representan el área inundada reales.

### Zonas inundadas en el evento de 23/11/2001



Figura 52. Cartografía del evento de inundación ocurrido en noviembre de 2001. Las zonas azules representan el área inundada real.

### Zonas inundadas en el año 2001



Figura 53. Cartografía del evento de inundación ocurrido en 2001. Las zonas azules representan área el área inundada en septiembre y las rojas en noviembre.



Durante el año 2008 las inundaciones cartografiadas muestran un área inundada al oeste del aeropuerto, en torno a ambos márgenes del Torrent Gros, el cauce de drenaje más importante de Palma (figura 54). Además, se observa como el sedimento en suspensión arrastrado por la avenida y desborde del torrente, genera una amplia pluma en el mar que abarca un área desde Cala Gamba hasta el Portixol con varias decenas de hectáreas de superficie. Este evento concretamente, tras revisar la pluviometría de diferentes estaciones en la zona del Pla de Sant Jordi y en lugares de la Serra de Tramuntana, responde a intensas precipitaciones en la cabecera de dicho torrente, ya que los valores en la zona del Pla fueron muy bajos o inexistentes durante las fechas estudiadas.

#### Zonas inundadas en el evento de 16/12/2008



Figura 54. Cartografía del evento de inundación ocurrido en diciembre de 2008. Las zonas azules representan el área inundada real. En marrón se observa la pluma de sedimento en suspensión que llegó al mar.

Durante el año 2010 se identificaron y documentaron 2 eventos (figura 55 y 56). El primero el 11 de mayo y el segundo el 17 del mismo mes. Durante el primero, se inundó la zona norte y este del aeropuerto, ocupando un total de 10 ha aproximadamente. El segundo evento se concentra únicamente en la zona norte con especial relevancia en la zona del Ullal de Son Mir. El conjunto de superficie ocupada en ambos eventos no supera las 12 ha, aunque fue especialmente importante al norte, anegando una parte de la carretera Palma-Manacor. Además, el Ullal de Son Mir experimentó un importante ascenso de sus niveles piezométricos y toda la finca agrícola que abastece quedó inundada.

### Zonas inundadas en el evento de 11/05/2010



Figura 55. Cartografía del evento de inundación ocurrido el 11 de mayo de 2010. Las zonas azules representan el área inundada real.

### Zonas inundadas en el evento de 17/05/2010



Figura 56. Cartografía del evento de inundación ocurrido en mayo el 17 de mayo de 2010. Las zonas azules representan el área inundada real.

### Zonas inundadas en el año 2010



Figura 56. Cartografía de los eventos de inundación evento ocurridos en mayo de 2010. Las zonas amarillas representan el evento del 5 de mayo y las zonas naranjas representan el evento del 17 de mayo.

### Zonas inundadas en el Prat de Sant Jordi (Mallorca) durante los eventos de los años 2001, 2008 y 2010



Figura 57. Cartografía de los eventos de inundación entre 2001 y 2010. Las zonas azules representan todos los eventos en su conjunto.

### Clasificación de las zonas inundadas en el Prat de Sant Jordi (Mallorca) según los eventos de 2001, 2008 y 2010



Figura 58. Cartografía de los eventos de inundaciones ocurridas entre los años 2001 y 2010 representado en una escala de colores que diferencia cada evento.

La cartografía del conjunto de eventos de inundaciones ocurridos entre 2001 y 2010 (figuras 57 y 58) muestra dos grandes zonas que se afectadas; una primera zona al oeste del aeropuerto, entorno al Torrent Gros; y la segunda zona que ocupa el margen norte, sur y este del aeropuerto. La cartografía y seguimiento de las precipitaciones pone de relieve que las inundaciones del área oeste del Pla de Sant Jordi responde fundamentalmente a eventos de lluvias intensas en la cabecera del Torrent Gros, que posteriormente se desborda y anega un área de más de 500 ha pero únicamente distribuidas a los largo de los márgenes del torrente. Por otra parte, las inundaciones del Pla de Sant Jordi en su zona este, están ligadas a precipitaciones no necesariamente intensas. La superficie total que pueden alcanzar ronda las 1000 ha.

#### 3.4. Conclusiones

La aplicación mediante técnicas geoestadísticas del método INUNJORDI ha sido una herramienta muy eficaz que pone de relieve el peso relativo de cada variable elegida y su interrelación como factor del control de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi.

El resultado de los tres métodos dibuja un pasadizo central de norte a sur, donde los valores resultantes, muy altos en la escala diseñada, ponen de manifiesto que es una zona muy susceptible a inundarse. Este hecho viene determinado básicamente por la presencia del aeropuerto como eje central poco permeable que articula un conjunto de áreas adyacentes a modo de cuenca semiendorreica con una poca operativa red de drenaje. Dichas áreas presentan los valores más altos obtenidos en las variables de permeabilidad, geología, geomorfología y depresiones, lo que pone de relieve, el peso específico de las características propias de una antigua zona húmeda, con terrenos poco permeables y, en ocasiones deprimidos con respecto a sus límites naturales, en este caso

ya transformados por la fuerte presión humana, amplificando el efecto endorreico natural.

La presión agrícola de esta área coincide también con los altos valores de susceptibilidad a inundarse que presentan. Por un lado, la zona al norte y este del aeropuerto soporta una de las mayores áreas de cultivo de la isla. Y por otra parte, en la zona sur se da la presencia de áreas muy urbanizadas y que cohabitan con el humedal activo de Ses Fontanelles. Ambos casos favorecen las inundaciones, siendo este en particular muy significativo ya que el área con valores muy alto, es también donde el nivel piezométrico el acuífero está más cercano a la superficie del terreno.

En su conjunto, la distribución espacial similar de valores altos prácticamente de todas las variables que favorecen la inundación, responde a un modelo de territorio muy complejo. La planificación del territorio en general y de los recursos hídricos en particular en la zona del Pla es deficiente o a penas se ha realizado. Todo ello, junto con una elevada presión humana da lugar a un serie de problemas que se agudiza cuando se trata de riesgos naturales, como es el caso de las inundaciones. Teniendo en cuenta los resultados de este estudio, parece necesaria una planificación integral del territorio y de los recursos naturales que permita mitigar en la medida de lo posible problemática de las inundaciones y al a vez, permita el desarrollo sostenible del mismo.

Las imágenes satélite se han mostrado como una herramienta muy efectiva para el estudio de la distribución espacio-temporal de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi. Por otro lado, las técnicas de estudio de imágenes satélite han puesto de manifiesto una clara analogía con las zonas cartografiadas en las inundaciones identificadas y documentadas entre 2001 y 2010, la detección automática de depresiones y el análisis morfométrico IUNDJORDI. Este estudio permite por un lado, verificar el método para identificar zonas inundadas en caso de que no se tengan imágenes fotográficas y también, realizar una estimación más real sobre la superficie inundada total en la zona de estudio. El tratamiento y análisis de las imágenes de 2001, 2008 y 2010 junto la correlación con el MDT y el mapa de depresiones, han puesto de manifiesto que la acumulación de agua se da fundamentalmente en el margen norte, sur y este del aeropuerto, zonas con pendientes inferiores a 4° pero con un gran número de depresiones. Por tanto, es posible afirmar que su acumulación y permanencia por zona endorreicas y determinados tipos de terrenos. Otros factores como la vegetación juegan un rol muy poco decisivo, a excepción de la de los usos del suelo, zonas urbanas o el tipo de material del suelo, que en este caso sí parece jugar un papel determinante. Parece también importante ampliar el estudio temporal de las imágenes satélite para poder comparar más secuencias y así, observar las variaciones a lo largo de series climáticas continuas y extensas que nos permitan hacer valoraciones estacionales e interanuales e históricas. Por otra parte, es necesario el conocimiento exhaustivo de las características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas y su correlación con la distribución espacio-temporal de todas las inundaciones ocurridas en la zona de estudio, para saber qué porcentaje están ligados a eventos de intensas precipitaciones o a subidas del nivel freático del acuífero.

No obstante, la gran magnitud de un dato hasta ahora desconocido sobre volumen de agua que supone la estimación de la superficie inundada abre una venta a soluciones puntuales, hasta que se logre una ordenación del territorio y de los recursos hídricos. En general supone un avance cualitativo y cuantitativo en la relación hidrogeología-geomorfología. Un estudio espacio-temporal más detallado también podría aportar

información sobre otros aspectos de gran calado como el previsible efecto que cambio climático tiene la superficie y el posible impacto en la recarga del acuífero del retorno con riegos que no provienen del propio acuífero.

#### 4. Referencias

ARNOLD, N. 2010. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. *Progress in Physical Geography*, 34 (6), 781-809.

ANDREO, B., VÍAS J.M., DURÁN, J.J., JIMÉNEZ, P., LÓPEZ-GETA, J.A. Y CARRASCO, F. 2008. Methodology for groundwater recharges assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16: 911-925 pp.

BAKALOWICZ, M. 1995. La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*, 4: 3-21 pp.

BUSQUETS, J. Y CORTINA, A. (eds.) 2009. Gestión del paisaje. Manual de protección, gestión y ordenación del paisaje, Ariel, Barcelona.

CARRASCO P. (COORD.). 2014. Desarrollo de una metodología para la protección de las regiones kársticas en relación con las infraestructuras y otras actividades antrópicas. 272 p. Universidad de Málaga y Agencia de la Obra Pública de la Junta de Andalucía. Málaga.

CHUVIECO, E. (1996). Fundamentos de la Teledetección. Ed Ranma. 224 p.

CEOTMA. 1991. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 572 p.

CONSEJO DE EUROPA. (2000): Convención Europea del Paisaje. Andalucía Geográfica, 7. 51-55. pp. Sevilla, Asociación de Geógrafos Profesionales de Andalucía.

DELANNOY, J.J. Y GUENDON, J.L. 1986. La Sierra de las Nieves (Málaga). La Sima G.E.S.M. Etude géomorphologique et spéléologique. *Karstologia Mémoires*, 1, 71-85.

DENG, Y. 2007. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography*, 31 (4), 405-419.

EUROPEAN COMMISSION. 1995. Karst groundwater protection. Final Report COST Action 65, Bruselas. 446 p.

ESPAÑOL ECHÁNIZ, I. 1998. Las obras públicas en el paisaje. Guía para el análisis y evaluación del impacto ambiental en el paisaje. Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento, 343 p.

GRIMALDI, S., NARDI, F., DI BENEDETTO, F., ISTANBULLUOGLU, E. Y BRAS, R. L. 2007. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources*, 30 (10), 2151-2158.

GÓMEZ OREA 2003: Evaluación de Impacto Ambiental. Mundi-Prensa Libros, Madrid.

GOODLAND, R. Y DALY, H. (1996).- "Environmental Sustainability: Universal and Non-Negotiable". *Ecological Applications*, 6 (4): 1002-1017 pp.

JENSON, S.K. Y DOMINGUE, J. O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), 1593-1600.

LIÑÁN-BAENA, C. 2005. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la unidad Yunquera-Nieves (Málaga)*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 16. Madrid, 322 p.

LÓPEZ-VICENTE, M., NAVAS, A. Y MACHÍN, J. 2009. Geomorphic mapping in endorheic catchments in the Spanish Pyrenees: An integrated GIS analysis of karstic features. *Geomorphology*, 111 (1-2), 38-47

MARTÍN-ALGARRA, A. 1987. *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. PhD thesis, University of Granada.

PARDO, E., DURÁN, J.J. Y ROBLEDO, P.A. 2012. Detección Automática de depresiones del terreno utilizando el modelo digital de elevaciones y su aplicación a la cartografía geomorfológica. XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander.

ROSSELLÓ I VERGER, 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.

SIART, C., BUBENZER, O. Y EITEL, B. 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112 (1-2), 106-121.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY) 2011. Using GIS Techniques to Identify and Delineate Karst Features in Tennessee. *Geohazards Impacting Transportation in the Appalachian Region— 11th Annual Technical Forum, Chattanooga, TN*.

VÍAS, J.M., ANDREO, B., PERLES, M.J., CARRASCO, F., VADILLO I. Y JIMÉNEZ, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14, 912-925 pp.



## **PARTE 9**

### **CONCLUSIONES**

Pedro A. Robledo Ardila



## CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO

De acuerdo con las actividades llevadas a cabo en el proyecto científico-técnico POSEIDÓN, entre los años 2013 y 2015 respecto a las inundaciones del Pla de Sant Jordi se puede concluir que:

La elaboración de la cartografía topográfica 1:1000 complementada con los MDT, MDE y las fotografías aéreas, han permitido obtener un grado de detalle muy significativo para desarrollar los diferentes trabajos propuestos. Este aspecto, ha sido la base para finalizar con solvencia y más precisión todos los estudios en los que se desarrollan cartografías temáticas. Además, el análisis de la propia topografía ha puesto de manifiesto una evolución del desarrollo urbano en la zona de estudio muy significativo en los últimos años, siendo este aspecto uno de los ejes centrales en la problemática que aquí se aborda.

La revisión y actualización del estudio hidrogeológico del acuífero Pliocuaternal de Pla de Sant Jordi, muestra que se trata de un acuífero detrítico libre muy heterogéneo en el que los materiales detríticos cuaternarios recubren y/o están en contacto lateral con formaciones calizas del Plioceno superior, Unidad Calcarenitas de San Jordi (ver figura 1 y 2 de este apartado), como sucede localmente en el borde norte de la zona de estudio. Aunque hidrogeológicamente, a priori, se trata del mismo acuífero, el comportamiento hidráulico de estas formaciones es diferente, lo que da lugar a que en los bordes de contacto los materiales detríticos actúen como una barrera hidráulica del flujo de agua subterránea (con dirección sur) por las diferencias de transmisividad fundamentalmente. Es precisamente en esas zonas de contacto, donde se han identificado surgencias de agua subterránea denominadas “Ullals” (ver figura 3 de este apartado). Estos puntos en eventos de precipitaciones intensas o continuadas en el tiempo, dan lugar a descargas naturales que pueden provocar la inundación parcial de las zonas adyacentes. Además, como se intuía en las tomografías eléctricas realizadas durante la campaña de geofísica y posteriormente se pudo constatar sobre el terreno, el nivel freático del acuífero en este sector se sitúa muy próximo a la superficie del terreno (ver figura 1, 2 y 3 de este apartado).

Por otra parte, la evolución histórica de niveles piezométricos muestran una tendencia continuada al ascenso en los últimos 30 años, con cerca de 1,5 m de promedio. Algunos puntos de la red POSEIDÓN presentan actualmente valores mínimos cercanos a +0,5 m de cota piezométrica. Este ascenso se ve reflejado nítidamente en los mapas de profundidad del nivel freático del acuífero, que muestra como en los márgenes norte y este del aeropuerto, los niveles piezométricos están muy cercanos a la superficie del terreno. Este hecho junto con la rápida repuesta de los niveles piezométricos a eventos de precipitaciones intensas, permite constatar la posibilidad de que tras un evento de lluvias crítico se pueda producir el afloramiento del nivel freático del acuífero por encima de la superficie del terreno, provocando inundaciones parciales en las zonas antes mencionadas.

El modelo matemático del acuífero, aunque no es concluyente, pone de relieve por un lado la proximidad del nivel freático del acuífero en determinadas zonas del Pla de Sant Jordi, especialmente al norte, sur y este del aeropuerto. Además, el modelo matemático refleja un aporte muy importante neto de retornos de riego con casi 2 hm<sup>3</sup> anuales, aspecto este que constituye un incremento en la recarga del acuífero y supone un dato básico para entender la tendencia del nivel piezométrico del acuífero. Del modelo

también se desprende el cambio en los usos del agua, pasando a suponer los bombeos para agricultura un volumen significativamente menor que en décadas pasadas.

Del estudio hidrológico se puede extraer que los caudales punta de avenida generados en el punto de desagüe final de la cuenca hidrográfica del Pla de Sant Jordi al mar han sido estimados en 164.2, 191.2 y 295.5 m<sup>3</sup>/s para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente, con tipologías de hidrogramas de avenida súbita. Las zonas inundables del Pla de San Jordi por aguas superficiales se ubican en el sector nororiental del aeropuerto y en ambos márgenes de las pistas, con los mayores calados al sureste de estas. La peligrosidad por inundaciones en el Pla de Sant Jordi, considerando la combinación de calados y velocidades, así como el tiempo de permanencia de la lámina de agua, es mayor en torno al aeropuerto en su sector oriental.

Con carácter demostrativo se ha propuesto un sistema de renaturalización con un diseño conceptual de una red de drenaje estable y natural que restablezca parte del antiguo drenaje natural pero en equilibrio con la dinámica actual. Con ello, se pretende superar las antiguas construcciones hidráulicas de mediados del siglo XIX que pasan por ser drenajes poco eficientes. Una obra hidráulica acorde con el entorno actual requerirá de un sistema de canalizaciones meandriforme que soporte los ecosistemas, funcionales y autosostenibles, y que además sea eficiente.

Los estudios de infiltración llevados a cabo en diferentes puntos de la zona de estudio, ponen de manifiesto una alta variabilidad, entre 300 cm día<sup>-1</sup> y picos de más de 2000 cm día<sup>-1</sup>. Los valores más elevados se han obtenido en zonas recientemente cultivadas o con un relleno antrópico relativamente reciente, constituido generalmente por arcillas, arenas y calizas. Sin embargo, también las zonas que no se cultivan en la actualidad presentan valores altos de infiltración. Aunque la amplitud entre el valor más alto y más bajo de capacidad de infiltración es importante, en general, se trata de valores elevados lo que infiere a estos terrenos altas velocidades de infiltración, ubicándose la mayor parte precisamente en los márgenes, norte, este y noroeste del aeropuerto, a priori, las zonas con más probabilidad de inundarse.

El resultado del análisis morfométrico, INUNDJORDI y la detección automática de depresiones, muestra un pasadizo central de norte a sur y, una parte del margen este y noroeste del aeropuerto, muy susceptibles a inundarse. Este hecho, parece tener su causa en la presencia del aeropuerto como núcleo central poco permeable que articula un conjunto de áreas adyacentes a modo de cuencas semiendorreicas cuyas redes de drenajes son ineficientes y receptoras del flujo del agua subterránea que se infiltra en los drenes de las pistas. Se trata de áreas extensas ligeramente deprimidas con respecto a sus límites naturales y, que además, son coincidentes con zonas donde los niveles piezométricos están muy cercanos a la superficie del terreno o incluso aflorando.

Las imágenes satélite y la cartografía de las zonas reales inundadas en los eventos de 2001, 2008 y 2010, han puesto de relieve una clara coincidencia entre ambas técnicas. Las acumulaciones de agua cartografiadas tras estos eventos se producen en el margen norte, sur y este del aeropuerto (y también en el borde noroeste del mismo) con una superficie inundada que oscila entre 500 y 900 ha entre los diferentes eventos. Esta cartografía de eventos reales ha verificado las zonas identificadas con el tratamiento de imágenes satélite.

En su conjunto, la distribución espacial de variables relacionadas con las inundaciones, responde a un modelo de territorio muy complejo y antropizado. La planificación del

territorio en general y de los recursos hídricos en particular en a zona del Pla de Sant Jordi es deficiente o a penas se ha realizado. Todo ello, junto con una elevada presión humana da lugar a un serie de problemas que se agudiza cuando se trata de riesgos naturales, como es el caso de las inundaciones. Teniendo en cuenta los resultados de este estudio, parece necesaria una planificación integral del territorio y de los recursos naturales que permita mitigar, en la medida de lo posible, la problemática de las inundaciones y a la vez, el desarrollo sostenible de este territorio.

### **Conclusiones específicas del proyecto**

1. Todos los resultados de las actividades científico-técnicas realizadas en el marco de este proyecto muestran un área análoga con más vulnerabilidad y o peligrosidad de inundarse; el margen norte, este y sur del aeropuerto, y con menor medida, en el borde noroeste.
2. Aunque los estudios hidrológicos muestran zonas con peligrosidad de inundación, la revisión de eventos de inundaciones indica que su importancia es puntal en el tiempo y están únicamente ligados a avenidas súbitas, no siendo por eso menos importantes cuando suceden.
3. Por el contrario, los estudios hidrogeológicos ponen de relieve que la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero Pliocuaternario del Pla de Sant Jordi están muy altos en las zonas con más susceptibilidad de inundarse. Además, se ha constatado que, donde los niveles piezométricos están más altos, coincide con las zonas que han presentando eventos de inundaciones, por lo que parece más probable que la cercanía de la lámina de agua a la superficie del terreno, tenga una componente de más peso en las inundaciones, debido a alta posibilidad de afloramiento por encima de la superficie del terreno.
4. Este último dato se ha constatado de forma empírica por las altas velocidades de infiltración obtenidas en las zonas indudables, que se ha verificado durante el intenso evento de precipitaciones en septiembre de 2015, por encima de los 200 l/m<sup>2</sup>, durante el que no se produjeron inundaciones en las zonas más vulnerables. Ello por tanto indica también, que el peso que tiene la saturación de agua de los materiales detríticos del acuífero en las inundaciones es mucho menor frente a la subida de los niveles piezométricos por encima de la superficie del terreno. No obstante y dada la heterogeneidad lateral y vertical de los materiales detríticos cuaternarios, hay que tratarlo con reservas, puesto que un periodo de lluvias puede causar la saturación parcial de los sedimentos que después se amplifica una vez el nivel freático alcanza estas facies de la cuenca.
5. El estudio mediante técnicas geofísicas y del comportamiento hidrogeológico del acuífero en el Ulla de Son Mir muestra en este punto del acuífero que, cuando los materiales carbonáticos del Plioceno superior están en contacto con los materiales detríticos del Cuaternario, el cambio en las condiciones hidráulicas entre ambos da lugar a surgencias de agua subterráneas que pueden provocar inundaciones al norte del aeropuerto, con probabilidad de que se extiendan y ocupen más superficie hacia el sur y sureste.

6. El Pla de Sant Jordi muestra numerosas áreas endorreicas. Todas las zonas inundables están ligadas estas áreas deprimidas consecuencia de la paleotopografía del antiguo humedal y de la evolución de las construcciones urbanas y viales, que además actúan como barreras hidrológicas impermeables frente a flujos superficiales y la recarga del acuífero.
7. El estudio de las depresiones en el Pla de San Jordi ha permitido identificar un conjunto de áreas húmedas relictas, con una superficie total ocupada de 1,38 km<sup>2</sup> (ver figura 4 de este apartado).
8. En general, se ha constatado que las áreas con menos presión antrópica en el Pla de Sant Jordi (y donde se ha constado la disminución de los bombeos) intentan recuperar el espacio del antiguo humedal (ver figura 3 y 4 de este documento).
9. El aeropuerto funciona como un área central impermeable en la zona de estudio, cuyos pozos drenan de media anual en el acuífero 0,68 hm<sup>3</sup>, pudiendo alcanzar drenajes puntuales de más de 1,3 hm<sup>3</sup> en eventos como el ocurrido en septiembre de 2015.
10. Las urbanizaciones y viales funcionan también como barreras impermeables modificando la circulación del agua superficial y la distribución espacial de la recarga en el acuífero.
11. El drenaje del aeropuerto genera flujos al acuífero perimetrales, básicamente hacia sus márgenes sur, este y oeste. Este aspecto, puede provocar que en aquellas zonas donde los niveles piezométricos esté muy altos la concentración de importantes volúmenes de flujos subterráneos en áreas reducidas provoquen inundaciones parciales. Aunque no se han detectado inversiones de flujo, estas no se descartan, así como que puedan dar lugar a una distribución heterogénea de áreas inundadas en el espacio y en el tiempo.
12. El riego con aguas residuales depuradas y el descenso de bombeos para riego, ha provocado un incremento en la recarga del acuífero, teniendo un rol importante en las inundaciones producidas en los últimos años.
13. Los cauces actuales de drenajes de las aguas superficiales son poco eficientes, siendo Sa Siquia y el Es Siquiò los más operativos. Tanto en el margen este del Pla de Sant Jordi como el margen oeste, muchas de las antiguas canalizaciones están obturadas o confinadas por residuos urbanos o vegetación, lo que impide que funcionen al máximo de su capacidad. Esto provoca que, tanto Sa Siquia en el este del aeropuerto, como el Torrent Gros en el oeste, no tenga capacidad suficiente de drenaje en momentos de aguas altas o avenidas
14. No existe una clara planificación a medio y largo plazo en el Pla de Sant Jordi de los recursos hídricos y del territorio acorde, con la complejidad, la presión humana y la importante transformación sufrida en los últimos años.

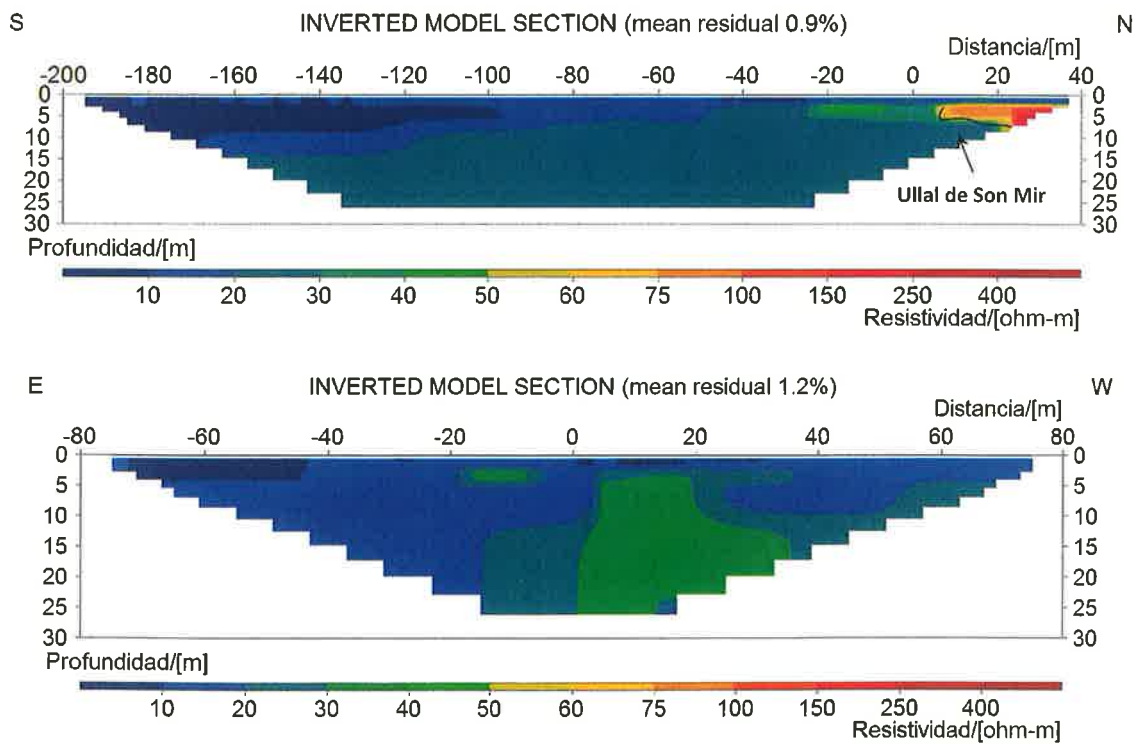
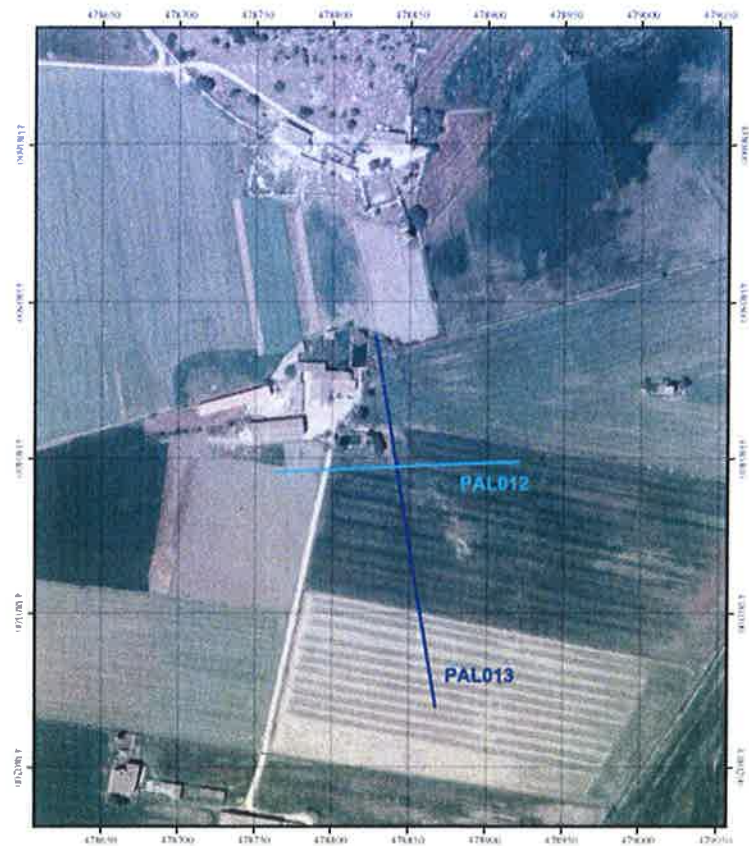


Figura 1. Tomografías eléctricas N-S (PAL 13) y E-O (PAL 12) en el Ullal de Son Mir. La tomografía superior (N-S) muestra en su extremo norte el borde de contacto entre los materiales detríticos cuaternarios, más conductivos, y las calizas pliocenas más resistentes. El Ullal de Son Mir se ubica justo el contacto entre ambas formaciones.

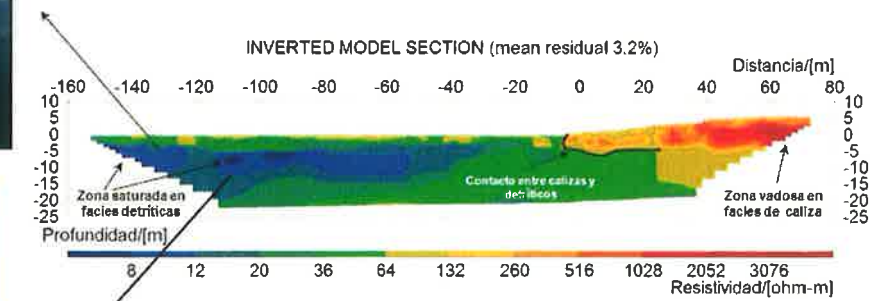
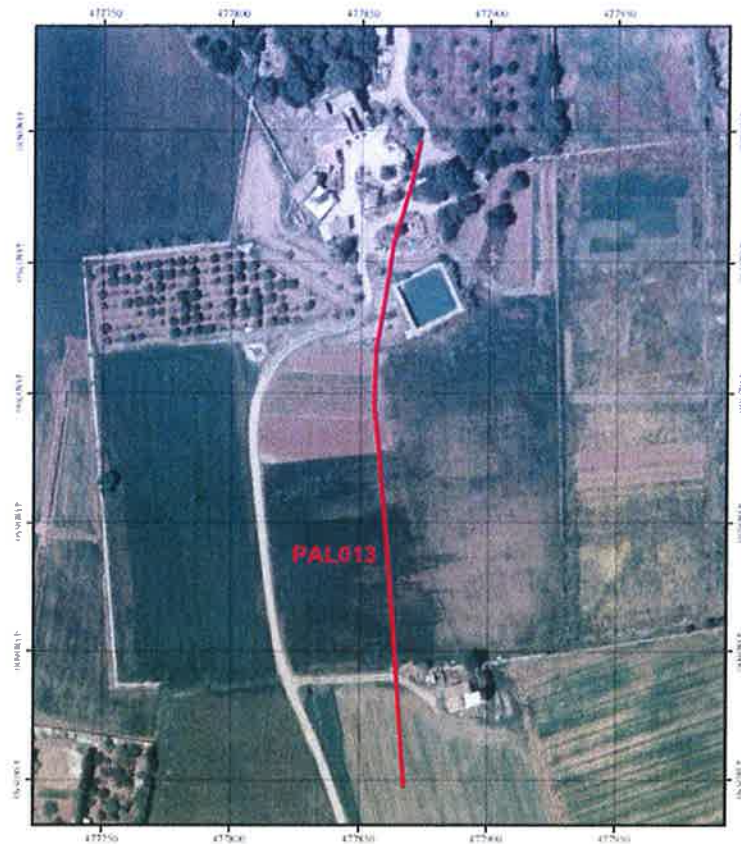


Figura 2. Tomografía eléctrica realizada en una sección N-S al este de la finca donde se ubica el Ullal de Son Mir. La imagen inferior muestra el borde de contacto entre los materiales detríticos, más conductivos, y las calizas, más resistivas. En las imágenes señaladas se observa como los niveles piezométricos están muy cercanos a la superficie del terreno.



Figura 3. Ejemplo de una de las áreas húmedas relictas identificadas en el margen este del Pla de Sant Jordi.

# CARTOGRAFÍAS DE ÁREA HÚMEDAS RELICTAS EN EL PLA DE SANT JORDI



Figura 4. Áreas húmedas relictas identificadas en el Pla de Sant Jordi. El total de la superficie cartografiada es de 1,38 km<sup>2</sup>.





## **PARTE 10**

### **RECOMENDACIONES**

Pedro A. Robledo Ardila

## RECOMENDACIONES TECNICO-CIENTÍFICAS

Una vez finalizado el documento técnico se realizan las siguientes recomendaciones a las autoridades competentes.

1. Es necesario acometer una ordenación de los recursos hídricos del Pla de Sant Jordi y una ordenación sostenible del territorio. La compleja problemática derivada de muchos elementos que dan lugar a un excedente medio de aguas de recarga en el acuífero superior a  $10 \text{ hm}^3$  requiere que la Comunidad Autónoma de les Illes Balears, a través de su órganos competentes (Direcció General de Recursos Hídrics; Direcció General Territorio; Direcció General de Espais Naturals i Biodiversitat, entre otras) inicie un plan de actuación sobre el acuífero y por ende, sobre el territorio. Por ello, se propone una comisión de trabajo y seguimiento con todas las partes implicadas.
2. El excedente hídrico en el acuífero del Pla de Sant Jordi que da lugar a una parte importante de eventos de inundaciones (inducido por una probable subida continuada de los niveles piezométricos desde la década de los 80) y, cuya procedencia es resultado del descenso de las explotaciones y el incremento del riego con aguas residuales depuradas, requiere establecer un equilibrio entre las entradas y salidas del acuífero. Por ello, se recomienda:
  - a. Un descenso del riego con aguas residuales depuradas en ciclos húmedos de al menos  $5 \text{ hm}^3$ , siendo esta cifra variable en función de la oscilación de los niveles piezométricos del acuífero y teniendo en cuenta los ciclos estacionales y los ciclos interanuales.
  - b. Un incremento del bombeo del acuífero Pliocuaternario con una distribución regular en el espacio, en ciclos húmedos de  $5 \text{ hm}^3$ , siendo esta cifra variable en función de la oscilación de los niveles piezométricos del acuífero.
  - c. Una revisión anual de los volúmenes estimados en los apartados anteriores.
3. Es necesario una ordenación y reclasificación de usos del territorio en dos vertientes. Por un lado, es necesario decidir si las zonas relictas ligadas a al antiguo humedal deben protegerse, acogiéndose a algunas de las figuras de protección autonómica, nacional o internacional (Aérea Natural de Espacial Interés, Monumento natural, Convenio de Ramsar etc.). O, por el contrario y dada la diseminación de las mismas como áreas residuales o relictas, requieren de una actuación invasiva que anegue estas áreas. No obstante, en otras comunidades autónomas, como Andalucía, Castilla la Mancha o Navarra entre otras, estas zonas se protegen por defecto una vez han sido detectadas.
4. En el caso de las área deprimidas no ligadas a zonas húmedas relictas, que generalmente son la zonas de cultivo y zonas adyacentes al aeropuerto, a las urbanizaciones y red viaria, se recomiendan tres actuaciones puntuales:

- a. Nivelar la cota topográfica de las parcelas de cultivo deprimidas con respecto a sus bordes, (en las que sea posible), teniendo en cuenta que, para el relleno de pequeñas cuencas endorreicas como estas, debe intentarse alcanzar un equilibrio de cota general en la zona de estudio sin que suponga un riesgo añadido. La propia nivelación puede suponer un incremento de espesor de la zona vadosa del acuífero libre, con lo cual, la superficie del terreno ganará distancia con respecto al nivel freático del acuífero, disminuyendo así el riesgo de inundarse.
  - b. Cambio de los tipos de cultivo hacia aquellos que se adapten mejor a un tipo de clima mediterráneo, periodos largos de permanencia y, por tanto, mitiguen el efecto de las inundaciones que tienen lugar en terrenos sin cultivar. En muchos casos, el barbecho o el abandono de cultivos poco productivos, generan la aparición de tierras apelmazadas que tienen poca capacidad de infiltrar agua.
  - c. En las bases de las rotondas y laterales de la red viaria la recomendación van en dos sentidos: 1) desarrollar nuevos sistemas de canalización de las aguas superficiales que drenen en sistemas de mayor dimensión, como Sa Siquia, en el margen este o Es Torrent Gros, en el margen oeste; 2) mejorar los sistemas de drenaje actuales y, que estos, estén contactados con la red de los primeros. Los bombeos en la base de las rotondas son una tercera solución, aunque el agua debe posteriormente canalizarse en los sistemas anteriormente descritos.
5. Se recomienda una revisión de la red de acequias tanto en el margen este del aeropuerto como en el margen oeste, donde drena el Torrent Gros. En el caso de la primera, parte de la red de drenaje no es operativa, bien porque se ha clausurado o tras un siglo y medio a penas se han acometido obras de renovación o limpieza. Especialmente, la parte norte del aeropuerto, desde el Ullal de Son Mir abarcando parte del área este, mantiene un red obsoleta, con mucha masa vegetada en los cauces, como caños y cañizos, que impiden una eficaz circulación del agua en eventos de precipitaciones intensas, cuando entran en cargan dichos cauces. En el margen oeste sucede algo similar, donde el único cauce con garantías relativas de drenaje es el Torrent Gros. En el norte del Torrent Gros se han detectado tramos poco operativos (más estrechos y obturados) ya que no se realiza un mantenimiento continuo y regular del mismo.
  6. Es importante iniciar un estudio sobre un nuevo sistema de conducción de norte a sur del aeropuerto, que permita canalizar los flujos de agua que actualmente alimentan el acuífero en su borde este y oeste. Este sistema debe ser capaz de drenar una parte del volumen de agua que procede de los cauces naturales del norte del Pla y, también, una parte del agua que drena sobre las pistas del aeropuerto, calculada en  $0,68 \text{ hm}^3$  de acuerdo con el modelo matemático. Según se desprende del resultado de los estudios hidrológicos e hidrogeológicos, se recomienda realizar un dren norte sur con un mínimo de diámetro de 400 mm, y entre un 2% de desnivel y un 5%, de forma que puedan drenar entre 350 l/s y 550 l/s. Estos datos son orientativos y pueden ser variables en porcentaje de desnivel y diámetro en una sección longitudinal, por lo que se recomienda la

actuación por personal cualificado en obras de ingeniería hidráulica y una revisión y seguimiento del proyecto cuando este se inicie.

7. Es necesario una planificación de la distribución de los bombeos al noroeste, norte y este de aeropuerto. Los bombeos puntuales son una solución parcial al problema y, además, pueden causar una presión añadida al acuífero si no se plantean de forma equilibrada y sostenible. El cálculo de los conos de depresión de los bombeos es esencial para una correcta gestión de esa parte de los recursos hídricos, de forma que se pueda establecer una red de bombeos que indique correctamente los descensos y ascensos regionales del acuífero o, que impida, procesos de intrusión marina si se produce un descenso regional del acuífero.
8. El desarrollo del proyecto se ha producido durante un ciclo seco, por lo que no se ha podido verificar mediante eventos de inundación actuales las áreas que hoy día pueden inundarse. Por ello, es necesario la continuidad de los estudios en el Pla de Sant Jordi y el seguimiento de la red de piezómetros POSEIDÓN.
9. Es básico realizar dos estudios complementarios:
  - a. El Estudio hidrogeológico de los materiales Pliocenos del acuífero en el que se han detectado los Ullales y, que podría ser una reserva estratégica de agua en periodos secos como el actual.
  - b. Realizar un mapa de infiltración junto con estudio detallado de la variabilidad lateral y vertical de los sedimentos cuaternarios del acuífero. Esto permitiría tener una herramienta muy importante para la planificación del territorio en todas las vertientes que se han estudiado en el proyecto.
  - c. El estudio de una alternativa como reserva hídrica de agua del excedente que se plantea en este caso de estudio. Técnicas como Almacenamiento y Recuperación en acuíferos profundos (ASR) o distribución de balsas de drenaje, pueden ser una solución a medio plazo y largo plazo.