



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Grado en Ingeniería de Obras Públicas



Análisis del Posible Desvío de Caudales de Crecida desde el Río Girona hacia el Barranco de Portelles (T.M. Els Poblets, Alicante)

1. Estudios Hidrológicos y Análisis de Alternativas

Autor: Téllez Preseguer, Carlos

Tutor: Albentosa Hernández, Eduardo
Cotutor: Eguibar Galán, Miguel Ángel

Junio, 2014

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Grado en Ingeniería de Obras Públicas

TRABAJO FINAL DE GRADO

**Análisis del posible desvío de caudales de crecida desde el Río Girona hacia el Barranco de Portelles
(T.M. de Els Poblets, Alicante). Estudios hidrológicos y análisis de alternativas.**

Autor: Téllez Preseguer, Carlos

Tutor: Albentosa Hernández, Eduardo

Fecha: Junio, 2014

RESUMEN

El presente trabajo académico tiene por objeto analizar la posibilidad de realizar un desvío de caudales desde el río Girona hacia el barranco de Portelles en una situación de crecida, con la finalidad de reducir los riesgos de inundación en los municipios por los que discurren sus tramos finales. Este documento se centrará en los estudios hidrológicos que permitan la obtención de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno en ambos cauces.

El río Girona tiene una longitud aproximada de 38 km, y paralelo a él en su tramo final, desemboca el Portelles, con una longitud de 6 km aproximadamente, atravesando municipios como El Verger, Ondara o Els Poblets y desembocando ambos en el mar Mediterráneo. Es en sus tramos finales (entre la AP-7 y la desembocadura) donde es necesaria la ubicación de un canal de desvío que comunique ambos cauces, transfiriendo caudales del Girona al Portelles en situación de crecida. Tal necesidad de actuación viene precedida de graves daños históricos y recientes provocados por desbordamientos incontrolados en los municipios colindantes del río Girona.

Para ello, se realizará un estudio hidrológico de la zona a partir de un modelo de elevación digital, con el que se identificarán las cuencas de ambos cauces, sus redes de drenaje, recorridos principales y características hidromorfológicas básicas del sistema, así como los valores que corresponden al umbral de producción de escorrentía. Posteriormente, partiendo de un conjunto de registros pluviométricos, se realizarán los correspondientes ajustes estadísticos que permitan obtener los cuantiles de precipitación asociados a cada periodo de retorno para, con posterioridad, implementar un modelo lluvia-escorrentía.

Como resultado, se han definido los caudales asociados a cada periodo de retorno analizado; y, mediante la complementación con el Trabajo Final de Grado presentado por el alumno Guillermo Micó Pérez, en el que se desarrolla con amplitud la situación actual (a efectos de comportamiento hidráulico) y el diseño hidráulico del sistema para la situación de desvío planteada, se realiza la valoración económica de la nueva actuación y la evaluación del funcionamiento del sistema para un periodo de retorno de 100 años.

Palabras clave: Estudio hidrológico, Río Girona, Barranco de Portelles, Caracterización del sistema hidrológico, Análisis estadístico, Producción de escorrentía, Modelo lluvia-escorrentía

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Grado en Ingeniería de Obras Públicas

TREBALL FI DE GRAU

Anàlisi de la possible desviació de cabals de de crecuda des del Riu Girona cap al Barranc de Portelles (T.M. d'Els Poblets, Alacant). Estudis hidrològics i anàlisi d'alternatives.

Autor: Téllez Preseguer, Carlos

Tutor: Albentosa Hernández, Eduardo

Data: Juny, 2014

RESUM

El present treball acadèmic té com a objecte analitzar la possibilitat de realitzar una desviació de cabals des del riu Girona cap al barranc de Portelles en una situació de crecuda, amb la finalitat de reduir els riscos d'inundació en els municipis pels quals discorren els seus trams finals. Este document se centrarà en els estudis hidrològics que permeten l'obtenció dels cabals de crecuda per a diferents períodes de retorn en ambdós cursos.

El riu Girona té una longitud aproximada de 38 km, i paral·lel a ell en el seu tram final, desemboca el Portelles, amb una longitud de 6 km aproximadament, travessant municipis com El Verger, Ondara o Els Poblets i desembocant ambdós en el mar Mediterrani. És en els seus trams finals (entre l'AP-7 i la desembocadura) on és necessària la ubicació d'un canal de desviació que comuniqui ambdós cursos, transferint cabals del Girona al Portelles en situació de crecuda. Tal necessitat d'actuació ve precedida de greus danys històrics i recents provocats per desbordaments incontrolats en els municipis limítrofs del riu Girona.

Per a això, es realitzarà un estudi hidrològic de la zona a partir d'un model d'elevació digital, amb el qual s'identificaran les conques d'ambdós cursos, les seues xarxes de drenatge, recorreguts principals i característiques hidromorfomètriques bàsiques del sistema, així com els valors que corresponen al paràmetre de producció d'escolament. Posteriorment, partint d'un conjunt de registres pluviomètrics, es realitzaran els corresponents ajustos estadístics que permeten obtindre els quantils de precipitació associats a cada període de retorn per a, amb posterioritat, implementar un model pluja-escolament.

Com resultat, s'han definit els cabals associats a cada període de retorn analitzat; i, per mitjà de la complementació amb el Treball Final de Grau presentat per l'alumne Guillermo Micó Pérez, en el que es desenvolupa amb amplitud la situació actual (a l'efecte de comportament hidràulic) i el disseny hidràulic del sistema per a la situació de desviació plantejada, es realitza la valoració econòmica de la nova actuació i l'avaluació del funcionament del sistema per a un període de retorn de 100 anys.

Paraules clau: Estudi hidrològic, Riu Girona, Barranc de Portelles, Caracterització del sistema hidrològic, Anàlisi estadístic, Producció d'escorrentia, Model pluja-escolament

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Grado en Ingeniería de Obras Públicas

FINAL DEGREE PROJECT

**Analysis of possible diversion of flood flows from the Girona River to the Portelles Canyon.
(Municipality of Els Poblets, Alicante). Hydrological studies and analysis of alternatives.**

Author: Téllez Preseguer, Carlos
Tutor: Albentosa Hernández, Eduardo

Date: June, 2014

SUMMARY

This project is to analyse the possibility of a diversion of flow from the river Girona to Portelles Canyon in a flood situation, in order to reduce the risk of flooding in the nearby municipalities in their final stretches. This paper will focus on hydrological studies to obtain the flood flows for different return periods in both rivers.

The Girona River has a length of 38 km, and parallel to it in its final stretch, the Portelles ends with a length of 6 km approximately, through towns like El Verger, Els Poblets and Ondara and leading both to the Mediterranean Sea. It is in its final stages (between the AP-7 and the sea) where the location of a diversion channel to communicate both rivers, transferring flows from Girona to Portelles in flood situation is necessary. This need for action is preceded by serious historical and recent damages caused by uncontrolled overflows in the neighbouring towns of Girona River.

For this, a hydrological study of the area is going to be made. Starting from a digital elevation model, the study will include the identification of both river basins, their drainage networks, main routes, hydromorphometric system characteristics and values corresponding to runoff production threshold. Subsequently, based on a set of historical rainfall data, the corresponding statistical adjustments will allow to obtain the quantiles of precipitation associated with each return period to implement a rainfall-runoff model.

As a result, the flow associated with each return period analysed has been defined; and by the complementation with the Final Project Degree presented by Guillermo Micó Pérez student, which completely develops the current situation (for the purposes of hydraulic behaviour) and the hydraulic system design for the divert situation planned, an economical valuation of the new action and the evaluation of the hydraulic behaviour of the system for a return period of 100 years have been made.

Keywords: Hydrological study, Girona River, Portelles Canyon, Identification of the hydrological system, Statistical analysis, Production runoff, Rainfall-runoff model

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. EMPLAZAMIENTO.....	10
1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CAUCES Y ANTECEDENTES	11
1.3. OBJETIVOS	12
1.4. PARTICIÓN DE DOCUMENTOS.....	12
2. ESTUDIO HIDROLÓGICO	13
2.1 INTRODUCCIÓN.....	13
2.1.1. METODOLOGÍA HIDROLÓGICA.....	13
2.1.2. INFORMACIÓN UTILIZADA	14
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO.....	15
2.2.1. PREPROCESAMIENTO DE LA IDT.....	15
2.2.2. ESQUEMA HIDROLÓGICO	16
2.2.3. PARÁMETROS HIDROMORFOMÉTRICOS BÁSICOS.....	18
2.2.4. PARÁMETRO DE PRODUCCIÓN DE ESCORRENTÍA	20
2.2.4.1. Características litoedafológicas y adaptación a las clases del SCS.....	20
2.2.4.2. Características de la cubierta del suelo.....	22
2.2.4.3. Estimación del umbral de escorrentía	23
2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PLUVIOMETRÍA EXTREMA.....	26
2.3.1. ANÁLISIS DE LA PLUVIOMETRÍA DISPONIBLE	28
2.3.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA EMPLEADA	32
2.3.2.1. Función de distribución teórica Gumbel.....	33
2.3.2.2. Función de distribución teórica SQRT-ETmax	33
2.3.2.3. Función de distribución teórica GEV	34
2.3.2.4. Función de distribución teórica TCEV	34
2.3.2.5. Ajustes regionales	35
2.3.3. RESULTADOS: CUANTILES DE PD MÁXIMA ANUAL EN LAS ESTACIONES.....	37
2.4. MODELO LLUVIA ESCORRENTÍA PSEUDODISTRIBUIDO	51
2.4.1. MODELO HEC-HMS.....	51
2.4.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO	52
2.4.3. MODELOS DE SIMULACIÓN EMPLEADOS.....	53
2.4.3.1. Modelo de producción.....	53
2.4.3.2. Modelo de propagación a nivel de subcuenca.....	54

2.4.3.3. Modelo de propagación en cauces	55
2.4.4. HIPÓTESIS DE DISEÑO	57
2.4.4.1. Tipología de tormenta.....	57
2.4.4.2. Distribución de las tormentas de diseño	59
2.4.4.3. Condiciones de humedad antecedentes.....	70
2.4.4.4. Tiempo de desfase a la punta	72
2.4.4.5. Parámetros de rugosidad e identificativos de los tramos de propagación.....	73
2.4.4.6. Parámetros temporales de la simulación.....	73
2.4.5. HIDROGRAMAS DE DISEÑO DE RESPUESTA SUPERFICIAL DE LA CUENCA GIRONA Y LA CUENCA PORTELLES	74
3. ESTUDIO HIDRÁULICO	76
4. VALORACIÓN ECONÓMICA	77
5. CONCLUSIONES	79
6. REFERENCIAS.....	80

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el documento correspondiente al Trabajo Final de Grado del alumno Carlos Téllez Preseguer, con la colaboración del alumno Guillermo Micó Pérez, ambos estudiantes del Grado en Ingeniería de Obras Públicas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València.

El documento hará referencia a los contenidos aprendidos durante todo el Grado, enfocándose especialmente en materias relacionadas con la hidráulica y la hidrología.

Se presentan, por lo tanto, los documentos correspondientes a un estudio de inundaciones, estando éstos conformados, principalmente, por un estudio hidrológico y su posterior análisis hidráulico.

1.1. EMPLAZAMIENTO



Figura 1.1. Conjunto de imágenes de la zona objeto de estudio. Fuente: Google Earth

La zona de trabajo se encuentra dentro de la Comunidad Valenciana, al norte de la provincia de Alicante, en las cercanías de las poblaciones de Els Poblets, El Verger y Ondara, además de otros pueblos de tamaño más reducido colindantes a los cauces. El estudio hidrológico, por una parte, abordará por completo las cuencas de los ríos Girona y Portelles, mientras que el estudio hidráulico estará enfocado en el análisis de sus tramos finales.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CAUCES Y ANTECEDENTES

El río Girona tiene su recorrido en su totalidad dentro de la provincia de Alicante, pasando en los alrededores de términos municipales como Els Poblets, El Verger, Ondara, Benimeli, Pego, Beniarbeig, Benidoleig, Orba o Sanet y Negrals. Nace en el barranco de Fontblanca, dentro del término municipal de Valle de Alcalá. Su recorrido transcurre con posterioridad por las cercanías de la Sierra de la Carrasca, lugar donde recibe aportaciones provenientes de reducidos manantiales. Seguidamente entra en un barranco de formación caliza en donde sufre infiltraciones de caudales, desapareciendo éstos, prácticamente, durante la totalidad del año.

Al atravesar las poblaciones citadas en primera ocasión, desemboca en el mar Mediterráneo con una anchura aproximada de 30 metros, haciendo frontera entre los municipios de Els Poblets y Denia, en una zona conocida como punta de la Almadraba.

En los últimos años, durante diversos episodios de tormenta, se han generado inundaciones de una elevada gravedad en el tramo final del río, causando graves daños a la población de los municipios El Verger y Els Poblets.

En septiembre de 1919 las inundaciones afectaron al municipio de Beniarbeig, con socavaciones en los cimientos de algunas viviendas y alturas de 5 metros de agua. Las inundaciones se repitieron con posterioridad en 1941 y 1985, con elevado riesgo poblacional.

Una de sus peores inundaciones ocurrió recientemente en octubre de 2007, con lluvias superiores a los 400 mm, que provocaron desbordamientos incontrolados a lo largo de todo el tramo final del río, alcanzando niveles de agua superiores a cualquier inundación precedente. Tal crecida destruyó el puente de unión entre las localidades de Beniarbeig y Ondara, provocó el fallecimiento de una anciana, ahogada en su casa de El Verger, y el derrumbamiento de un edificio de unos 10 metros de altura en el mismo municipio, donde se alcanzaron cotas de hasta 2 metros de agua en las calles

En consecuencia, ante tal situación, se encuentra necesaria la realización de estudios hidrológico e hidráulico, permitiendo caracterizar la situación actual del sistema y evaluando, a su vez, la posibilidad de implementar soluciones que puedan reducir los daños causados por inundaciones en su tramo final.

El barranco de Portelles, por su parte, tiene su nacimiento en la Sierra de Segària, en una zona conocida como Las Umbrías de Segària, con altitudes en torno a los 450 msnm. Al salir de la sierra, discurre por el municipio de Els Poblets de forma paralela al tramo final del río Girona, desembocando, de la misma forma, en el mar Mediterráneo.

Como será descrito en el apartado de Hidrología, la cuenca de este cauce es notablemente inferior a la del Girona, por lo que las crecidas no suelen provocar graves inundaciones que puedan causar daños en los lugares por los que discurre su, a su vez, breve recorrido.

1.3. OBJETIVOS

A tenor de lo anteriormente mencionado, este estudio tiene por objeto el análisis de un posible desvío de caudales desde el río Girona hacia el barranco de Portelles, con la finalidad de que éste último pueda aliviar parte de las crecidas habituales ocurridas en el Girona, reduciendo su caudal punta. De esta forma, los riesgos y episodios de inundación quedarán reducidos en los términos municipales colindantes a la actuación.

Para ello se realizará un exhaustivo análisis hidrológico de la zona objeto de estudio, sobre las cuencas del río Girona y el barranco de Portelles. Con ello se obtendrán los caudales correspondientes a diferentes periodos de retorno con los que se elaborará el posterior estudio hidráulico. Este estudio consistirá en un análisis de la situación actual de ambos cauces, seleccionando aquellas secciones críticas que marcan un inicio de desbordamiento dentro de unos tramos definidos. Finalmente se analizarán un número determinado de soluciones concluyendo en la necesidad de desviar caudales mediante la implantación de un canal de derivación

La comparación entre los diferentes hidrogramas se realizará en el punto de desembocadura de ambos cauces, de forma que se valore orientativamente la reducción del pico del hidrograma del Girona.

1.4. PARTICIÓN DE DOCUMENTOS

El presente estudio ha sido dividido en dos documentos, estando el primero de ellos enfocado especialmente en el estudio hidrológico exhaustivo de la zona y el segundo centrado en el estudio hidráulico de la situación actual, el análisis de las alternativas hidráulicas posibles y la justificación de la solución final a adoptar que permita subsanar los graves episodios de inundación provocados. La asignación de cada documento a los dos alumnos participantes en el presente estudio ha sido la siguiente:

- Téllez Preseguer, Carlos: Estudio Hidrológico (apartado 2)
- Micó Pérez, Guillermo: Estudio Hidráulico (apartado 3)

2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

A continuación se desarrollan los contenidos correspondientes al estudio hidrológico de la zona objeto de estudio, conformada por la cuenca del río Girona y la cuenca del barranco de Portelles.

2.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se presentan resumidamente los trabajos realizados en la fase de desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico de crecidas para el sistema hidrológico constituido por el río Girona y el Barranco de Portelles, orientado a la estimación máximo probable de los hidrogramas esperados en la desembocadura al mar Mediterráneo de ambos cauces.

En el presente modelo se ha hecho uso de toda la información hidrológica disponible correspondiente a series de pluviometría extrema, así como la información geomorfológica del sistema Girona-Portelles convenientemente procesada mediante técnicas SIG.

2.1.1. METODOLOGÍA HIDROLÓGICA

Dada la ausencia de series de datos de aforos fiables en el sistema hidrológico, es necesaria la aplicación de un método hidrometeorológico. En estos modelos se parte de un análisis de la frecuencia de las precipitaciones máximas, con el propósito de obtener, en una primera fase, el hietograma de diseño correspondiente a cada uno de escenarios de periodo de retorno evaluados. En una segunda fase de implementación de un modelo de transformación de lluvia en escorrentía superficial, se transforma el hietograma en caudales de crecida en el punto de desagüe.

La caracterización hidromorfométrica del sistema hidrológico y la estimación de los valores del parámetro de producción se ha realizado de forma automatizada con las herramientas que provee el Sistema de Información Geográfica GRASS a partir de un Modelo de Elevación Digital (en adelante, MED) de la zona objeto de estudio en formato *raster* de la Confederación Hidrográfica del Júcar (en adelante, CHJ) y las coberturas *raster* de cartografía temática correspondiente a los usos del suelo y texturas del suelo correspondientes al ámbito geográfico del sistema hidrológico. Todo ello es desarrollado en el apartado 2.2.

La obtención de los cuantiles de precipitación máxima anual (apartado 2.3) se ha llevado a cabo mediante un exhaustivo análisis estadístico de las series de precipitación máxima anual de diversas estaciones pluviométricas presentes en la zona, las cuales pertenecen a la red de la Agencia Estatal de Meteorología (en adelante, AEMET), contrastando diversos modelos estadísticos con funciones de distribución de extremos probabilísticos de 2, 3 y 4 parámetros, e incorporando, además de los diferentes ajustes locales y algunos regionales, los resultados de la publicación “Máximas Lluvias diarias en la España Peninsular” (Ministerio de Fomento, 1999), estudio basado en la tesis doctoral de D. Javier Ferrer, en el cual se realiza un ajuste regional de la función de distribución SQRT-ETmax a partir de los datos de precipitación diaria máxima anual registrados en las estaciones peninsulares del territorio español.

Para la transformación de lluvia en escorrentía se ha empleado un modelo conceptual pseudodistribuido con hidrograma unitario (en adelante, HU) de diseño (desarrollado en el apartado 2.4). El *software* empleado para ello ha sido el HEC-HMS en su versión más actualizada (4.0), desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers* del *Hydrologic Engineering Center*, el cual simula el proceso de transformación de lluvia en escorrentía mediante una serie de submodelos que corresponden con las distintas fases del proceso:

- Producción de escorrentía superficial
- Propagación de escorrentía superficial a nivel de subcuenca
- Evolución del flujo base a nivel de subcuenca (despreciable para las subcuencas que conforman el presente sistema hidrológico)
- Propagación de la escorrentía en los cauces que conforman el sistema (en este caso conformado por el río Girona y el barranco de Portelles)

El modelo de producción empleado ha sido el del *Soil Conservation Service* (en adelante, SCS), ampliamente experimentado y el cual precisa únicamente de un solo parámetro conocido como umbral de escorrentía, el cual será modificado atendiendo condiciones secas de humedad antecedente en el suelo. El proceso de transformación de lluvia neta en escorrentía para cada subcuenca ha sido modelado en términos de la teoría lineal de los sistemas hidrológicos, utilizando para ello HU sintéticos con la función de representar la respuesta hidrológica frente a una lluvia neta unitaria (concretamente, se ha empleado el HU del SCS, especialmente recomendable en los casos en los que se dé la imposibilidad de calibración del modelo por inexistencia de registros históricos fiables). En cuanto a la propagación en los cauces que conforman el sistema hidrológico, se ha simulado mediante el modelo de Muskingum-Cunge. Los fundamentos de todos estos modelos se encuentran en el apartado 2.4.3.

2.1.2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información básica utilizada en el estudio hidrológico ha sido la que se enumera a continuación:

- MED formato *raster* con resolución 100x100 m obtenido de la CHJ
- Cartografía base de referencia correspondiente a la zona de estudio, extraída del visor Google Maps
- Información digital de la zona obtenida del Instituto Cartográfico Valenciano
- Serie Temática (antigua COPUT) del Visor Web de Cartografía de la Comunidad Valenciana
- Cartografía digital, en formato *raster*, de los usos del suelo en toda la zona correspondiente a la CHJ (creado a partir del mapa CORINE Land Cover 2006, que incluye una base de datos sobre la ocupación del suelo a nivel europeo actualizada al año 2006)
- Cartografía digital, en formato *raster*, de texturas en la zona correspondiente a la CHJ (creado a partir del mapa de texturas de la UE del *European Soil Database*)
- Series de precipitación máxima mensual correspondientes a las siguientes estaciones de la AEMET, cedidas por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (en adelante, DIHMA) de la Universitat Politècnica de València:
 - Almudaina (cód. 8066; término municipal de Alicante)
 - El Verger Racons (cód. 8056; término municipal de Verger)
 - Pego Convento (cód. 8057A; término municipal de Pego)

- Vall de Laguart Fontilles (cód. 8054; término municipal de Vall de Laguart)
- Estudio de “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” de la Dirección General de Carreteras, editado por el Ministerio de Fomento en 1999.
- Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial”
- Diploma de Estudios Avanzados de Eduardo Albertosa Hernández del DIHMA de la Universitat Politècnica de València (2011)

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO

La identificación y caracterización del sistema hidrológico se ha llevado a cabo mediante el uso de la herramienta SIG GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de Estados Unidos (USA-CERL).

El Sistema de Información Geográfica empleado requiere como único *input* el MED de la zona de estudio en formato *raster*, a partir del cual, en primera fase, se obtienen los mapas de acumulación de flujo (celdas drenantes acumuladas) y de direcciones de drenaje, base esencial para el resto de la modelación. Una vez obtenidos estos mapas, en una segunda fase se extraen, mediante sencillos algoritmos con los cuales trabaja GRASS, el resto de capas que suministren la información necesaria para proceder a la identificación y caracterización completa del sistema hidrológico.

El procesamiento del MED para determinar las direcciones de drenaje en la zona es la fase más importante y de mayor complejidad del proceso, ya que condiciona la calidad del resto de capas de información a obtener, así como la fiabilidad de los parámetros característicos del sistema.

Una de las limitaciones fundamentales es la calidad de la Información Digital del Terreno (en adelante, IDT), por lo que en primer lugar se ha procedido a un preprocesamiento de la misma con la finalidad de conseguir un MED hidrológicamente correcto, el cual reproduzca fielmente la orografía de la zona de análisis y mediante el posterior procesamiento por el *software*, se extraiga una red de drenaje coincidente con la de referencia.

2.2.1. PREPROCESAMIENTO DE LA IDT

El proceso seguido para la obtención del MED hidrológicamente correcto, en relación al modelo de referencia, se fundamenta en el método *stream burning*, el cual consta de las siguientes fases:

1. Creación del fichero en formato vectorial de la red de drenaje (también conocido como “mapa de líneas azules”, y, en adelante, MLA) por digitalización manual en el SIG ArcView a partir de la imagen de la zona capturada del visor Google Maps debidamente georreferenciada.
2. *Rasterización* del fichero vectorial MLA, con idéntica extensión geográfica y tamaño de celda que el MED de partida (100x100 m). Esto resulta en un fichero *raster* en el que las celdas correspondientes a la red MLA poseen un valor entero positivo (en este caso igual a 1) y el resto tiene valor nulo.

3. Resta algebraica del fichero *raster* MLA al fichero MED original, obteniendo el MED corregido, en el que todas aquellas celdas coincidentes con la red tendrán un valor de cota inferior al original en una cantidad equivalente al valor asignado a aquellas celdas pertenecientes a la red de drenaje digitalizada.
4. Procesamiento del MED original con las herramientas disponibles en GRASS con la finalidad de obtener la identificación de la red de drenaje del sistema (corrección de sumideros locales, obtención de los mapas de celdas drenantes acumuladas, direcciones de drenaje e introducción del umbral de celdas necesarias para la producción de escorrentía).
5. Verificación de la semejanza entre la red MLA de partida y la derivada a partir del procesamiento del MED corregido, además de la validez de la divisoria de aguas del sistema hidrológico. En el caso de no alcanzar un resultado satisfactorio, se deberá repetir el proceso desde la fase 3, en este caso, reclasificando como paso previo el fichero *raster* MLA, asignando a las celdas pertenecientes a la red de drenaje un valor superior para conseguir una mayor profundidad del terreno y forzar al correcto comportamiento de los cauces.

Los resultados obtenidos finalmente (habiendo sido necesaria la implantación de la fase 4) han sido satisfactorios, consiguiendo un buen nivel de adaptación al mapa MLA y una reproducción coherente con las direcciones preferentes de flujo en el sistema.

2.2.2. ESQUEMA HIDROLÓGICO

A partir del MED hidrológicamente correcto e implantando las herramientas del SIG GRASS ya mencionadas, se ha identificado, por una parte, la cuenca correspondiente al río Girona y, por otra, la correspondiente al barranco de Portelles (las cuales conforman el sistema hidrológico objeto de análisis), hasta sus respectivas desembocaduras al mar. La localización geográfica de las secciones de ambos cursos principales correspondientes al desagüe al mar, en el sistema de referencia de la información digital del Instituto Cartográfico Valenciano, viene definida por las siguientes coordenadas UTM del Huso 30:

- **Río Girona:** 762314 Este y 4305939 Norte
- **Barranco de Portelles:** 761088 Este y 4306234 Norte

En la siguiente figura se muestran las cuencas correspondientes al sistema hidrológico conformadas tanto por el barranco de Portelles (cuenca superior y de menor extensión) como por el cauce del río Girona (cuenca inferior, y de mayor extensión), estableciendo como fondo el MED *raster* recortado a la divisoria de aguas de ambas cuencas. Al mismo tiempo se muestra las redes de drenaje y recorridos principales respectivos, cabeceras de los cuales se exponen seguidamente:

- **Río Girona:** nacimiento localizado al Oeste de la cuenca, en el barranco de Fontblanca, cerca de Alcalá de la Jovada, en el municipio de Valle de Alcalá, a cotas aproximadas de 710 msnm. Posteriormente continúa su recorrido por las proximidades de la Sierra de la Carrasca

- Barranco de Portelles: nacimiento en el extremo Sur-Oeste de la cuenca, en la Sierra de Segària, a cotas próximas a 390 msnm

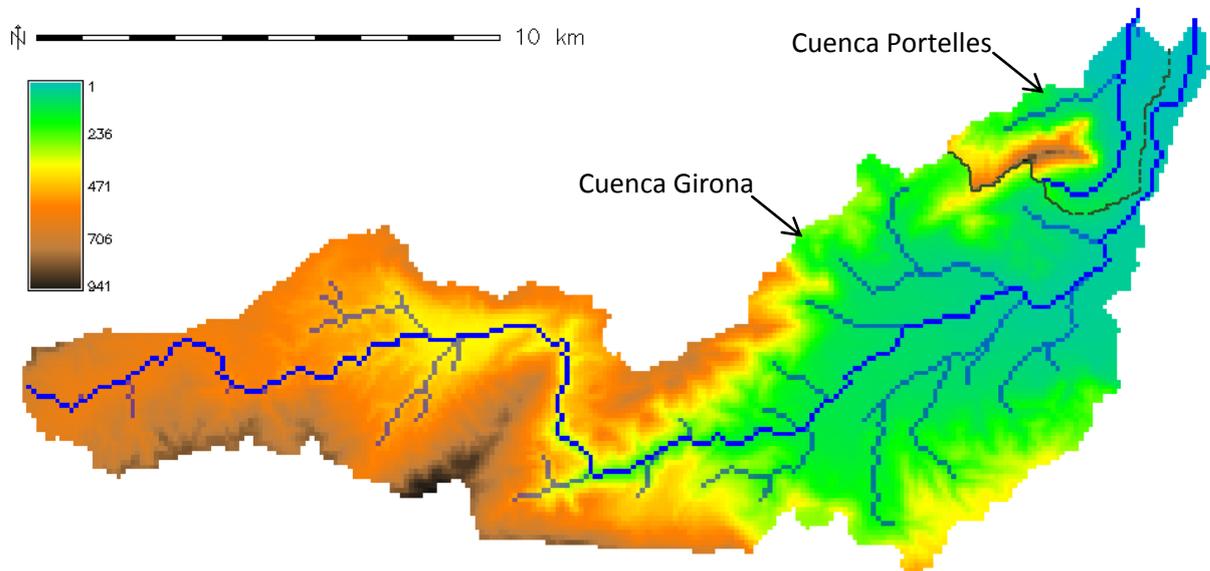


Figura 2.1. MED, red de drenaje y recorrido principal de las cuencas objeto de estudio.

Las características topográficas del sistema (en relación a la variabilidad entre las pendientes topográficas de las zonas de cabecera y la llanura costera), la diferencia entre el comportamiento de las series de precipitación registradas en las estaciones más cercanas a la costa (representando una elevada torrencialidad) con respecto a las ubicadas en zonas más elevadas correspondientes a zonas del interior, así como la forma alargada de la cuenca del Girona, han resultado de crucial relevancia en la decisión de la tipología de modelación a emplear (desde el punto de vista del nivel de agregación del sistema hidrológico), estableciendo, por lo tanto, una modelación pseudo-distribuida, con la que se pretende reproducir más fielmente la esperada respuesta hidrológica del sistema. Esta vendrá condicionada por el diferente tiempo de respuesta del sistema entre las zonas de sierra y la de llano costero (muy superior este último) que implica una tendencia a la aproximación temporal de las puntas de crecida y, por lo tanto, un hidrograma en el punto de desagüe mayor que el que reproduciría una hipotética modelación agregada.

Por consiguiente y en base a los objetivos definidos (elaboración de un modelo hidrológico pseudo-distribuido que reproduzca con fiabilidad la respuesta del sistema), la superficie del sistema se ha desagregado en una serie de subcuencas, tres de ellas correspondientes a la cuenca del río Girona y una única subcuenca conformando el subsistema creado por el barranco de Portelles (el cual, puede decirse que, si es extraído del sistema hidrológico que forma junto con el río Girona, ha sido modelado de forma agregada dada su reducida extensión), atendiendo a la topología de la red de drenaje y la heterogeneidad en el tiempo de respuesta del sistema ya mencionada anteriormente. El esquema pseudo-distribuido finalmente adoptado se compone de 4 subcuencas, que se desarrollan a continuación:

- **Subcuenca SC1:** subcuenca de cabecera Oeste del sistema, incluyendo las cotas de mayor elevación. Representa aproximadamente un tercio del área total de la cuenca del río Girona.

- **Intercuenca IC1:** intercuenca inmediatamente aguas debajo de la anterior. Le corresponden cotas intermedias, con una zona al oeste más elevada y otra al este de menor elevación. Representa aproximadamente un tercio del área total de la cuenca del río Girona
- **Intercuenca IC2:** resto de la cuenca hasta el desagüe al mar. Se desarrolla en una zona de llanura, representando aproximadamente un tercio de la cuenca total del río Girona.
- **Subcuenca SCP:** correspondiente al barranco de Portelles, desde su nacimiento hasta su desembocadura al mar. Como ya se ha mencionado anteriormente, no se ha dividido la cuenca del Portelles en más subcuencas debido a su reducida extensión en relación a la cuenca del Girona y sus tres subcuencas SC1, IC1 y IC2.

El esquema hidrológico puede verse en la figura adjunta a continuación, con la red de drenaje, en la cual aparece resaltado el recorrido principal de cada subcuenca.

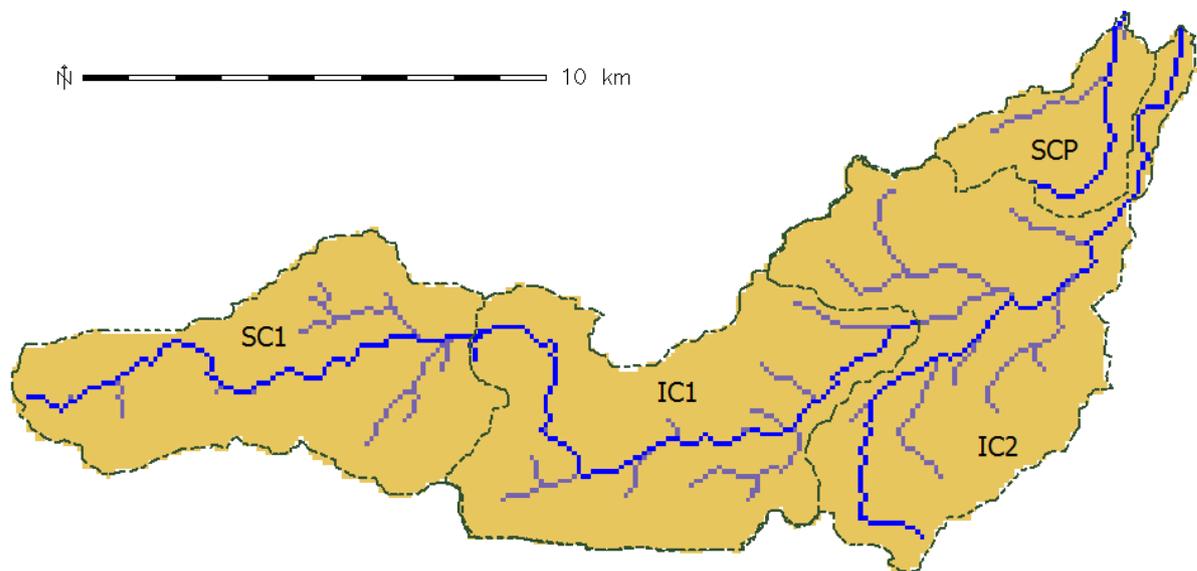


Figura 2.1. División del sistema hidrológico en subcuencas, con red de drenaje y recorridos principales.

2.2.3. PARÁMETROS HIDROMORFOMÉTRICOS BÁSICOS

Los principales parámetros característicos del sistema hidrológico conformado por las 4 subcuencas se muestran en la siguiente tabla.

En la tabla:

- S : superficie de la subcuenca
- J : pendiente media de la subcuenca
- L_{rp} : longitud del recorrido principal
- J_{rp} : pendiente media del recorrido principal
- T_c : tiempo de concentración de la subcuenca, según la expresión de Témez:

$$T_c = 0.3 \cdot \left(\frac{L_{rp}}{J_{rp}^{\frac{1}{4}}} \right)^{0.76}$$

- R_f : factor de forma Horton, que exprese la relación entre el área real y área del cuadrado de lado la longitud máxima de la cuenca (L_m). Toma valores alrededor de 0.8 para cuencas muy redondeadas y valores próximos a 0 para cuencas alargadas:

$$R_f = \frac{S}{L_m^2}$$

- I_a : índice de alargamiento Horton, que expresa la relación entre la longitud máxima de la cuenca (L_m) con su ancho máximo (a) medio perpendicular a la dimensión mayor:

$$I_a = \frac{L_m}{a}$$

	CUENCA GIRONA	SC1	IC1	IC2	SCP
S (km ²)	115.8	34.8	38.6	42.4	9.9
J (m/m)	0.112	0.100	0.123	0.078	0.105
L_{rp} (km)	38.4	12.4	15.3	17.0	5.7
J_{rp} (m/m)	0.018	0.087	0.033	0.021	0.020
T_c (h)	10.3	3.2	4.6	5.4	2.4
R_f	0.08	0.23	0.17	0.15	0.30
I_a	4.35	2.74	2.51	1.47	1.62

Tabla 2.1. Parámetros hidromorfométricos básicos

El factor de forma Horton de la cuenca del río Girona es de 0.08, lo que indica una forma claramente alargada. De ello se deriva que en general no es propensa a presentar crecidas repentinas en el momento de presentarse lluvias intensas.

En términos generales se puede observar que, si bien las subcuencas son analizadas individualmente, así como la subcuenca Portelles, éstas presentan un coeficiente mayor pero reducido, siendo la subcuenca Portelles la que presenta mayor circularidad.

Por su parte, el Índice de alargamiento Horton de la cuenca del río Girona es de 4.35, lo que indica que la cuenca presenta un sistema de drenaje alargado dotando un alto nivel de evolución del sistema en situación de crecida. Esto ha sido un factor clave a la hora de establecer la división en subcuencas del sistema hidrológico tal y como ha sido expuesto en el apartado 2.2.2.

Individualmente, las subcuencas analizadas, así como la subcuenca Portelles, presentan un índice de alargamiento menor, y menor grado de evolución individual dentro de su superficie.

2.2.4. PARÁMETRO DE PRODUCCIÓN DE ESCORRENTÍA

El modelo empleado para el análisis de la producción de escorrentía ha sido el del Soil Conservation Service que, como ya se ha mencionado anteriormente en el apartado 2.1.1 posee una amplia experimentación y únicamente precisa el parámetro umbral de escorrentía (P_0). Éste parámetro depende de cuatro variables, las cuales engloban las características geomorfológicas de la región objeto de análisis:

- Tipo de suelo (atendiendo principalmente a su capacidad de drenaje)
- Cubierta del suelo
- Pendiente del terreno correspondiente al sistema hidrológico
- Condiciones previas de humedad del complejo suelo-vegetación (este punto se desarrollará ampliamente, con posterioridad, en el apartado 2.4.4.4.)

La relación entre el umbral de escorrentía y las variables tipo de suelo, cubierta de suelo y pendiente del terreno es tabular, debiendo verse modificados los valores obtenidos, atendiendo a las condiciones antecedentes de humedad. Para tal labor, el SCS establece tres estados en función de la precipitación total de los cinco días anteriores, lo cual determina los factores correctores del P_0 obtenido de forma previa.

La obtención de los umbrales de escorrentía en el sistema hidrológico se ha realizado con ayuda del SIG GRASS, cuyas herramientas de geoprocésamiento espacial permiten la automatización de la superposición de las capas de información correspondientes a cada variable involucrada.

2.2.4.1. Características litoedafológicas y adaptación a las clases del SCS

Debido a la indisponibilidad de un estudio edafológico detallado de la región, la caracterización del suelo se ha desarrollado en base a un mapa de texturas del suelo codificado en formato *raster* (creado a partir del mapa de texturas de la UE del *European Soil Database*), cuya codificación distingue los tipos de suelo que se encuentran presentes en la zona en grupos de suelo que establece el SCS.

Esta información ha sido contrastada y verificada con trabajo de campo y las correspondientes consultas realizadas mediante el Visor Web Cartográfico de la Comunidad Valenciana, en su capa de Litología de la zona, dentro del apartado Serie Temática (antigua COPUT).

Las características edáficas de la zona quedan identificadas en la tabla que se muestra a continuación. En dicha tabla las unidades edáficas de textura del suelo se encuentran agrupadas atendiendo al grupo de suelo al cual pertenecen, según establece el modelo del SCS.

TEXTURA DEL SUELO	GRUPO DE SUELO
Franco - arenosa Franca Franco - arcillosa - arenosa Franco - limosa	B (suelos con velocidad de infiltración moderada cuando están mojados)
Franco - arcillosa Franco - arcillosa - limosa Arcillo - arenosa	C (suelos con velocidad de infiltración lenta cuando están mojados)

Tabla 2.2. Agrupación de las unidades edáficas presentes en la zona en grupos de suelo establecidos por el SCS

El mapa que se muestra a continuación representa la distribución geográfica en la zona de los diferentes grupos de suelo identificados en el sistema.

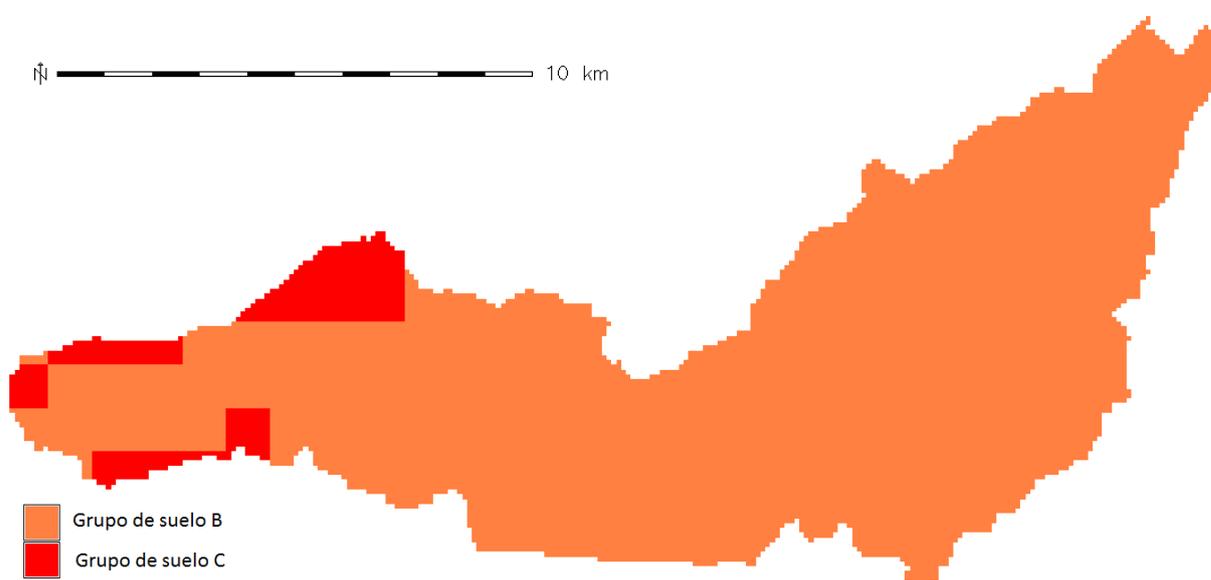


Figura 2.2. Mapa que muestra la distribución edáfica de la zona según los grupos de suelo que establece el modelo del SCS

Se puede extraer de la imagen que el grupo de suelo dominante en el sistema es el 'B', conformado por texturas franco-arenosas, francas, franco-arcillosas-arenosas y franco-limosas, encontrando una reducida porción del territorio con grupo de suelo de tipo 'C', caracterizado por la presencia de texturas franco-arcillosas, franco-arcillosas-limosas y arcillo-arenosas, tal y como recoge la tabla 2.2.

En la tabla siguiente se muestra las extensiones de cada grupo de suelo en el sistema, obtenidas mediante técnicas SIG.

GRUPO DE SUELO	EXTENSIÓN (km ²)
B	117.3
C	8.4

Tabla 2.3. Extensión de los diferentes grupos de suelo identificados en el sistema

2.2.4.2. Características de la cubierta del suelo

Para caracterizar la cubierta del suelo se ha utilizado como cartografía de base un mapa de usos de suelo formato *raster* (creado a partir del mapa CORINE Land Cover 2006), codificado, asignando a cada celda un valor correspondiente a cada unidad de cubierta de suelo, y sus correspondientes comprobaciones sobre la representatividad que muestra sobre la región mediante el uso del visor Google Maps, así como del trabajo de campo. La información ha sido procesada en el SIG GRASS y convenientemente recortada a la región de análisis.

Las unidades de cubierta de suelo identificadas han sido las siguientes:

- Zonas urbanas de baja densidad: localidades de El Verger, Ondara y Beniarbeig, en el tramo final de los cauces y próximas a la zona de desembocadura.
- Áreas agrícolas: de regadío, fundamentalmente especies cítricas, ocupando su mayor extensión en la zona baja del sistema.
- Zonas forestales y seminaturales: incluyendo desde montes bajos y afloramientos rocosos hasta masas forestales más densas presentando especies arbóreas, ocupando la mayor extensión del sistema.

La siguiente tabla muestra la extensión ocupada por cada unidad de cubierta del suelo:

CUBIERTA DE SUELO	ÁREA (km ²)
Zonas urbanas	3.2
Zonas agrícolas	47.3
Zonas forestales y seminaturales	75.1

Tabla 2.4. Extensión de las unidades de cubierta del suelo

La siguiente ilustración muestra la zonificación de las diferentes unidades de cubierta de suelo en el sistema Girona – Portelles.

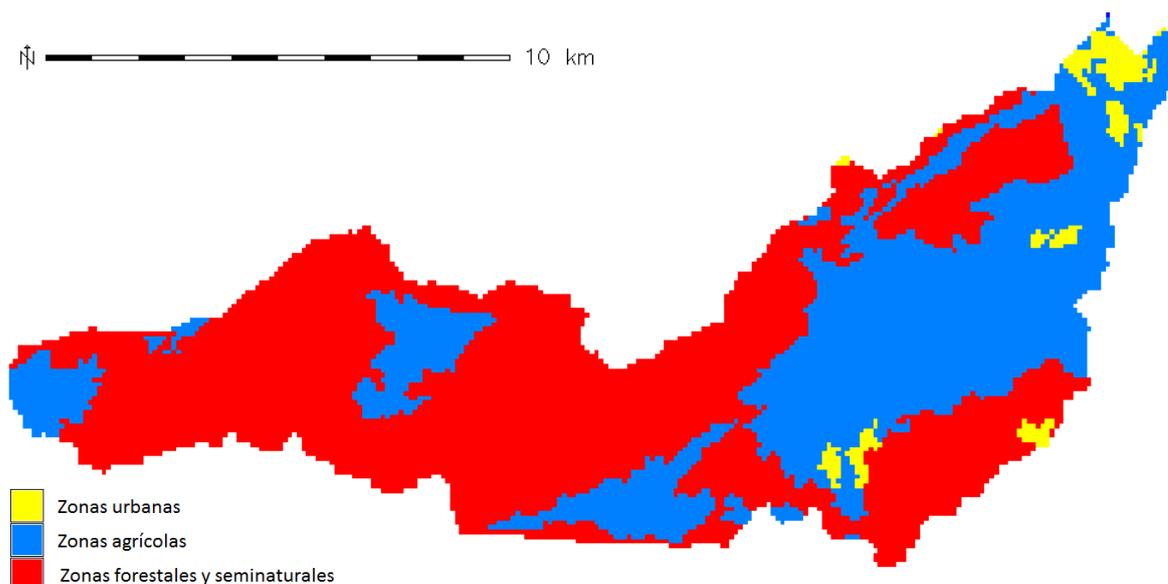


Figura 2.3. Mapa que muestra las delimitaciones entre los diferentes usos del suelo

2.2.4.3. Estimación del umbral de escorrentía

El proceso de obtención del parámetro umbral de escorrentía ha sido el siguiente:

1. Obtención del mapa de clinometría y su adaptación al modelo del SCS

Una vez codificados en formato *raster* los mapas correspondientes a las características edáficas de la zona (apartado 2.2.4.1.) y las unidades de cubierta de suelo (apartado 2.2.4.2.) se procede a la obtención del mapa de clinometría. El procedimiento parte del MED original formato *raster*, derivando el mapa de pendientes del terreno mediante herramientas implantadas en el SIG GRASS. Tal fichero ha sido recortado al sistema de estudio y reclasificado con posterioridad en un mapa en el que se representan divididas únicamente aquellas celdas con pendiente mayor o menor al 3% (en correspondencia a las dos categorías que, en relación a la pendiente del terreno, establece el modelo del SCS).

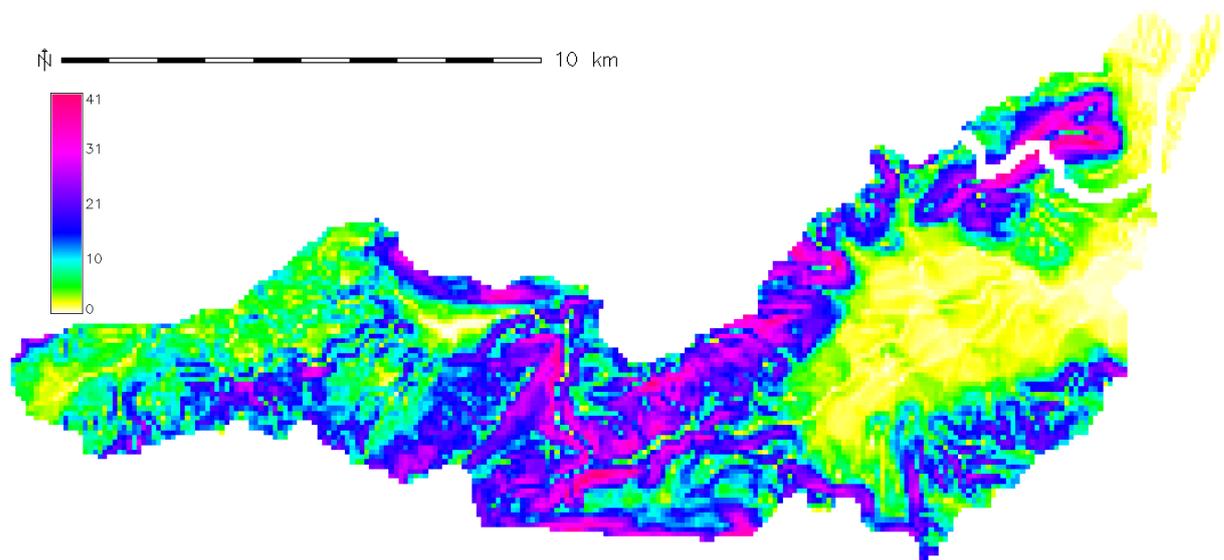


Figura 2.5. Mapa obtenido de las pendientes del terreno en tanto por ciento de la zona analizada, dividiendo las cuencas Girona y Portelles

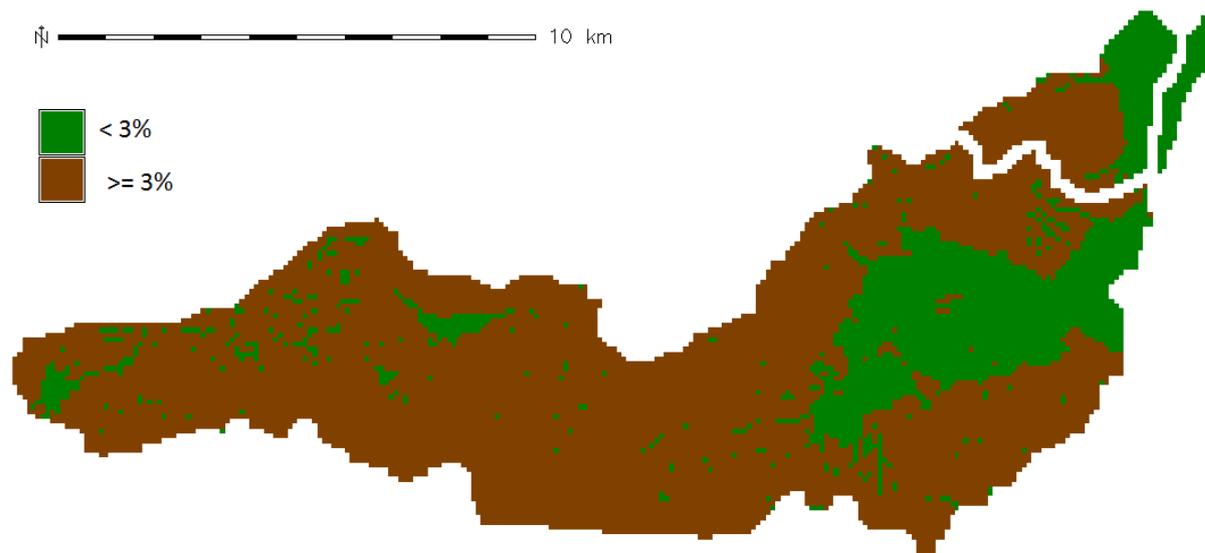


Figura 2.6. Mapa obtenido de la reclasificación del mapa 2.5 según establece el SCS en pendientes mayores o menores al 3%, dividiendo las cuencas Girona y Portelles

2. Recodificación e intersección de las capas de información

Mediante herramientas que incluye GRASS se reclasifican los mapas *raster* de grupos de suelo (figura 2.3) y usos del suelo (figura 2.4), así como el de clinometría (figura 2.6), asignando un código numérico diferente a las celdas correspondientes a las diferentes clases de atributos.

Con posterioridad y empleando herramientas básicas de geoprocésamiento espacial, se intersecan las tres capas antes mencionadas, realizando la correspondiente operación para que, dependiendo de la recodificación realizada, el mapa obtenido contenga un valor diferente para cada una de las combinaciones posibles de las tres capas de información. De esta manera, y atendiendo a la tabla que se muestra a continuación (obtenida a partir de la Orden de 14 de mayo de 1990, por la que se aprueba la instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial”. BOE 123, 23 de mayo de 1990), queda definido el valor umbral de escorrentía en condiciones de humedad antecedente tipo II (condiciones medias de humedad del suelo) para cada celda correspondiente a tal combinación.

USO DEL SUELO	PENDIENTE	GRUPO DE SUELO	
		B	C
Zonas urbanas	≥ 3%	3	3
	< 3%	5	5
Zonas agrícolas	≥ 3%	18	12
	< 3%	22	15
Zonas forestales y seminaturales	≥ 3%	40	20
	< 3%	50	35

Tabla 2.5. Asignación del umbral de escorrentía para cada combinación posible de las capas de información

El siguiente mapa muestra la variabilidad del umbral de escorrentía en el sistema analizado.

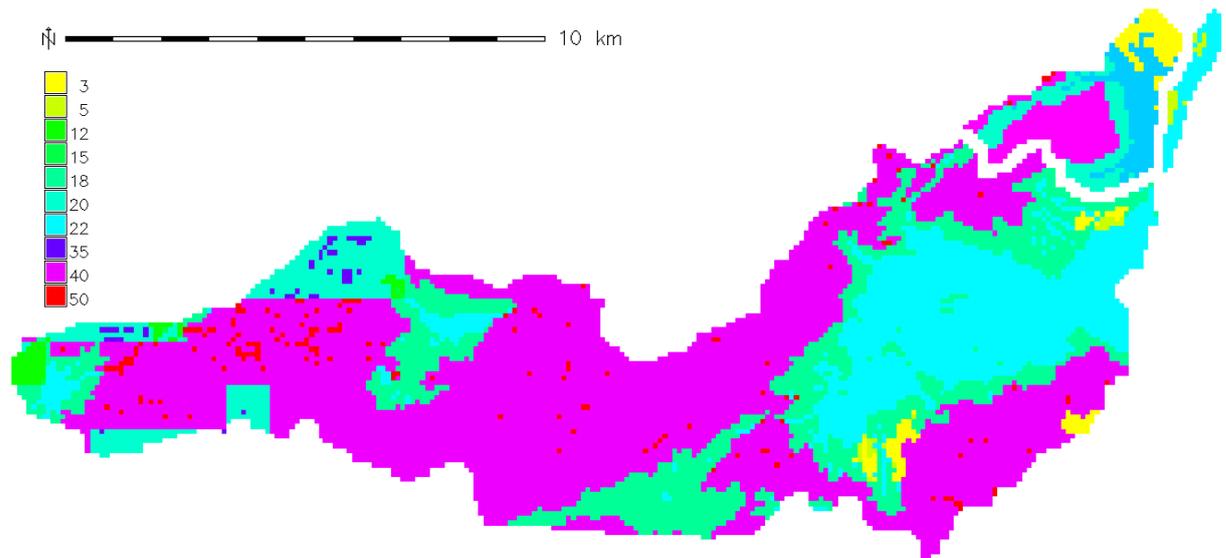


Figura 2.7. Imagen de la distribución del umbral de escorrentía en las cuencas Girona y Portelles, obtenido por reclasificación de las tres capas de información antes mencionadas mediante técnicas SIG

3. Ponderación areal de los resultados obtenidos

Finalmente, los valores promedios del umbral de escorrentía para cada una de las subcuencas que conforman el sistema se ha obtenido de forma automática con el SIG, promediando arealmente los valores del umbral de escorrentía a cada una de las celdas pertenecientes a cada subcuenca. Los resultados para cada subcuenca son los que se muestran en la siguiente tabla.

SUBCUENCA	P_0 (mm)
SC1	32.4
IC1	33.9
IC2	30.4
SCP	29.3

Tabla 2.6. Valores del umbral de escorrentía promedio para cada subcuenca del sistema hidrológico. En condiciones previas medias de humedad del complejo suelo – vegetación (P_0 tipo II)

2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PLUVIOMETRÍA EXTREMA

En este apartado se lleva a cabo el análisis estadístico de la frecuencia de las precipitaciones diarias máximas anuales registradas en diferentes estaciones pluviométricas. El objetivo consiste en la obtención de las funciones estadísticas que mejor estimen los cuantiles de precipitación correspondientes a varios periodos de retorno, los cuales serán empleados para la elaboración de las tormentas de diseño, a introducir posteriormente en el modelo de transformación de lluvia en escorrentía (apartado 2.4).

Para llevar a cabo el análisis estadístico se ha empleado la información de series de precipitación diaria máxima mensual para un conjunto de estaciones a lo largo de unos años. Las series se encuentran sin actualizar, todas ellas hasta 1996, obtenidas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), constituyendo la fuente de información histórica más representativa y completa para establecer las relaciones entre precipitaciones máximas estimadas y periodos de retorno.

Posteriormente las series han sido transformadas a series de máximos anuales con el criterio que se expondrá con posterioridad en el presente apartado, y se ha procedido a su análisis estadístico.

Las estaciones de la AEMET inicialmente consideradas han sido aquellas que se ubican en el interior de las cuencas objeto de estudio, o bien, en las proximidades de su divisoria de aguas; siendo éstas, las siguientes:

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	COORDENADAS UTM		ALTITUD (msnm)	AÑOS COMPLETOS
		X	Y		
8043	BENISSA CONVENTO	764780	4289815	210	35
8046	JALÓN	759620	4292415	189	39
8051U	DENIA HS	768670	4303530	15	20
8054	VALL DE LAGUARD FONTILLES	752980	4295905	250	29
8056	EL VERGER RACONS	761425	4303595	21	33
8057A	PEGO CONVENTO	749850	4303215	82	26
8066	ALMUDAINA	729853	4293724	586	32
8067	PANTANO DE BENIARRÉS	729675	4299825	296	26

Tabla 2.7. Estaciones pluviométricas de la AEMET inicialmente consideradas

NOMBRE ESTACIÓN	TÉRMINO MUNICIPAL	PROVINCIA
BENISSA CONVENTO	BENISSA	ALICANTE
JALÓN	JALÓN	ALICANTE
DENIA HS	DENIA	ALICANTE
VALL DE LAGUARD FONTILLES	VALL DE LAGUART	ALICANTE
EL VERGER RACONS	VERGER	ALICANTE
PEGO CONVENTO	PEGO	ALICANTE
ALMUDAINA	ALICANTE	ALICANTE
PANTANO DE BENIARRÉS	-	ALICANTE

Tabla 2.8. Términos municipales en los que se encuentran las diferentes estaciones pluviométricas

Finalmente, atendiendo a los criterios de localización en planta de las estaciones relativa al sistema hidrológico, altitud sobre el nivel del mar en relación a las altitudes estadísticamente representativas del sistema hidrológico y número de años completos (indicador de la longitud efectiva de la serie de cara al análisis estadístico posterior), se han escogido las siguientes:

- Vall de Laguart Fontilles
- El Verger Racons
- Pego Convento
- Almudaina

La siguiente figura muestra la ubicación de las estaciones finalmente seleccionadas en relación al sistema hidrológico analizado.



Figura 2.8. Mapa con la ubicación de las estaciones pluviométricas escogidas en el sistema

Debido a la longitud de las series históricas, existe una importante incertidumbre en cuanto a la estimación de los cuantiles de periodo de retorno elevado, lo que justifica el contraste de diversas funciones estadísticas de distribución de distinto origen y número de parámetros requeridos, así como el empleo de otras herramientas como el análisis regional, que permitan incrementar la longitud de la serie. Con ello no se eliminaría la incertidumbre, aunque sí se vería cuantificada a la hora de realizar los posteriores cálculos hidrometeorológicos para la obtención de los caudales pico de crecida a partir de los valores de los cuantiles de precipitación.

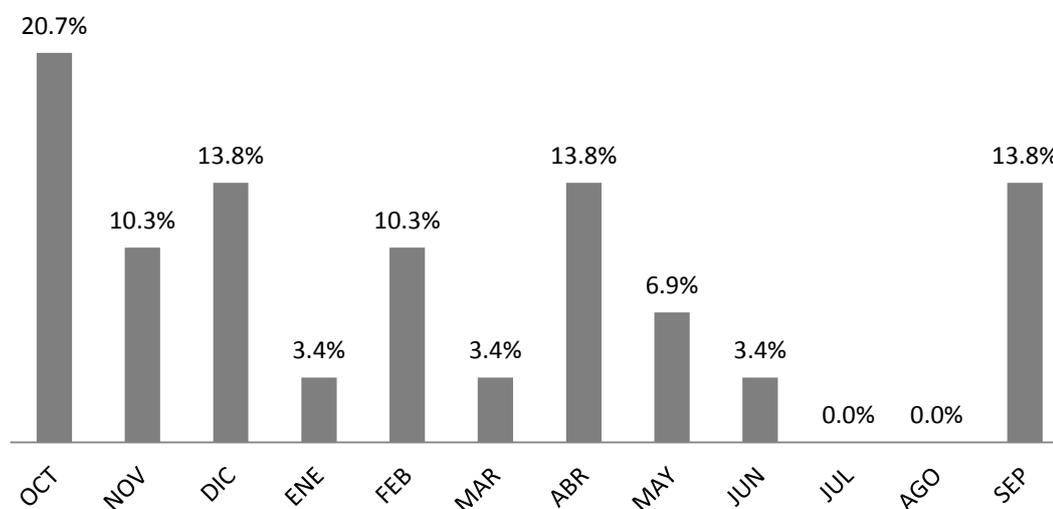
2.3.1. ANÁLISIS DE LA PLUVIOMETRÍA DISPONIBLE

Como se deriva del mapa anterior, las estaciones de Pego Convento y El Verger Racons son las ubicadas más próximas a la costa y serán las que, 'a priori' cabe esperar presenten mayor torrencialidad. Por su parte, las estaciones de Vall de Laguart Fontilles y Almudaina las que presentan una mayor altitud y se encuentran más al interior, siendo ésta última la localizada más al Oeste del sistema.

Considerando el conjunto de las estaciones analizadas se dispone de registro histórico hasta 1996: Vall de Laguart Fontilles (desde 1961 hasta 1996), El Verger Racons (desde 1954 hasta 1996), Pego Convento (desde 1967 hasta 1996) y Almudaina (desde 1952 hasta 1996).

Finalmente se cuenta con un total de 44 años disponibles para el análisis, a lo largo de los cuales se registraron 29 años completos en Vall de Laguart Fontilles, 33 en El Verger Racons, 26 en Pego Convento y 32 en Almudaina. Estos 120 años con registros en todos los meses han sido empleados para evaluar la probabilidad de ocurrencia del máximo anual en ellos, con los resultados que se muestran en las siguientes gráficas para cada una de las estaciones pluviométricas analizadas:

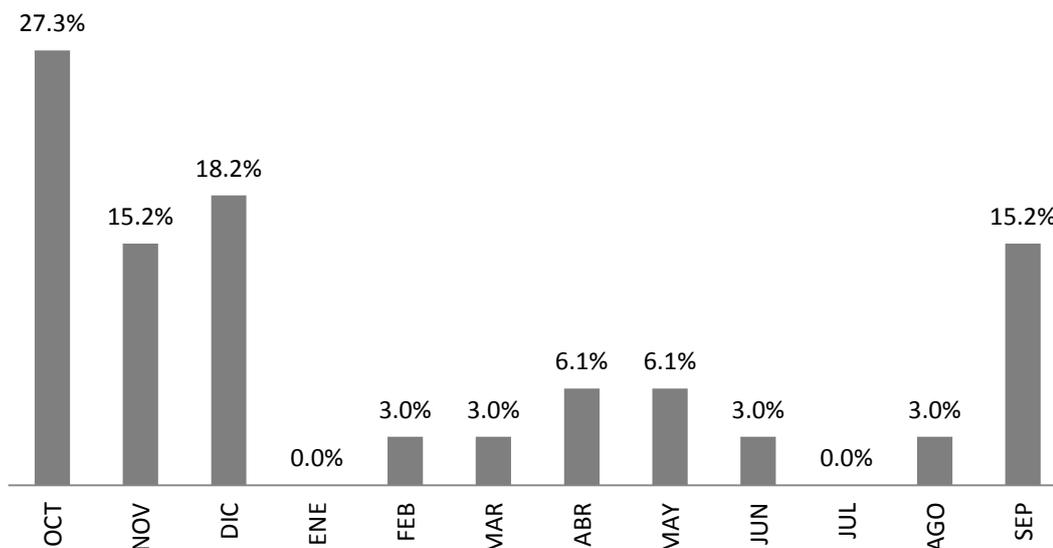
VALL DE LAGUART FONTILLES



Gráfica 2.1. Probabilidades (expresadas en %) para cada mes de presentación de la precipitación máxima anual en la estación Vall de Laguart Fontilles

Los meses con mayor probabilidad de presentar el máximo anual de precipitación son septiembre, octubre, diciembre y marzo, siendo octubre el que presenta la probabilidad más alta. Los meses de probabilidad más baja son los de verano julio y agosto.

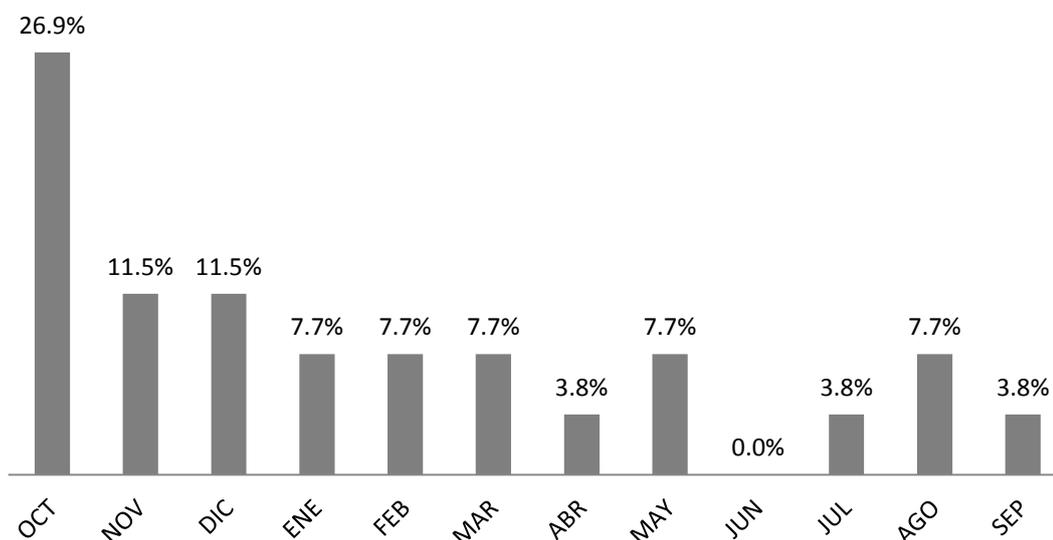
EL VERGER RACONS



Gráfica 2.2. Probabilidades (expresadas en %) para cada mes de presentación de la precipitación máxima anual en la estación El Verger Racons

Los meses con mayor probabilidad de presentar el máximo anual son de septiembre a diciembre (ambos incluidos), mientras que los meses de verano e invierno presentan la probabilidad más baja.

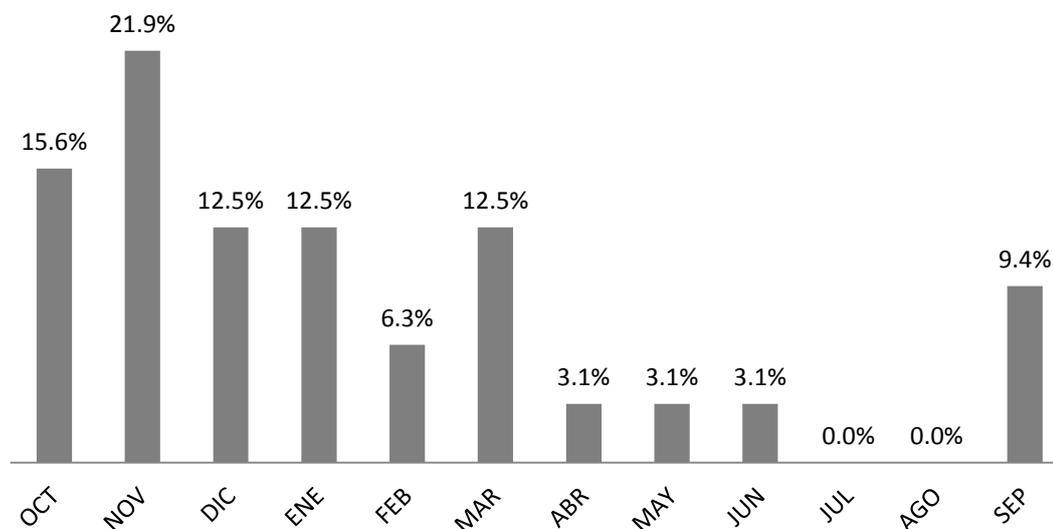
PEGO CONVENTO



Gráfica 2.3. Probabilidades (expresadas en %) para cada mes de presentación de la precipitación máxima anual en la estación Pego Convento

En esta estación el mes más probable de ocurrencia del máximo anual es octubre, el cual destaca por encima del resto. Le siguen en probabilidad los meses de noviembre y diciembre, siendo nuevamente los de verano y, en este caso, abril y septiembre, los que presentan una probabilidad menor.

ALMUDAINA



Gráfica 2.4. Probabilidades (expresadas en %) para cada mes de presentación de la precipitación máxima anual en la estación Almudaina

Los meses con una probabilidad mayor de presentar el máximo anual para la zona en la que se encuentra esta estación son de octubre a enero (noviembre con mayor probabilidad), siendo también importante el mes de marzo. Los meses de verano vuelven a ser los que menor probabilidad presentan, siendo tanto en julio como en agosto nula.

Con estas premisas, se ha pasado a la generación de las series de máximos anuales, incluyendo en ellas todos los años completos y descartando, para cada estación, aquellos años de los incompletos que no cumplan alguno de los siguientes criterios:

- No presentar ningún registro vacío en aquellos meses con mayor probabilidad de ocurrencia del máximo anual de precipitación para cada estación
- No presentar más de 3 meses sin registro de precipitación

La siguiente tabla recoge las series de máximos anuales finalmente consideradas para el análisis estadístico, siendo la de mayor longitud la de El Verger Racons con un total de 39 años válidos.

	VALL DE LAGUART FONTILLES	EL VERGER RACONS	PEGO CONVENTO	ALMUDAINA
1952-53				
1953-54				
1954-55		60		
1955-56		99		128
1956-57		61		
1957-58		298		
1958-59		176		
1959-60		119		
1960-61		81		25
1961-62		220		
1962-63	70	65		
1963-64		83		
1964-65	150	73		49
1965-66	182	127		88
1966-67	130	305		118
1967-68	81	114	105	56
1968-69	253	136		102.5
1969-70	101	102	180	170.5
1970-71	52.1	60	61.5	101.5
1971-72	237	218	173	147
1972-73	187	213	216	128.8
1973-74	171	112.5	104	130
1974-75	148	89		65.3
1975-76	78	105.5	103	55.3
1976-77	105	90		85.5
1977-78	39	42	54	45
1978-79	62	69.5	54	60.1
1979-80	133	126	95.5	131.7
1980-81	74	135.4	108.2	96.4
1981-82	82	80.5	50	79.3
1982-83	92	44	69.2	130.5
1983-84	49	40.2	41.8	28.9
1984-85	117	78.6	122	119.5
1985-86	175	147.2	249	204
1986-87	143	51.6	73	166.4
1987-88	141	299	371.5	180
1988-89	144	242.3	142.9	88.2
1989-90	95		100.7	78.5
1990-91	128	105.6	65.8	81.9
1991-92	120		128.9	104.5
1992-93	113	71.8	123	240.5
1993-94	96	113	118.7	100.2
1994-95	52		62.8	60.5
1995-96	157	197.4	186	65.5

Tabla 2.9. Series de precipitación diaria máxima anual (Pd_{ma}, en mm) en las estaciones seleccionadas de la AEMET

La tabla siguiente muestra los estadísticos básicos de las cuatro series analizadas .

ESTADÍSTICO	VALL DE LAGUART FONTILLES	EL VERGER RACONS	PEGO CONVENTO	ALMUDAINA
Longitud	33	39	26	34
Máximo (mm)	253	305	371.5	240.5
Media (mm)	119.912	124.387	121.519	103.294
Desviación (mm)	51.974	73.251	73.882	49.503
Coef. Asimetría	0.656	1.203	1.802	0.799
Coef. Variación	0.433	0.589	0.608	0.479

Tabla 2.10. Estadísticos básicos de las estaciones de la AEMET

Tres de las cuatro estaciones (Vall de Laguart Fontilles, El Verger Racons y Pego Convento) presentan una media de precipitación similar en torno a los 120 mm, siendo Pego Convento la más asimétrica de las tres. Los valores medios en la estación de Almudaina son ligeramente inferiores, presentando una precipitación media en el entorno de 100 mm.

El coeficiente de variación es similar en las estaciones de Vall de Laguart Fontilles y en Almudaina (en el entorno de 0.45). Sin embargo, las otras dos estaciones presentan un coeficiente de variación sensiblemente superior, destacando el caso de la estación de Pego Convento, en la que tal valor se debe fundamentalmente al máximo correspondiente al año 1987-88, registrado en el mes de noviembre. Este valor extraordinario es el máximo histórico registrado en la zona con los datos disponibles y condiciona el posterior ajuste de los modelos estadísticos y los valores de los cuantiles finales. La credibilidad de este registro no debe ser motivo de preocupación alguna, puesto que se presenta en un mes de elevada probabilidad de presentar el máximo anual (noviembre, siendo el segundo de probabilidad más elevada, después de octubre, para esta estación). Además, la estación de El Verger Racons también presenta en la misma fecha un máximo cercano al de Pego Convento (siendo, en este caso, de 305 mm), lo que indica que no se encuentran pruebas que permitan desechar el máximo histórico, sino que es conveniente su consideración dentro del análisis por criterios de seguridad.

2.3.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA EMPLEADA

En este estudio se ha incluido en el análisis estadístico, además de ajustes locales para todas las estaciones, cuatro métodos de ajuste regional que se expondrán más adelante, en el apartado 2.3.2.5. Las funciones empleadas para la distribución de máximos locales han sido las siguientes: Gumbel y SQRT-ETmax, de 2 parámetros, *General Extreme Value* (en adelante, GEV), de 3 parámetros y *Two Component Extreme Value* (en adelante, TCEV), de 4 parámetros. El método de ajuste empleado ha sido el de Máxima Verosimilitud (en adelante, ML), considerado consistente, suficiente y asintóticamente no sesgado, siendo además en términos generales el método más eficiente cuando se analizan muestras asintóticamente largas, como ocurre en este estudio. Se presentan a continuación una serie de excepciones:

- En el caso de la función Gumbel, dada la relevante sensibilidad de sus parámetros respecto del modelo de ajuste, se han contrastado los resultados obtenidos por ML con el método de los Momentos (en adelante, MOM).
- La función de distribución GEV obtenida por ML, también ha sido comparada con la obtenida por el método MOM.
- En cuanto a la función SQRT-ETmax, el método ML ha sido el empleado. En 1995, Ferrer y Ardiles emplearon dicho método analizando las lluvias máximas en España, por lo que se ha incluido también el ajuste utilizando las aproximaciones polinómicas recogidas en la tesis doctoral de Ferrer (1996), dados los excelentes resultados obtenidos.

A continuación se muestran los fundamentos teóricos de cada uno de los modelos empleados.

2.3.2.1. Función de distribución teórica Gumbel

Introducida por Gumbel (1942), es la función de distribución de extremos de uso más extendido en estudios hidrológicos. Su expresión analítica viene dada por la siguiente fórmula:

$$F_x(x) = \exp[-\lambda \cdot \exp(-\theta \cdot x)]$$

donde x es el valor de la variable aleatoria, $F(x)$ es la probabilidad de no excedencia del valor x un año cualquiera, y λ y θ son parámetros de la distribución. Concretamente, el parámetro λ está relacionado con la varianza de la población, y puede ser considerado como un parámetro de dispersión, mientras que θ , con las mismas unidades que x , es un parámetro de localización.

2.3.2.2. Función de distribución teórica SQRT-ETmax

Esta función de distribución de máximos (*Square-Root Exponential Type Distribution of the Maximum*) tiene, al igual que la distribución de Gumbel, dos parámetros, y fue introducida por Etoh, Murota y Nakanishi (1987). Su expresión analítica es la que se muestra a continuación:

$$F(x) = \exp \left[k \left(1 + \sqrt{\alpha x} \right) \exp \left(-\sqrt{\alpha x} \right) \right]$$

donde nuevamente x representa el valor de la variable aleatoria y $F(x)$ es la probabilidad de que no se supere el valor x en un año, mientras que k y α son los parámetros de la distribución. El cuantil asociado a un periodo de retorno dado se obtiene numéricamente, invirtiendo la función $F(x)$ y sustituyendo F por $1-1/T$.

2.3.2.3. Función de distribución teórica GEV

La función de distribución GEV fue desarrollada por Jenkinson (1955, 1969). Su teoría y condiciones de aplicabilidad en el análisis de máximas precipitaciones fueron objeto de una completa revisión con motivo de la elaboración del *Flood Studies Report* (NERC, 1975).

Esta función de distribución de máximos tiene 3 parámetros, dotándola de una mayor capacidad para la reproducción de casuísticas con presencia de “*outliers*” asociados a episodios de carácter extraordinario, y por lo tanto de sesgos mucho mayores en la distribución muestral; para tales casos, la distribución GEV se presenta como una posible candidata para una correcta caracterización estadística. La expresión analítica de la función de distribución GEV es la siguiente:

$$F_x(x) = \exp \left[- \left(1 - \beta \cdot \frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{1/\beta} \right]$$

donde x representa el valor de la variable aleatoria, y $F(x)$ es la probabilidad de que no se supere el valor x en un año; β , x_0 y α son parámetros de la distribución. El parámetro de forma de la distribución es β , y para $\beta = 0$, la función GEV degenera en la Gumbel (o también denominada distribución EV1). Para $\beta < 0$, la función sólo está definida para $x > x_0 + \alpha/\beta$, mientras que para $\beta > 0$ (caso menos frecuente), la función se define para valores de $x < x_0 + \alpha/\beta$.

2.3.2.4. Función de distribución teórica TCEV

Esta función tiene su origen, como indica su nombre (*Two Component Extreme Value*), en el reconocimiento de la existencia de variables aleatorias de interés ingenieril que surgen de efectos combinados de más de un proceso o variable física. Por ejemplo, modelación de puntas de velocidad de viento, distinguiéndose entre los máximos ordinarios y los producidos por el paso de un tornado. Rossi, Fiorentino y Versace (1984) la emplearon por primera vez en el contexto de aplicaciones en Hidrología de extremos, concretamente para la estimación de caudales máximos.

La distribución tiene cuatro parámetros, λ_1 , λ_2 , θ_1 y θ_2 , y la expresión de esta función de probabilidad acumulada es la que se muestra seguidamente:

$$F_x(x) = \exp \left[- \lambda_1 \cdot \exp(-\theta_1 \cdot x) - \lambda_2 \cdot \exp(-\theta_2 \cdot x) \right]$$

donde x es el valor de la variable aleatoria, $F(x)$ la probabilidad de no excedencia, y λ_1 , λ_2 y θ_1 , θ_2 son los parámetros de la función de distribución de probabilidad. La función no tiene inversa explícita, por lo que, una vez estimados los parámetros, el valor x asociado a un período de retorno debe ser obtenido por inversión numérica de la función, sustituyendo, como es habitual, F por $1-1/T$.

2.3.2.5. Ajustes regionales

Además de los ajustes locales con las funciones de distribución ya descritas, se han incluido cuatro metodologías de ajuste regional, como ya se han indicado al comienzo de este apartado.

2.3.2.5.1. Ajuste regional TCEV

Esta regionalización (Rossi y Fiorentino, 1984) está basada en la función de distribución TCEV, y asume como hipótesis regional que la frecuencia de eventos extraordinarios es poco variable y la relación entre las magnitudes de los eventos ordinarios y extraordinarios es aproximadamente constante.

La regionalización, pues, se basa exclusivamente en los máximos ordinarios, con lo que la serie regional se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Y_k = \vartheta_{i,1} X_{i,1} - \ln \lambda_{i,1} \quad \text{con } k = ij$$

La distribución en la región, por tanto, resulta:

$$F_x(x) = \exp[-\lambda'_1 \exp(-\vartheta'_1 x) - \lambda'_2 \exp(-\vartheta'_2 x)]$$

Con las siguientes relaciones de parámetros (fruto de las hipótesis de regionalización):

$$\vartheta'_1 = \lambda'_1 = 1$$

$$\vartheta'_2 = \vartheta_2 / \vartheta_1$$

$$\lambda'_2 = \lambda_2 / \lambda_1^{\vartheta'_2}$$

En definitiva, la metodología a seguir para implementar esta regionalización sigue la siguiente secuencia:

1. Selección de los eventos ordinarios en estación i
2. Estimación local de parámetros ordinarios ajustando una Gumbel: $\lambda_{i,1}, \vartheta_{i,1}$
3. Regionalización de todos los datos de todas las estaciones, obteniendo la serie Y
4. Estimación de parámetros regionales ajustando una TCEV: $\lambda'_1, \vartheta'_1, \lambda'_2, \vartheta'_2$
5. Cálculo del cuantil regional: Y_T
6. Obtención del cuantil local en cada estación ($X_{i,T}$) desregionalizando a partir de Y_T :

$$X_{i,T} = \frac{Y_T + \ln \lambda_{i,1}}{\vartheta_{i,1}}$$

2.3.2.5.2. Ajuste regional CEH

Esta metodología parte del estudio regional con la función de distribución SQRT-ETmax del CEH (Ministerio de Fomento, 1999), basado en la tesis doctoral de Ferrer (1996), considerado uno de los mejores estudios disponibles en España.

Las regiones se obtuvieron con criterios climáticos y de homogeneidad estadística, resultando un total de 26 para toda España, encontrándose la Comunidad Valenciana en su mayor parte en la región 8 junto a las provincias de Murcia y Almería. Para cada región, el valor de la precipitación máxima anual media en cada punto se obtiene a partir de una interpolación espacial, asumiendo un variograma independiente para cada región. Después de estandarizar las series con su media, estimaron el coeficiente de variación regional, aplicando un suavizado en los límites entre las regiones.

El resultado final de este estudio regional se traduce en una serie de mapas de isolíneas de media y coeficiente de variación (recogidos en la citada publicación del Ministerio de Fomento), a partir de los cuales pueden interpolarse, en cualquier punto del territorio peninsular español, los valores de ambos estadísticos y, a partir de ellos, obtener los parámetros de la función de distribución de probabilidad SQRT-ETmax.

2.3.2.5.3. Ajuste regional CEH corregido (CEH')

En el presente análisis estadístico, se ha incluido una metodología de análisis regional propuesta por el DIHMA. Este método está basado en una importante limitación presente en el estudio de Ferrer, empleado en el ajuste regional CEH (2.3.2.5.2 - apartado anterior): las series de precipitación diaria máxima anual de las estaciones del INM utilizadas finalizan en 1992. Si bien ello no afecta de manera significativa al coeficiente de variación, sí resulta conveniente confirmar el valor de la media de precipitación diaria a partir de las series disponibles en la zona de estudio.

De esta forma, el método empleado (CEH') consiste en el ajuste de la función de distribución SQRT-ETmax a partir del coeficiente de variación regional del estudio de Ferrer para la localización correspondiente a la zona de estudio y la media local de la serie que se pretende analizar.

2.3.2.5.4. Ajuste regional INDEX FLOOD

Originalmente desarrollado por Dalrympe en 1960 para caudales, el método se fundamenta en asumir que las distribuciones de las avenidas en distintos puntos de una región son las mismas, pero con un efecto de escala (*INDEX FLOOD*), que refleja la variabilidad en las precipitaciones y el tamaño característico de cada cuenca. La regionalización, por tanto, sigue la siguiente expresión:

$$Y_k = \frac{X_{i,j}}{I_i} \quad \text{con } k = ij$$

Siendo frecuente el empleo de la media como parámetro de escala ($I_i = \bar{X}_i$). En tal caso, se asume un coeficiente de variación constante en la región:

$$\eta_x = \frac{\sqrt{E[(X - \mu_x)^2]}}{\mu_x} = \sqrt{\frac{1}{\mu_x^2} E[(X - \mu_x)^2]} = \sqrt{E\left[\left(\frac{X}{\mu_x} - 1\right)^2\right]} = \eta_y$$

El método requiere de los siguientes pasos:

1. Regionalización de los datos de todas las estaciones (serie Y)
2. Contraste de diferentes modelos estadísticos a la serie regional Y
3. Selección del mejor modelo estadístico para la serie regional Y
4. Cálculo del cuantil regional Y_T
5. Desregionalización de Y_T para obtener finalmente los cuantiles locales en una estación ($X_{i,T} = Y_T \cdot \bar{X}_i$)

Evidentemente, otra alternativa es la desregionalización en parámetros y la estimación directa de los cuantiles a partir de la función desregionalizada.

2.3.3. RESULTADOS: CUANTILES DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL EN LAS ESTACIONES

Los modelos estadísticos empleados para el ajuste de las series de Pd máxima anual para cada una de las estaciones han sido los siguientes:

- **Gumbel MOM**: ajuste local por Momentos de la función de distribución Gumbel
- **Gumbel ML**: ajuste local por Máxima Verosimilitud de la función de distribución Gumbel
- **SQRT-ETmax ML**: ajuste local por Momentos de la función de distribución SQRT-ETmax
- **GEV MOM**: ajuste local por Momentos de la función de distribución GEV
- **GEV ML**: ajuste local por Máxima Verosimilitud de la función de distribución GEV
- **TCEV ML**: ajuste local por Máxima Verosimilitud de la función de distribución TCEV
- **CEH**: ajuste con las aproximaciones polinómicas de Ferrer de la función de distribución SQRT-Etmax, a partir del coeficiente de variación regional y la media local del estudio del Centro de Estudio Hidrográficos
- **CEH'**: ajuste con las aproximaciones polinómicas de Ferrer de la función de distribución SQRT-Etmax, a partir del coeficiente de variación regional del estudio del Centro de Estudio Hidrográficos y la media local de la serie
- **RegTCEV**: ajuste regional haciendo uso de la distribución TCEV
- **INDEX FLOOD**: ajuste regional haciendo uso de la función de distribución GEV ML

Los resultados de los ajustes se muestran en la siguiente tabla de parámetros.

	VALL DE LAGUART FONTILLES	EL VERGER RACONS	PEGO CONVENTO	ALMUDAINA
GUMBEL MOM	$\lambda = 10.825$ $\theta = 0.025$	$\lambda = 4.956$ $\theta = 0.018$	$\lambda = 4.629$ $\theta = 0.017$	$\lambda = 8.158$ $\theta = 0.026$
GUMBEL ML	$\lambda = 9.688$ $\theta = 0.024$	$\lambda = 6.647$ $\theta = 0.020$	$\lambda = 7.027$ $\theta = 0.021$	$\lambda = 7.776$ $\theta = 0.025$
SQRT-Etmax ML	$k = 92.997$ $\alpha = 0.450$	$k = 21.650$ $\alpha = 0.261$	$k = 19.053$ $\alpha = 0.254$	$k = 54.996$ $\alpha = 0.442$
CEH	$k = 20.078$ $\alpha = 0.274$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.263$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.277$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.315$
CEH'	$k = 20.078$ $\alpha = 0.263$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.253$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.259$	$k = 20.078$ $\alpha = 0.305$
GEV MOM	$x_0 = 97.752$ $\alpha = 45.217$ $\beta = 0.096$	$x_0 = 91.285$ $\alpha = 56.318$ $\beta = -0.011$	$x_0 = 87.551$ $\alpha = 50.464$ $\beta = -0.089$	$x_0 = 81.737$ $\alpha = 41.674$ $\beta = 0.064$
GEV ML	$x_0 = 97.459$ $\alpha = 43.184$ $\beta = 0.067$	$x_0 = 85.685$ $\alpha = 41.665$ $\beta = -0.305$	$x_0 = 84.086$ $\alpha = 39.418$ $\beta = -0.320$	$x_0 = 81.442$ $\alpha = 39.815$ $\beta = 0.035$
TCEV ML	$\lambda_1 = 9.198$ $\theta_1 = 0.025$ $\lambda_2 = 0.993$ $\theta_2 = 0.017$	$\lambda_1 = 9$ $\theta_1 = 0.027$ $\lambda_2 = 0.657$ $\theta_2 = 0.011$	$\lambda_1 = 10.505$ $\theta_1 = 0.029$ $\lambda_2 = 0.543$ $\theta_2 = 0.011$	$\lambda_1 = 7.837$ $\theta_1 = 0.026$ $\lambda_2 = 0$ $\theta_2 = 0.004$
RegTCEV	$\lambda_1 = 9.919$ $\theta_1 = 0.024$ $\lambda_2 = 0$ $\theta_2 = 0.004$	$\lambda_1 = 6.771$ $\theta_1 = 0.021$ $\lambda_2 = 0$ $\theta_2 = 0.003$	$\lambda_1 = 7.163$ $\theta_1 = 0.022$ $\lambda_2 = 0$ $\theta_2 = 0.003$	$\lambda_1 = 7.938$ $\theta_1 = 0.026$ $\lambda_2 = 0$ $\theta_2 = 0.004$
INDEX FLOOD (GEV ML)	$x_0 = 89.454$ $\alpha = 43.168$ $\beta = -0.123$	$x_0 = 92.793$ $\alpha = 44.779$ $\beta = -0.123$	$x_0 = 90.653$ $\alpha = 43.747$ $\beta = -0.123$	$x_0 = 77.057$ $\alpha = 37.186$ $\beta = -0.123$

Tabla 2.11. Parámetros de los diferentes ajustes estadísticos para cada estación

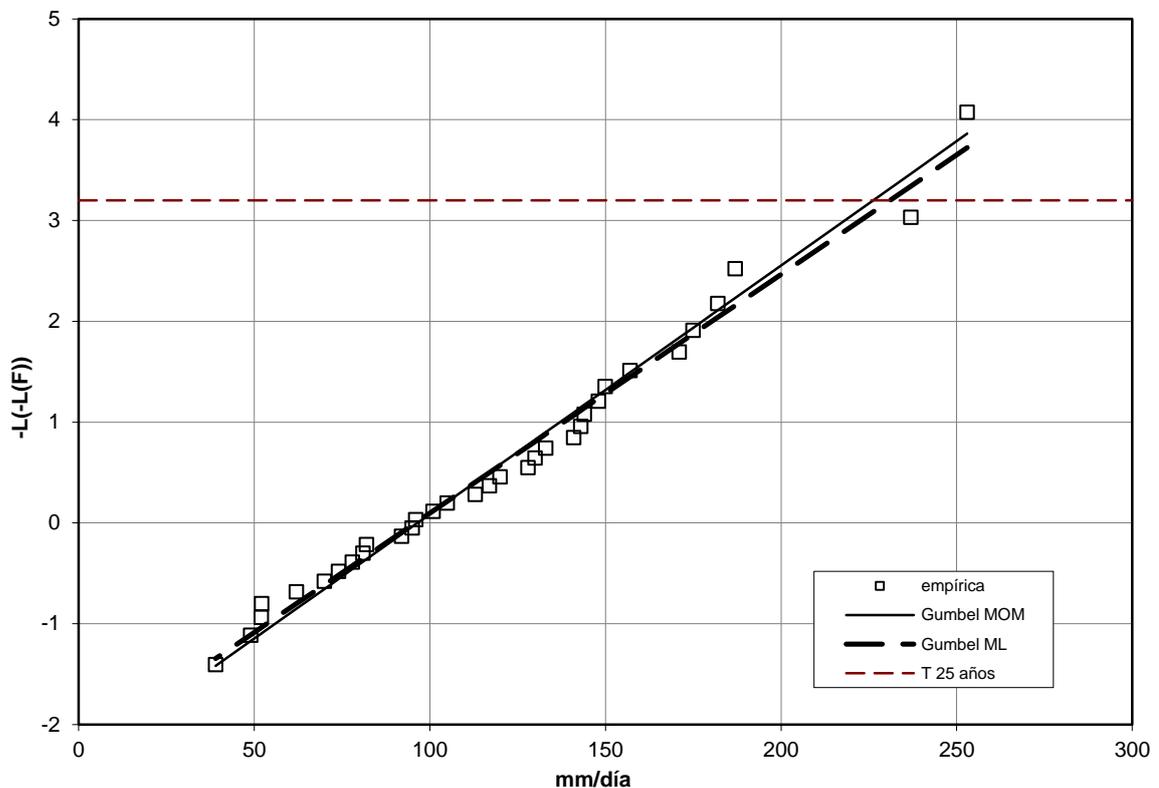
Para seleccionar el mejor modelo de distribución se ha evaluado su capacidad descriptiva global mediante ajustes gráficos, es decir, por comparación con la función de distribución empírica aplicada a los datos observados en las diferentes estaciones, estimada mediante la expresión de Cunnane (1978) con un valor de 0,44 para el coeficiente poblacional.

A continuación se muestran las oportunas discusiones que han permitido seleccionar el mejor modelo de ajuste estadístico para cada estación de datos pluviométricos.

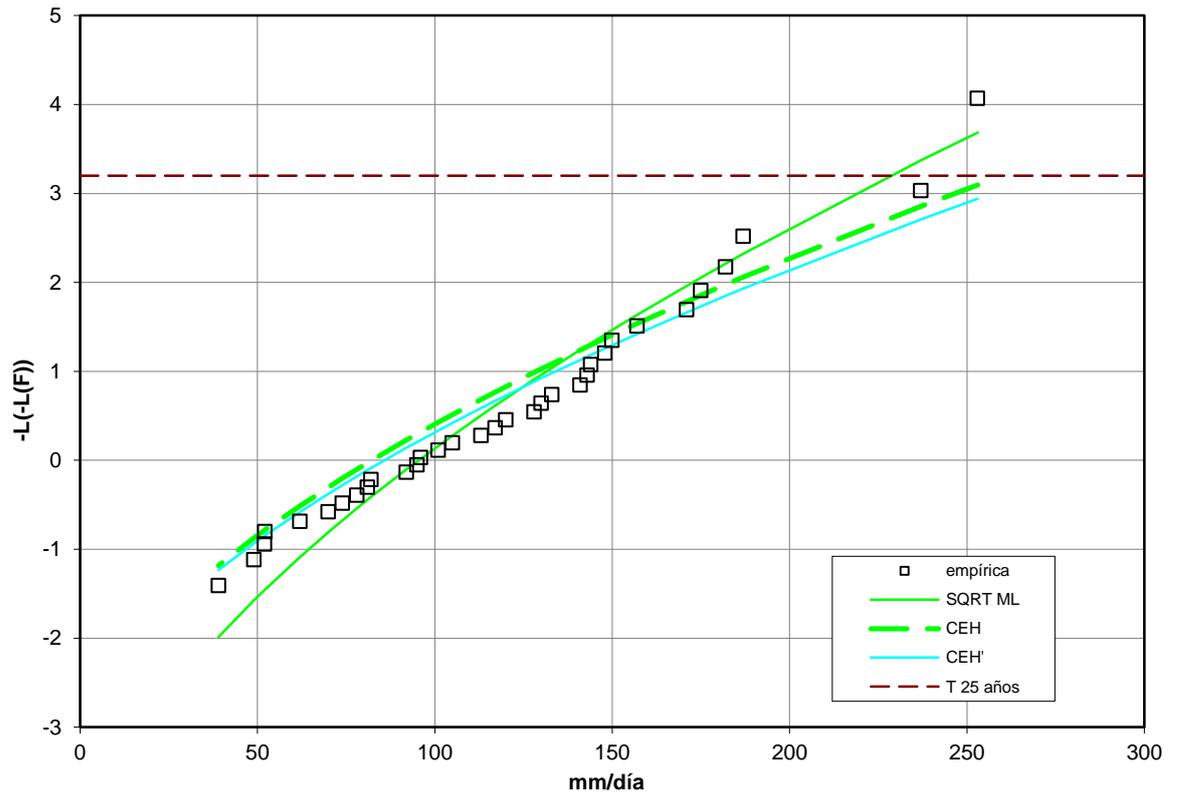
Estación Vall de Laguart Fontilles

Desde el punto de vista descriptivo se descartan los siguientes modelos estadísticos:

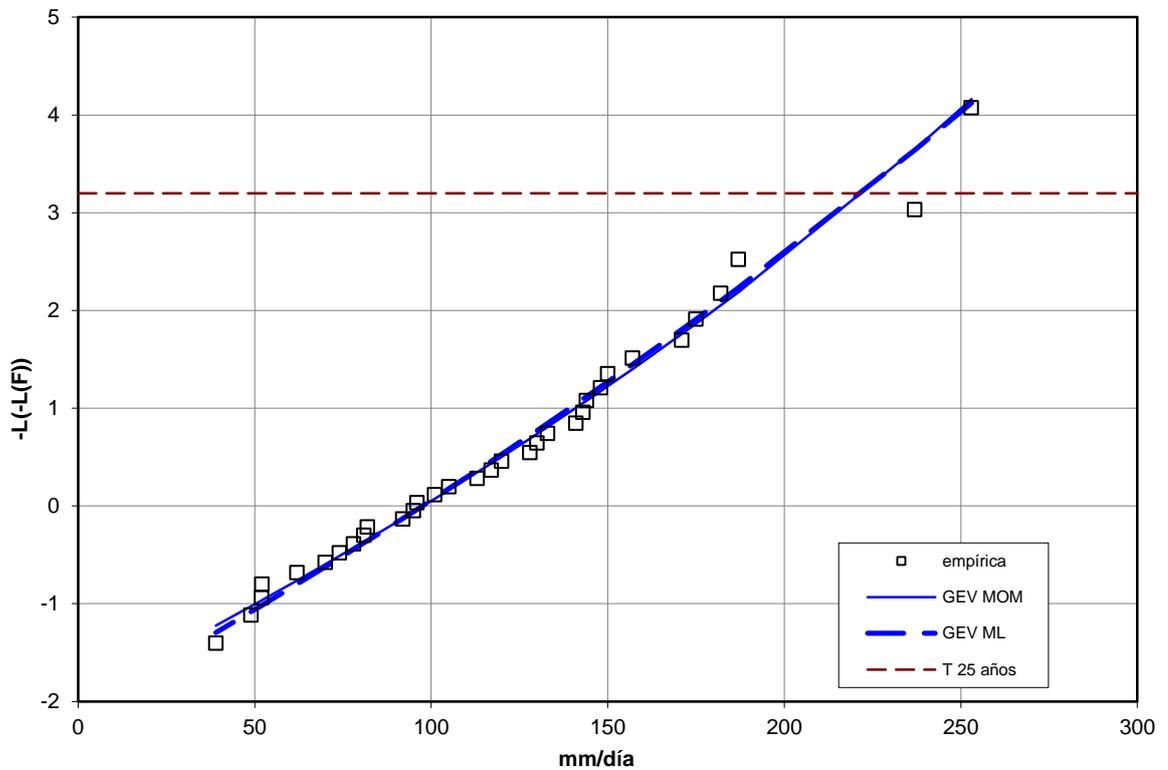
- Gumbel MOM: muestra un peor comportamiento en la cola inicial y final de la distribución empírica en relación a su comparación con la función de distribución Gumbel ML. (Gráfica 2.5)
- CEH: se ha escogido un coeficiente de variación regional de 0.6 (valor superior al que presenta la serie local) y una media de precipitación de 115 mm (relativamente similar a la de la serie local) del estudio de Ferrer. No obstante, se ha descartado este modelo por su comportamiento en el tramo final de la distribución en favor de la función SQRT-ETmax ML. (Gráfica 2.6)
- CEH': su comportamiento es similar al presentado por la función CEH, así como las razones para su descarte. (Gráfica 2.7)
- GEV ML: siendo su comportamiento prácticamente igual al mostrado por GEV MOM, se descarta por su ligera diferencia en el comportamiento inicial de la distribución, donde GEV MOM presenta un mejor comportamiento. (Gráfica 2.8)



Gráfica 2.5. Ajustes de la función de distribución Gumbel



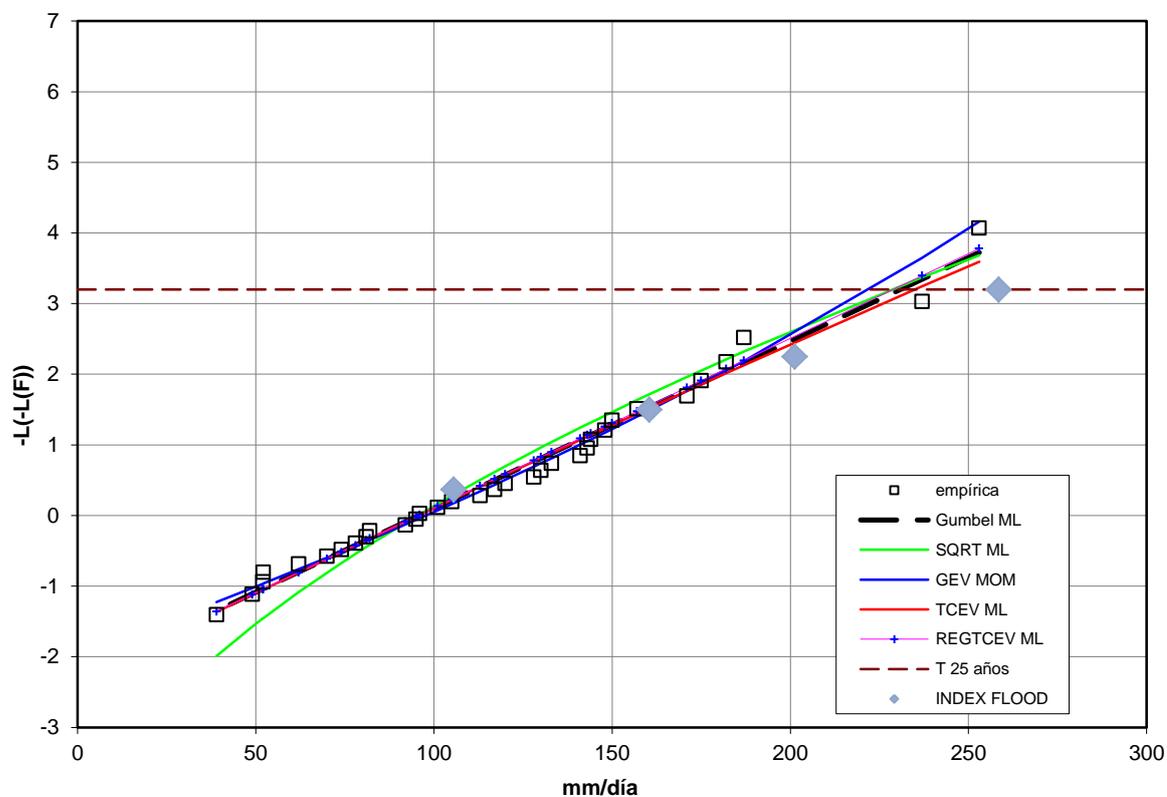
Gráfica 2.6. Ajustes de la función de distribución SQRT-ETmax



Gráfica 2.7. Ajustes de la función de distribución GEV

Finalmente, se escoge la función de distribución **Gumbel ML**, como la que mejor se ajusta a la serie empírica, siendo, a su vez, la más parsimoniosa, al emplear únicamente dos parámetros de ajuste.

La siguiente gráfica muestra las diferentes funciones de distribución finalmente consideradas.



Gráfica 2.8. Contraste de las diferentes funciones de distribución

Los cuantiles obtenidos para la estación Vall de Laguart Fontilles con la función de distribución Gumbel ML han sido, por lo tanto:

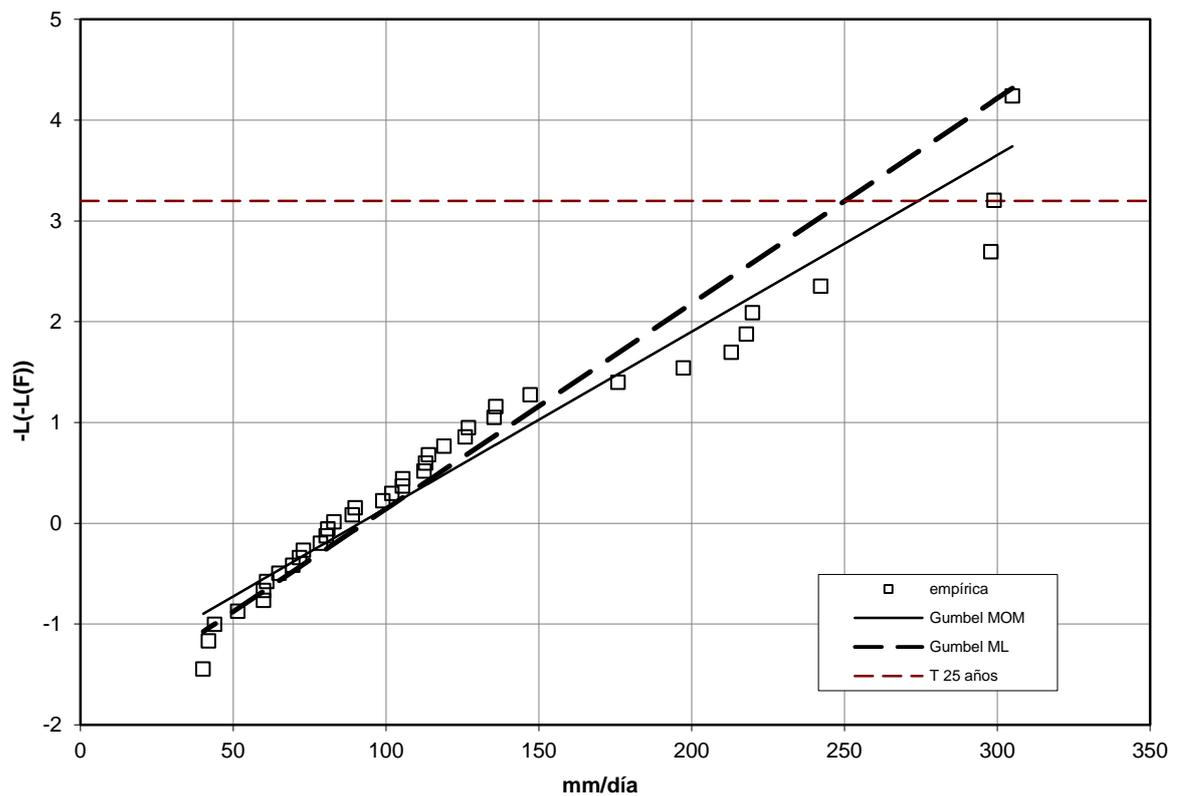
TR (años)	Cuantiles de Pd máxima anual (mm)
2	111.3
5	159.1
10	190.8
25	230.8
50	260.5
100	289.9
200	319.4
500	358

Tabla 2.12. Cuantiles de Pd máxima anual obtenidos en la estación Vall de Laguart Fontilles

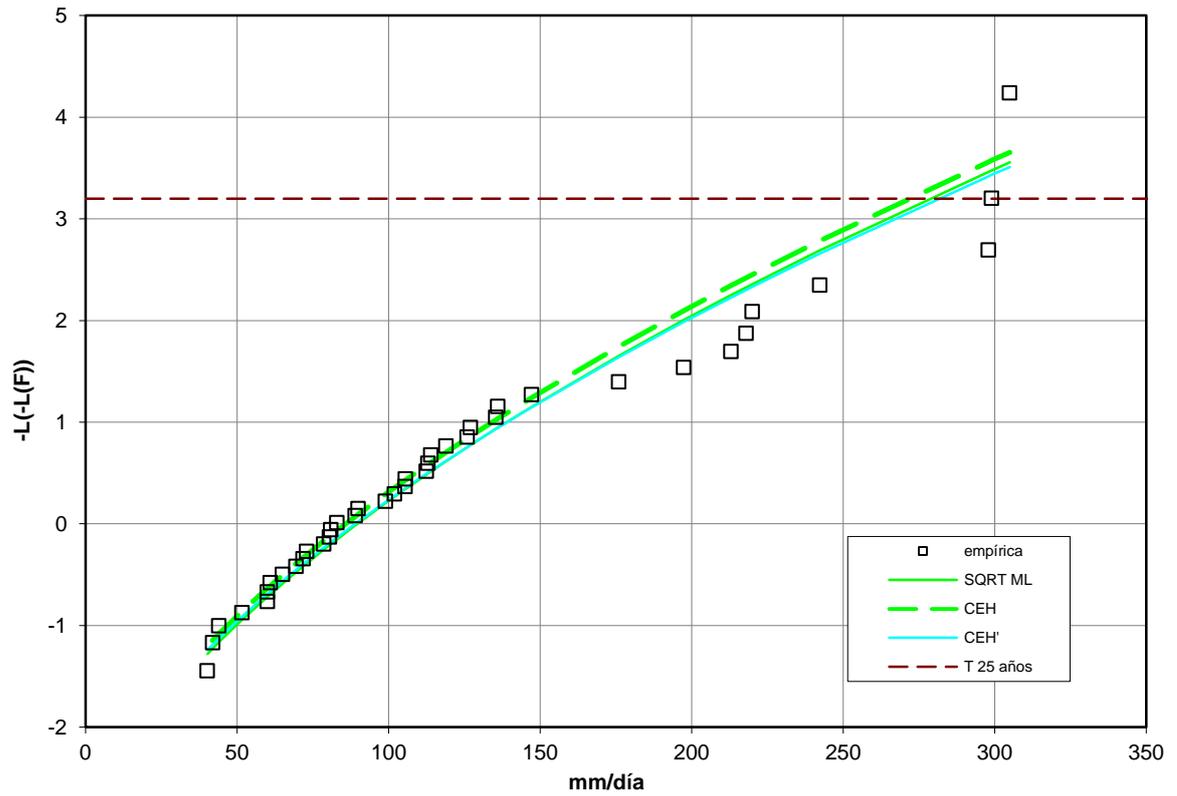
Estación El Verger Racons

Desde el punto de vista descriptivo se descartan los siguientes modelos estadísticos:

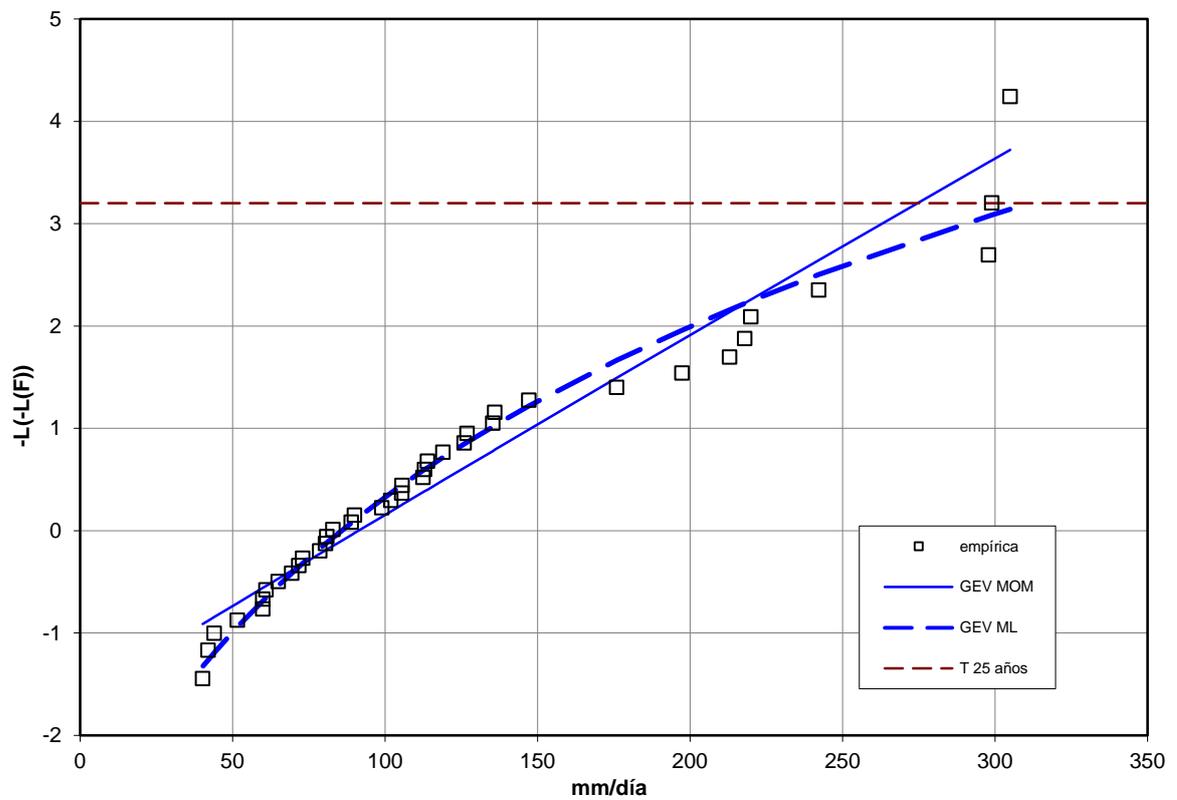
- Gumbel ML: tal y como se aprecia en la gráfica 2.9, su comportamiento en la cola final de la distribución empírica es menos ajustado que la función Gumbel MOM, infraestimando los cuantiles de precipitación más elevados.
- CEH: se ha escogido un coeficiente de variación regional de 0.6 y una media de precipitación de 120 mm del estudio de Ferrer, valores casi idénticos a los presentados por la serie local. Esto se traduce en una reducida diferencia respecto de las funciones de distribución SQRT-ETmax y CEH', encontrándose la función SQRT-ETmax ML en una zona intermedia de probabilidad ubicada en la región establecida entre las funciones CEH y CEH'. (Gráfica 2.10)
- CEH': ha sido descartada por los mismos criterios definidos para la función CEH. (Gráfica 2.11)
- GEV MOM: su tendencia recta no queda bien reflejada en comparación a la serie empírica, la cual muestra comportamientos curvos en las colas inicial y final de su distribución. (gráfica 2.12)



Gráfica 2.9. Ajustes de la función de distribución Gumbel

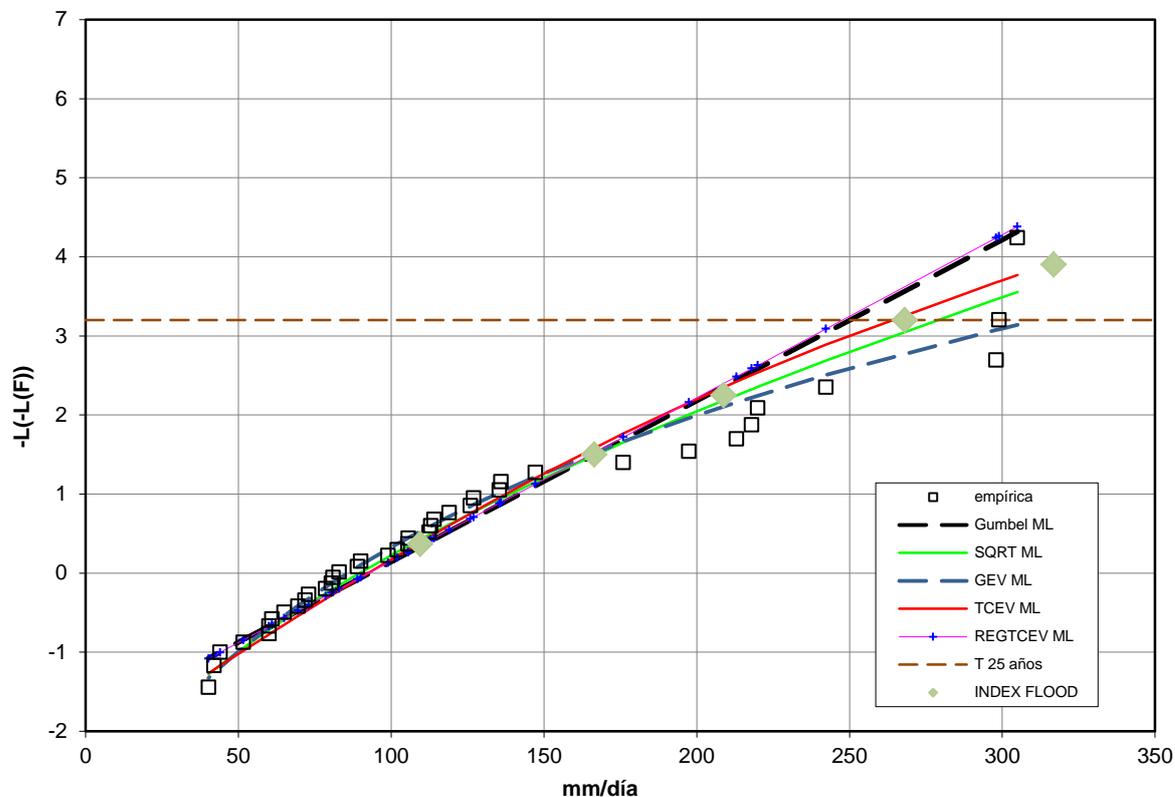


Gráfica 2.10. Ajustes de la función de distribución SQRT-ETmax



Gráfica 2.11. Ajustes de la función de distribución GEV

Se escoge finalmente la función de distribución SQRT-ETmáx ML al presentar un mejor comportamiento en la zona final de la distribución, pasando aproximadamente por una zona intermedia entre los tres valores de precipitación aparecidos cerca de los 300 mm.



Gráfica 2.12. Contraste de las diferentes funciones de distribución

Los cuantiles de precipitación para los diferentes periodos de retorno analizados finalmente obtenidos en la estación El Verger Racons haciendo uso de la función de distribución SQRT-ETmax ML, han sido:

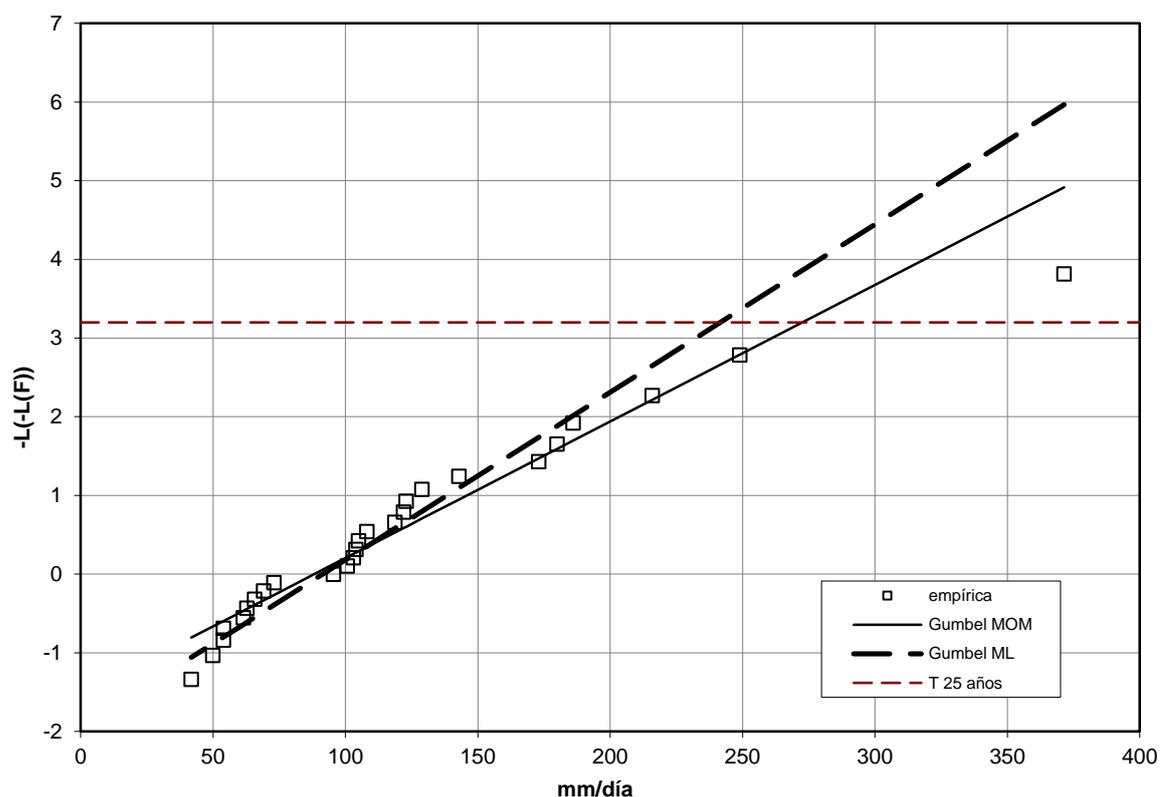
TR (años)	Cuantiles de Pd máxima anual (mm)
2	106.7
5	167
10	213.1
25	278.4
50	331.8
100	389
200	450.1
500	536.8

Tabla 2.13. Cuantiles de Pd máxima anual obtenidos en la estación El Verger Racons

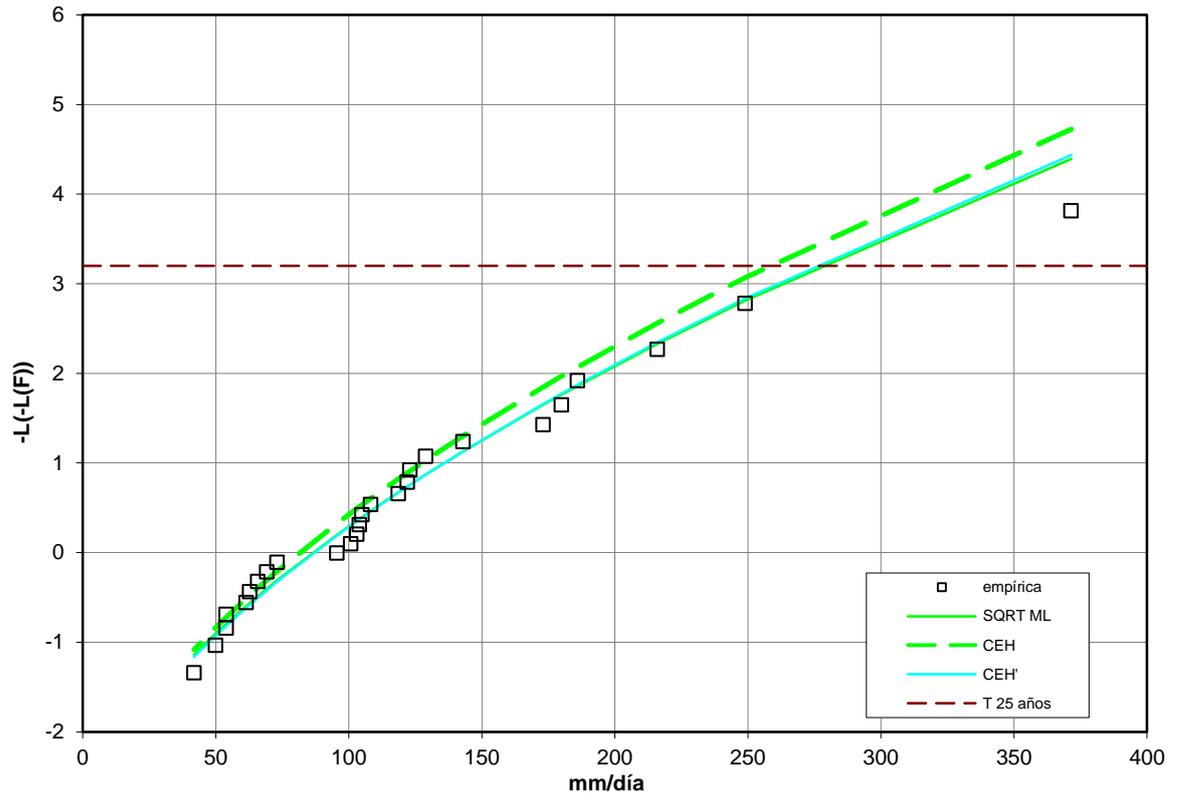
Estación Pego Convento

Desde el punto de vista descriptivo se descartan los siguientes modelos estadísticos:

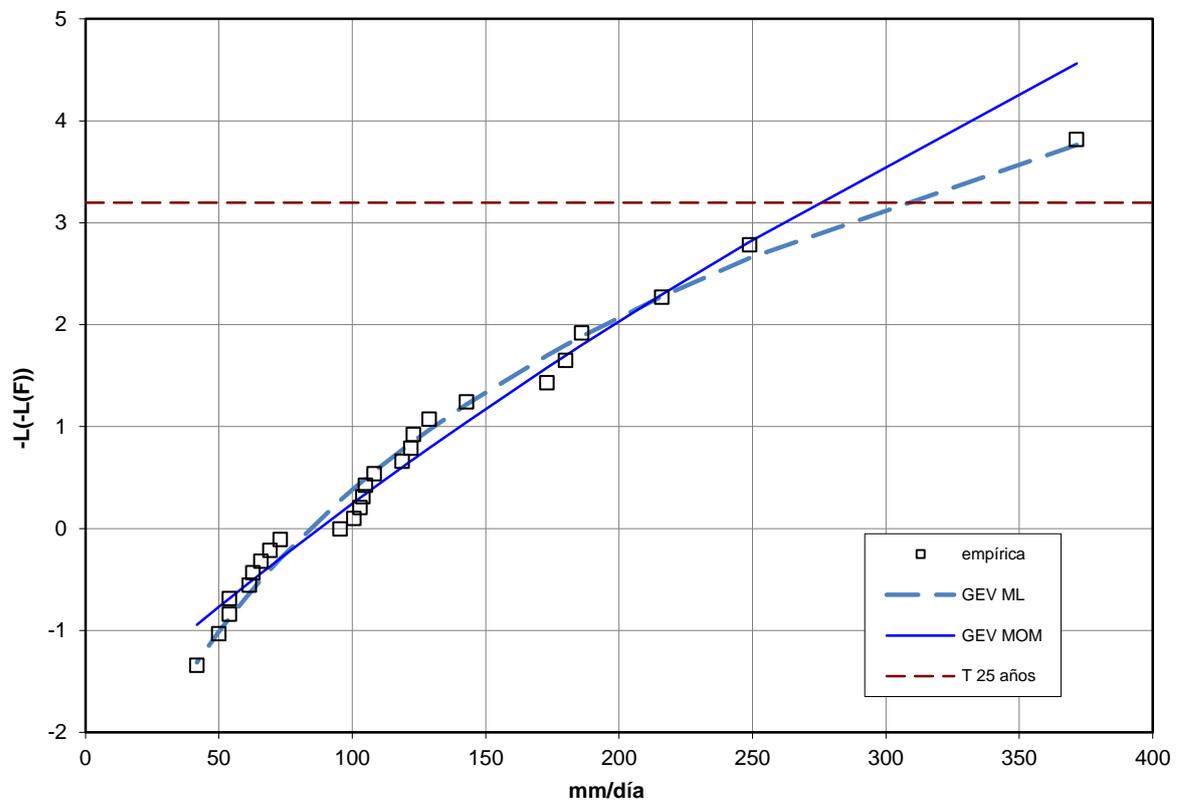
- Gumbel ML: se descarta por su elevada infraestimación de los cuantiles de precipitación superiores a los 200 mm, en favor de la función Gumbel MOM. (Gráfica 2.13)
- CEH: escogidos un coeficiente de variación de 0.6 (igual al de la serie local) y una media de precipitación de 114 mm (inferior a la serie local) se infraestiman los cuantiles superiores a los 150 mm, presentando un comportamiento menos ajustado en la cola final de la distribución que la función SQRT-ETmax ML. (Gráfica 2.14)
- CEH': siendo prácticamente idéntica a la función SQRT-ETmax ML debido a la semejanza de los coeficientes de variación, se descarta por una estimación ligeramente inferior de este en relación al presentado por la serie local que emplea SQRT-ETmax ML. (Gráfica 2.15)
- GEV MOM: la función de distribución GEV ML se ajusta de forma más adecuada a la aparente tendencia curva mostrada por la función de distribución empírica, valorando con más seguridad el dato de precipitación correspondiente a 371.5 mm. (Gráfica 2.16)



Gráfica 2.13. Ajustes de la función de distribución Gumbel

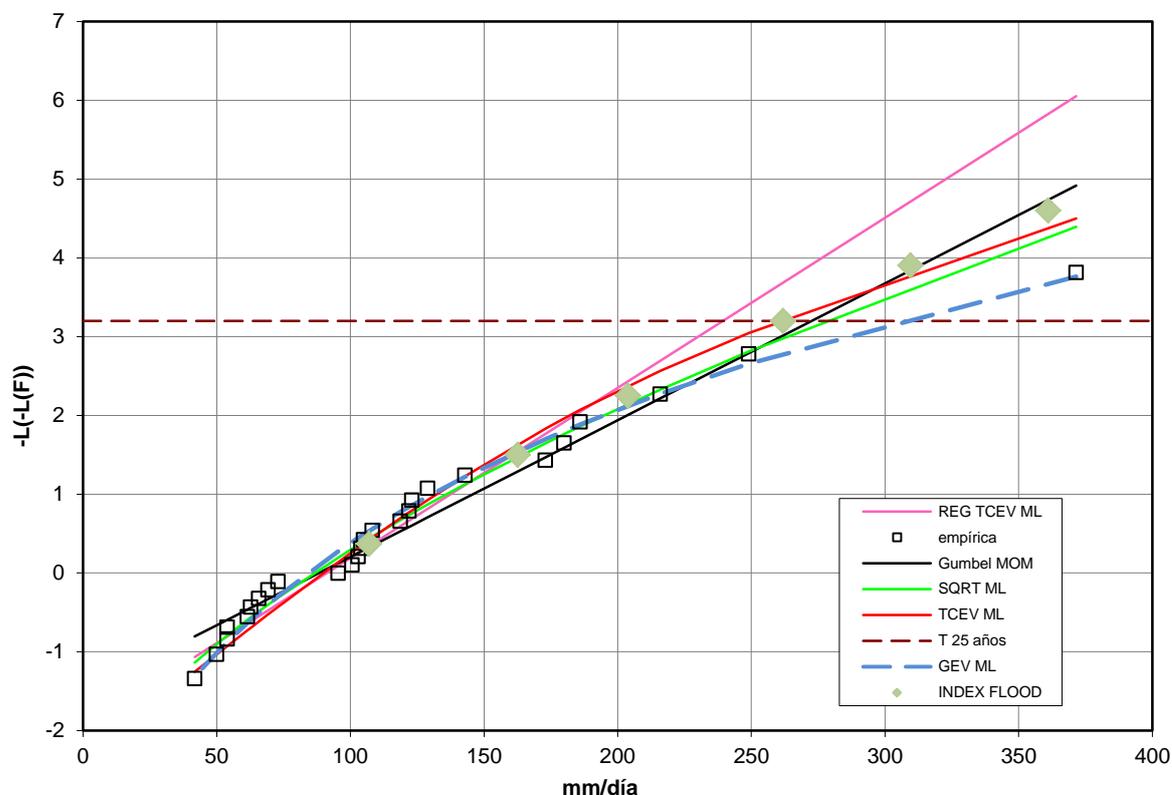


Gráfica 2.14. Ajustes de la función de distribución SQRT-ETmax



Gráfica 2.15. Ajustes de la función de distribución GEV

Se escoge como mejor modelo de distribución por su comparación con la serie empírica la función SQRT-ETmax ML, debido a su robustez en el ajuste correspondiente a la zona central de la distribución sin llegar a infraestimar de una forma alejada del lado de la seguridad el valor máximo de 371.5 mm.



Gráfica 2.16. Contraste de las diferentes funciones de distribución

Los cuantiles obtenidos mediante la función de distribución SQRT-ETmax ML para la estación Pego Convento son los que se muestran en la tabla siguiente:

TR (años)	Cuantiles de Pd máxima anual (mm)
2	103.5
5	164.2
10	210.8
25	276.9
50	331.1
100	389.1
200	451.2
500	539.4

Tabla 2.14. Cuantiles de Pd máxima anual obtenidos en la estación Pego Convento

Estación Almudaina

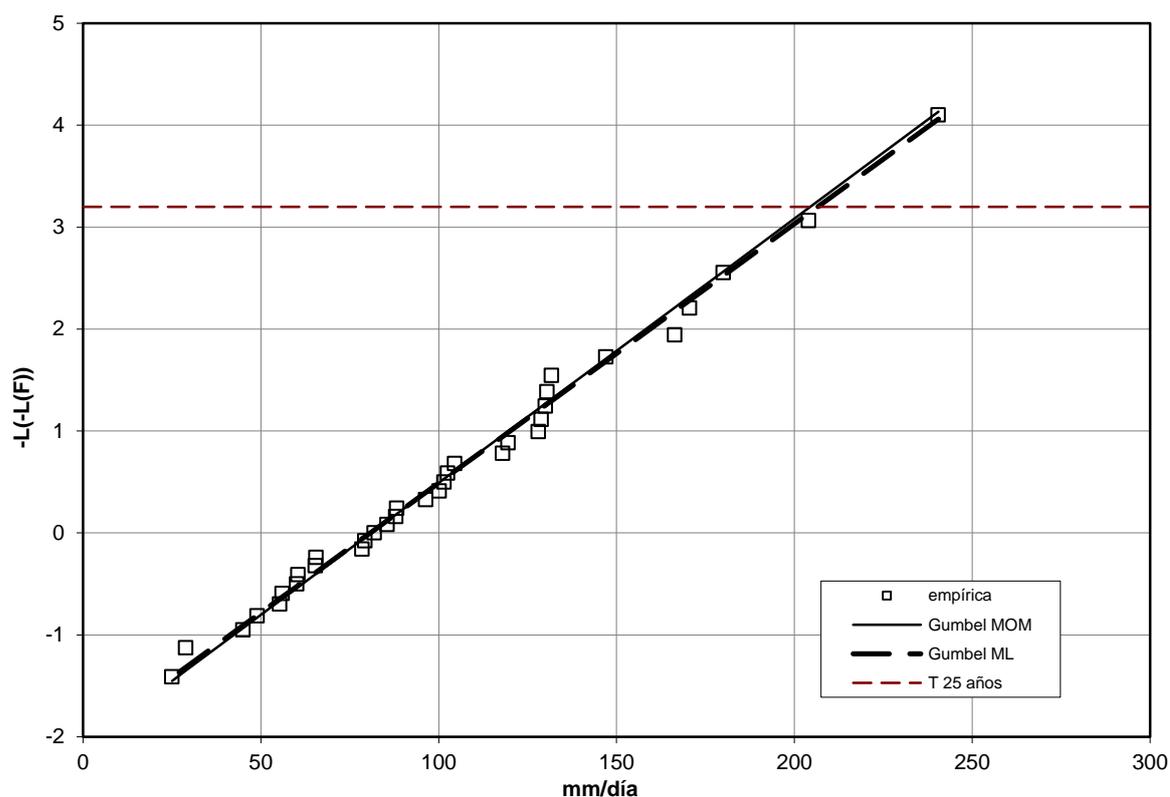
Desde el punto de vista descriptivo se descartan los siguientes modelos estadísticos:

Gumbel MOM: siendo tanto el método MOM como el ML de ajuste estadístico de similares resultados, se decide descartar el método MOM por infravalorar ligeramente los cuantiles de más elevado periodo de retorno. (Gráfica 2.17)

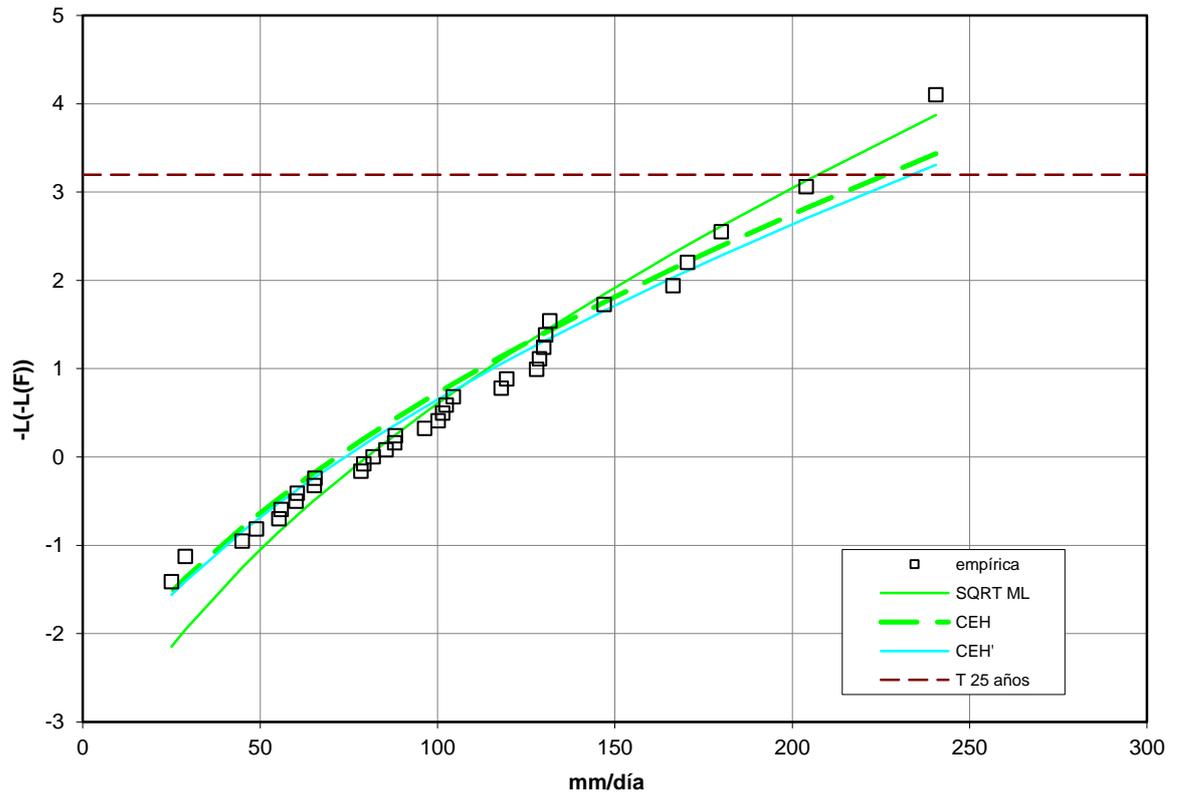
CEH: empleando como coeficiente de variación 0.6 (valor notablemente superior al coeficiente local de la serie) y media de precipitación de 100 mm (por los 103 mm correspondientes a la serie local) incorporados del estudio de Ferrer, se decide su descarte dado su desacertado comportamiento en la cola final de la distribución, sobrevalorando los cuantiles de periodo de retorno superior a 25 años. (Gráfica 2.18)

CEH': dada la similitud entre las medias de precipitación local de la serie y del estudio de Ferrer, el resultado gráfico de este método es similar al anterior, si bien, esa sobrevaloración de la precipitación para elevados periodos de retorno, en este caso, se ve acrecentada. (Gráfica 2.19)

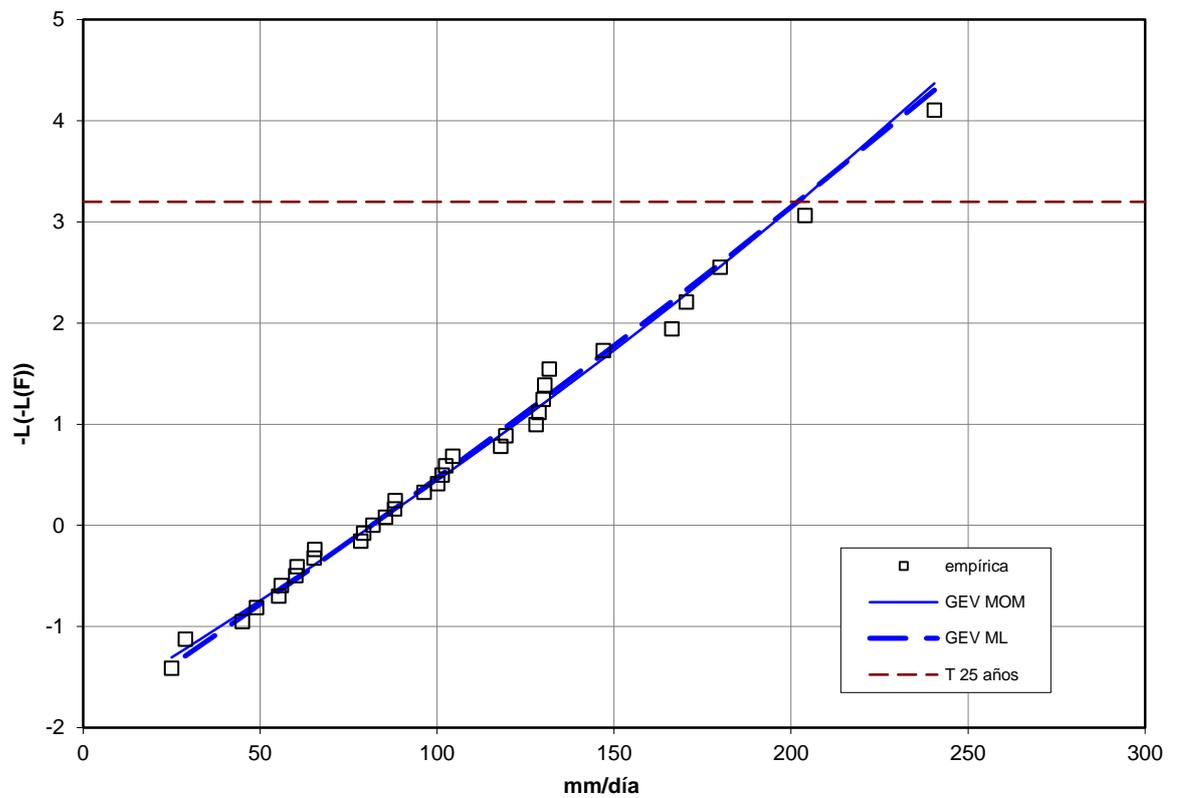
GEV MOM: siendo este método igual de válido que GEV ML dados los excelentes resultados de ajuste, se descarta siendo el ajuste obtenido por ML más consistente. (Gráfica 2.20)



Gráfica 2.17. Ajustes de la función de distribución Gumbel

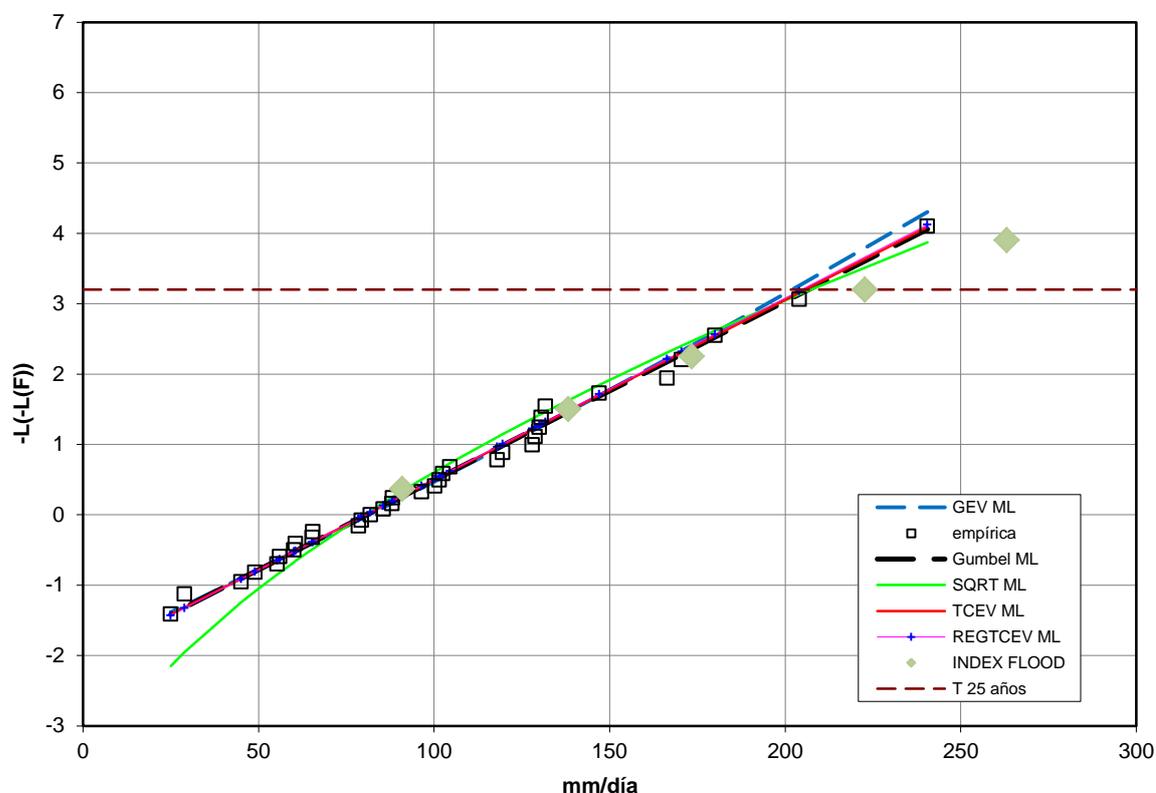


Gráfica 2.18. Ajustes de la función de distribución SQRT-ETmax



Gráfica 2.19. Ajustes de la función de distribución GEV

Finalmente, se ha escogido la función de distribución Gumbel ML, por el principio de parsimonia, al precisar únicamente de dos parámetros para la realización del ajuste y por los excelentes resultados que muestra su comportamiento sobre la serie empírica.



Gráfica 2.20. Contraste de las diferentes funciones de distribución

Y, finalmente, para la estación de Almudaina, ubicada más al oeste en el sistema hidrológico analizado, los cuantiles de precipitación diaria máxima anual para diferentes niveles de probabilidad, obtenidos de la función de distribución Gumbel ML son:

TR (años)	Cuantiles de Pd máxima anual (mm)
2	95.2
5	139.3
10	168.5
25	205.3
50	232.7
100	259.8
200	289.1
500	322.5

Tabla 2.15. Cuantiles de Pd máxima anual obtenidos en la estación Almudaina

Se puede observar de las tablas de los cuantiles que los valores de éstos para las estaciones más próximas a la costa y de menor altitud (El Verger Racons y Pego Convento) son considerablemente más elevados que aquellos obtenidos para las estaciones de mayor altitud y correspondientes a zonas más internas del sistema (Vall de Laguart Fontilles y Almudaina).

2.4. MODELO LLUVIA ESCORRENTÍA PSEUDODISTRIBUIDO

Para llevar a cabo la modelación pseudodistribuida de transformación de lluvia en escorrentía se ha empleado el *software* de libre distribución HEC-HMS, en su versión 4.0, desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*.

En los apartados siguientes se expondrán las características básicas del *software*, el esquema conceptual creado en el programa del sistema hidrológico drenado por las cuencas Girona y Portelles, los fundamentos teóricos de los modelos utilizados para la simulación de las distintas fases del proceso, las hipótesis de diseño adoptadas para la generación de los hidrogramas de crecida y, para finalizar, los resultados obtenidos.

2.4.1. MODELO HEC-HMS

El modelo HEC-HMS es un *software* diseñado para simular procesos de lluvia-escorrentía en sistemas hidrológicos. El programa suministra un completo entorno de trabajo integrado: base de datos, utilidades de entrada de datos, simulación y herramientas interactivas de consulta de resultados; todo ello en una interfaz gráfica de sencilla utilización. Los componentes principales del sistema se exponen a continuación:

a) Modelo de cuenca, en el cual se conceptualiza de forma esquemática el sistema hidrológico. Los elementos disponibles son subcuencas, tramos de propagación, embalses, confluencias de flujo, divergencias de flujo (bifurcaciones), fuentes o *inputs* de flujo y sumideros. Todos estos elementos hidrológicos están interconectados a modo de red para simular los procesos hidrológicos.

Los componentes básicos de la modelación son:

- Submodelo de producción, ofreciendo los siguientes modelos: *initial and constant* (umbral inicial de producción y posterior infiltración constante), *deficit and constant* (modelo de déficit con una sola capa), Green y Ampt, *Soil Conservation Service*, *gridded SCS* (modelo SCS distribuido espacialmente en celdas elementales en cada subcuenca) y *soil moisture accounting* (modelo de balance con cinco capas; también puede distribuirse espacialmente en celdas elementales).
- Submodelo de transformación de precipitación neta en escorrentía, en el que se incluyen los siguientes métodos: hidrogramas unitarios de Clark, Snyder y SCS, onda cinemática e hidrograma unitario introducido manualmente.
- Submodelo de flujo base, el cual puede modelarse como constante (en intervalos mensuales), mediante embalse lineal o con una curva de recesión.
- Submodelo de propagación en cauces, ofreciendo los siguientes métodos: onda cinemática, *lag*, Pulse modificado, Muskingum y Muskingum-Cunge.

b) Parámetros de control de la simulación, donde se especifican los parámetros temporales de la simulación: fecha y hora de inicio y final de la simulación e intervalo de tiempo computacional.

c) Modelo meteorológico, donde se implementa el análisis de datos meteorológicos, incluyendo precipitación y evapotranspiración. Los componentes básicos son:

- Submodelo de precipitación. Se dispone de una gran variedad de métodos para introducir al sistema la precipitación: hietogramas y datos totales introducidos de forma manual, ponderados en la cuenca por inverso de la distancia al cuadrado o por polígonos de Thiessen, valores de precipitación distribuidos espacialmente en celdas elementales, etc.
- Submodelo de evapotranspiración.

La simulación final se realiza con una sencilla combinación entre el modelo de conceptualización de la cuenca, los parámetros de control de la simulación y el modelo meteorológico.

2.4.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO

Como ya se ha visto con anterioridad en el apartado 2.2.1, el sistema hidrológico ha sido desagregado en 4 subcuencas, 3 de ellas pertenecientes al río Girona (1 de cabecera más dos intercuenas hasta su desembocadura al mar), y 1 una única para el barranco de Portelles. En el esquema del modelo HEC-HMS, el sistema hidrológico ha sido conceptualizado mediante los elementos siguientes en el modelo de cuenca:

- 4 subcuencas (SC1, IC1, IC2 y SCP)
- 2 tramos de propagación (TP1 y TP2)
- 2 nudos (J1 y J2)
- 2 desagües (el río Girona en su desembocadura y el barranco de Portelles en la suya propia, ambos al Mar Mediterráneo)

El esquema queda definido de la forma que se muestra en la siguiente ilustración.

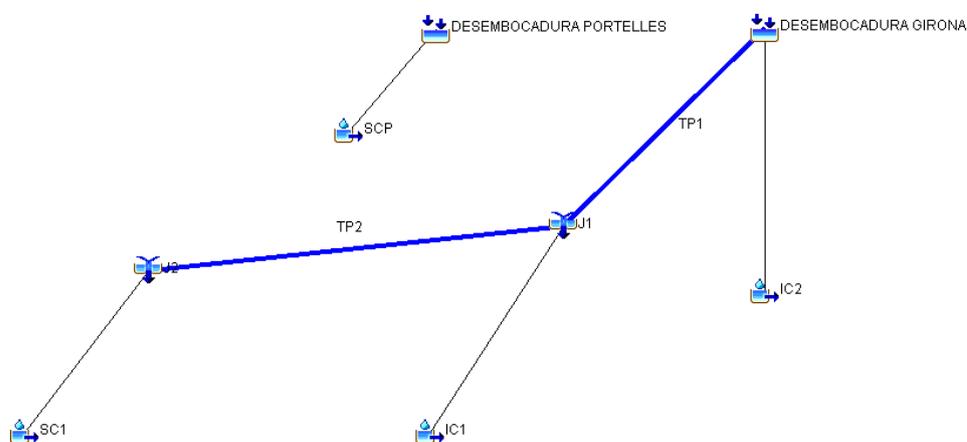


Figura 2.9. Esquema adoptado del sistema hidrológico en HEC-HMS

2.4.3. MODELOS DE SIMULACIÓN EMPLEADOS

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos básicos de los modelos utilizados en el programa HEC-HMS para simular cada una de las tres fases del proceso de transformación lluvia-escorrentía en el sistema hidrológico, ya expuestas anteriormente.

- Modelo de producción de escorrentía: *Soil Conservation Service*.
- Modelo de transformación de lluvia neta en escorrentía: hidrograma unitario (HU) adimensional del *Soil Conservation Service*, especialmente recomendable cuando se da la imposibilidad de calibración del modelo con registros históricos, como es el caso del presente estudio.
- Modelo de propagación en cauces: Muskingum-Cunge.

2.4.3.1. Modelo de producción

El modelo de producción de escorrentía superficial empleado ha sido el del *Soil Conservation Service* (1972), cuyos fundamentos se presentan a continuación. Este modelo, desarrollado por el SCS en 1972, es ampliamente utilizado en la actualidad.

El modelo asume la existencia de un umbral por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía; una vez superado este umbral, comienza el encharcamiento y la escorrentía superficial. A partir de este instante, la relación entre la parte de precipitación que escurre en superficie y la que se infiltra a través de la superficie del terreno se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$\frac{F}{S} = \frac{E}{P - P_0}$$

donde:

- F = infiltración acumulada desde que comienza el encharcamiento en superficie
- E = escorrentía acumulada
- S = máxima infiltración acumulada posible
- P = precipitación acumulada
- P_0 = umbral de escorrentía (en mm)

Por continuidad, la precipitación acumulada en cada instante es:

$$P = P_0 + E + F$$

Sustituyendo esta última ecuación en la anterior, y despejando E , la escorrentía acumulada en cada instante resulta:

$$E = \frac{(P - P_0)^2}{P - P_0 + S}$$

Como consecuencia de un elevado número de experimentaciones, el SCS propone una relación de 0.2 entre P_0 y S , por lo que, según se exprese en función de P_0 o de S :

$$E = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} = \frac{(P - 0,2 \cdot s)^2}{P + 0,8 \cdot s}$$

Por tanto, y finalmente, la función de escorrentía acumulada en superficie resulta:

$$E = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$

$$E = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

Como puede verse, asumiendo la relación propuesta por el SCS entre P_0 y S , la función de producción tiene un sólo parámetro, el umbral de escorrentía (P_0). La formulación original del SCS fue desarrollada a partir de un parámetro distinto, el número de curva (CN), número entero que varía entre 0 y 100. Este parámetro presenta la ventaja, frente al umbral de escorrentía, de ser adimensional, siendo, por el contrario, menos intuitivo. En cualquier caso, ambos parámetros están biunívocamente relacionados mediante la siguiente ecuación (P_0 en mm):

$$CN = \frac{5080}{P_0 + 50,8}$$

2.4.3.2. Modelo de propagación a nivel de subcuenca

El proceso de transformación de lluvia neta en escorrentía en todas las subcuencas ha sido modelado en términos de la teoría lineal de los sistemas hidrológicos, empleando hidrogramas unitarios para representar la respuesta hidrológica frente a una lluvia neta de volumen unitario (altura 1 mm) y duración de 10 minutos. La elección de esta duración característica del intervalo para la definición del hidrograma unitario viene condicionada por el paso temporal de cálculo empleado en la simulación, que es de 10 minutos, por el motivo que más adelante se expone (apartado 2.4.4.1).

Así, la cuenca es considerada como un sistema lineal transformador de *inputs* de lluvia neta (hietogramas) en *outputs* de caudales (hidrogramas de crecida), de manera que el hidrograma $Q(t)$ producido por transformación de lluvia neta $i_e(t)$ es calculado por medio de la convolución matemática:

$$Q(t) = A \cdot \int_0^t i_e(t) \cdot \delta(t-x) \cdot dx$$

Existen diversos métodos para la deducción del hidrograma unitario de una cuenca, siendo los sintéticos uno de ellos, los cuales son un conjunto de hidrogramas obtenidos a partir de datos hidromorfométricos. De ellos, se ha empleado el HU adimensional del *Soil Conservation Service* (1972; 1985), especialmente recomendable cuando el modelo no puede calibrarse con registros históricos. A continuación se exponen sus fundamentos.

Tras analizar numerosos HU de cuencas rurales de reducido tamaño y obtener valores medios, el SCS obtuvo en 1972 un HU con forma predefinida y escala adimensional basado en dos parámetros: el tiempo al pico y el caudal pico. En el HU adimensional el caudal y el tiempo se expresan como cociente de dichos parámetros, respectivamente; es decir, representa gráficamente en ordenadas la relación $\delta_{\Delta t}(t)/Q_p$ y en abscisas la relación t/t_p . Este hidrograma puede ser utilizado para completar el dibujo del HU correspondiente a una lluvia de duración determinada (en horas) una vez determinados los dos parámetros que lo caracterizan.

El tiempo de desfase al pico, en horas, propuesto por el SCS en su formulación original, es:

$$t_{dp} = \frac{1}{31,4} \cdot L^{0,8} \cdot \frac{[(1000/CN) - 9]^{0,7}}{J^{1/4}}$$

donde:

- L = longitud del recorrido principal de la cuenca (en km)
- J = pendiente media del recorrido principal de la cuenca (adimensional)
- CN = número de curva del SCS

Estudios posteriores del SCS recomiendan estimar el desfase al pico en función del tiempo de concentración de la cuenca, como $0.6 \cdot t_c$; sin embargo, el desfase al pico también puede estimarse asumiendo una relación entre éste y el tiempo de concentración de la cuenca de $0.35 \cdot t_c$, obteniéndose en este último caso un HU que reproduce una respuesta más rápida en la cuenca. Lo que resulta evidente es que se trata de un parámetro de gran incertidumbre y al que los resultados presentan una considerable sensibilidad. La elección de dicho valor será desarrollada con posterioridad (apartado 2.4.4.5).

El tiempo al pico puede expresarse en términos del desfase al pico y de la duración de la lluvia neta

$$(\Delta t): \quad t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{dp}$$

Y el caudal al pico, en m³/s:
$$Q_p = \frac{P \cdot A}{4,8 \cdot [(\Delta t/2) + t_{dp}]}$$

donde:

- P = precipitación (en mm)
- A = superficie de la cuenca (en km²)
- Δt = duración de la precipitación para la que se desea obtener el HU (en horas)

2.4.3.3. Modelo de propagación en cauces

Para modelar la propagación del hidrograma de crecida a través del curso principal de la red de drenaje se ha empleado el modelo de Muskingum-Cunge.

McCarthy (1939) desarrolló un método de tránsito agregado de crecientes en cauces, aplicado al río Muskingum, basado en una adaptación de la ecuación de continuidad. El método modela el

almacenamiento volumétrico de creciente en un tramo de cauce mediante la combinación de los denominados almacenamientos de cuña y prisma. Durante el avance de la onda de creciente, el caudal de entrada al tramo es mayor que el caudal de salida, resultando un almacenamiento de cuña positivo; por contra, durante la recesión de la crecida, el caudal de salida es mayor que el entrante, resultando en una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento por prisma formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del tramo de cauce.

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de crecida es directamente proporcional al caudal en dicha sección, el volumen de almacenamiento por prisma es igual a KQ , donde K es un coeficiente de proporcionalidad; el volumen de almacenamiento por cuña es igual a $KX(I-Q)$, donde X es un factor de ponderación dependiente de la forma de almacenamiento por cuña modelado. La ecuación de almacenamiento total, suma de ambos, resulta:

$$S = K \cdot [X \cdot I + (1 - X) \cdot Q]$$

El valor del parámetro X varía de 0 (para un almacenamiento tipo embalse) a 0.5 (para una cuña completamente desarrollada). En cauces naturales, X se encuentra entre 0 y 0.5, con un valor medio cercano a 0.2 (en cualquier caso, el modelo es muy poco sensible al valor de este parámetro). El parámetro K , por su parte, representa el tiempo de viaje de la onda a través del tramo de cauce. Siendo ambos parámetros dependientes de la magnitud del caudal circulante, en el tránsito agregado se suponen constantes para todo rango de flujo.

La ecuación de continuidad con discretización centrada puede expresarse como:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \rightarrow \frac{I_{t+1} + I_t}{2} - \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t}$$

Sustituyendo la ecuación de almacenamiento en la de continuidad, resulta finalmente la ecuación de tránsito para el método de Muskingum:

$$Q_{t+1} = C_0 \cdot I_{t+1} + C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_t$$

donde:

$$C_0 = \frac{(\Delta t/K) - 2 \cdot X}{2 \cdot (1 - X) \cdot (\Delta t/K)}, \quad C_1 = \frac{(\Delta t/K) + 2 \cdot X}{2 \cdot (1 - X) \cdot (\Delta t/K)}, \quad C_2 = 1 - C_0 - C_1$$

Cunge (1969) demostró que la resolución por diferencias finitas de las ecuaciones de Saint-Venant, asumiendo la simplificación de la onda difusiva (esto es, despreciando los términos inerciales), conduce a las mismas expresiones que las resultantes en el método de Muskingum. La comparación entre las expresiones en diferencias finitas y las tradicionales fórmulas de Muskingum permite establecer las siguientes relaciones entre los parámetros de Muskingum y las características hidráulicas y geométricas del cauce:

$$K = \frac{\Delta x}{C}, \quad X = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q}{B \cdot C \cdot S_0 \cdot \Delta x} \right)$$

donde:

- Δx = longitud del tramo en la discretización efectuada
- c = celeridad de la onda de avenida
- S_0 = pendiente del lecho del cauce
- Q = caudal circulante en el tramo
- B = ancho de la superficie libre de la sección transversal del tramo.

Estas expresiones tienen la ventaja de que consideran explícitamente la no estacionariedad de los parámetros (al depender del caudal circulante, que varía en el tiempo) y que éstos, además, están basados en demostraciones físicas. Adicionalmente, presenta la ventaja de que su solución es independiente del intervalo de tiempo computacional.

2.4.4. HIPÓTESIS DE DISEÑO

En este apartado se presentan los criterios de diseño adoptados para la generación de los hidrogramas de crecida máximos esperables de cada periodo de retorno para las cuencas Girona y Portelles. Los parámetros de diseño se han establecido siguiendo los criterios habituales en estudios de crecidas en cuencas de tamaño relativamente reducido. De entre ellos, destacar la determinación de la condición de humedad inicial de diseño, la cual está basada en una metodología fundamentada en una investigación actual a cargo del DIHMA.

2.4.4.1. Tipología de tormenta

A partir de los cuantiles obtenidos del análisis estadístico ajustando una función de distribución a las series de máximos anuales de cada estación se han obtenido las tormentas de proyecto para los diferentes periodos de retorno.

La curva IDF empleada es la propuesta en la Instrucción 5.2-IC (MOPU, 1990), basada en un trabajo del profesor J.R. Témez, cuya expresión es la siguiente:

$$\frac{i_T(t)}{i_T(d)} = \alpha \frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}$$

donde:

- $i_T(t)$ = intensidad media de precipitación para una duración de lluvia determinada t y un determinado período de retorno T (en mm/h)
- $i_T(d)$ = intensidad media diaria para el período de retorno considerado, que puede obtenerse como $P_d/24$, siendo P_d la precipitación diaria máxima anual correspondiente a dicho período de retorno (en mm/h)
- t = duración para la cual se pretende obtener la intensidad (en horas)

- α = factor de torrencialidad, que establece la relación entre la intensidad horaria y la intensidad diaria $i_T(1h)/i_T(d)$; obteniéndose del mapa de isolíneas de la Instrucción 5.2-IC (MOPU, 1990), que se muestra a continuación.



Figura 2.10. Mapa para la obtención del factor de torrencialidad, de la instrucción 5.2-IC

En el sistema hidrológico objeto de estudio, el valor adoptado para el factor de torrencialidad ha sido de 11.

La distribución temporal de la lluvia se ha llevado a cabo según el método del hietograma por bloques alternos, cuya hipótesis fundamental es asumir, para cualquier intervalo de tiempo, la intensidad media más desfavorable. El proceso de cálculo de la tormenta por bloques alternos, para un período de retorno determinado, es el siguiente:

1. En primer lugar se fija un número 'n' de intervalos de tiempo de duración Δt , de manera que la duración total de la tormenta sea igual al número de intervalos multiplicado por Δt . Seguidamente, se obtienen, a partir de la curva IDF empleada, las intensidades de precipitación correspondientes a cada una de las duraciones, $i(k\Delta t)$.
2. El valor de intensidad correspondiente a cada uno de los 'n' bloques que conforman la tormenta se define mediante la siguiente expresión:

$$b_k = k i(k\Delta t) - \sum_{j=1}^{k-1} b_j$$

3. Los bloques se reordenan en una secuencia temporal de manera que la intensidad máxima ocurra en el centro de la tormenta y que los demás bloques queden en orden de intensidad decreciente alternativamente a derecha e izquierda del bloque central más intenso.

Además de definir la estructura temporal, las tormentas se han diseñado siguiendo los condicionantes siguientes:

- No se asume uniformidad espacial de precipitación en todo el sistema a consecuencia de la variabilidad observada en la pluviometría extrema de las estaciones analizadas y su coherencia con la posición relativa a la línea de costa y la altitud. Todo ello se desarrolla y justifica convenientemente en el siguiente apartado.
- La duración escogida para las tormentas es de 12 horas, valor superior al tiempo de concentración mayor del sistema, correspondiente a la cuenca del río Girona e igual a 10.3 horas. Con ello se pretende justificar la necesidad del análisis de la superposición temporal de los hidrogramas del río Girona y el Portelles, para lo cual se ha generado un escenario hidrológico común, que permita comprobar los desfases temporales de las crecidas que se presenten en ambas cuencas, debidos a sus diferentes tiempos de concentración.
- La discretización temporal ha sido, como ya se ha explicado anteriormente, de 10 minutos, valor ajustado al rango establecido (menor a 30 minutos y a $0.2 \cdot t_c$).
- El coeficiente de avance de las tormentas es de 0.5.
- Se asume la hipótesis de simultaneidad temporal de la precipitación en la cuenca, por lo que los cuantiles de precipitación diaria máxima anual han sido reducidos arealmente con la expresión propuesta por Témez que se muestra a continuación, para la superficie total del sistema hidrológico analizado (superficie de la cuenca Girona más superficie de la cuenca Portelles):

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15} = 0.86$$

Con estas premisas se han construido las tormentas de diseño para cada periodo de retorno, cuyos parámetros significativos se expondrán posteriormente en el apartado 2.4.4.3.

2.4.4.2. Distribución de las tormentas de diseño en el sistema hidrológico

Finalmente se han creado dos tipologías de tormentas de diseño para cada periodo de retorno, una correspondiente a la media de los cuantiles de las dos estaciones más próximas a la costa (El Verger Racons y Pego Convento) y otra tormenta correspondiente a la media de los cuantiles de las otras dos estaciones ubicadas más al interior y a una altitud mayor (Vall de Laguart Fontilles y Almudaina).

TR (años)	El Verger Racons Pego Convento	Vall de Laguart Fontilles Almudaina
2	90.4	88.8
5	142.4	128.3
10	182.3	154.5
25	238.8	187.5
50	285.1	212.1
100	334.6	236.4
200	387.5	261.7
500	462.8	292.6

Tabla 2.16. Media de cuantiles de precipitación a implementar en las tormentas de diseño

La creación de estas dos tormentas se fundamenta en la coherencia de los resultados de los análisis estadísticos de la pluviometría extrema, donde se han obtenido cuantiles de precipitación netamente distintos en las estaciones más próximas a la línea de costa y ubicadas a menor altitud. Esta coherencia indica claramente que la pluviometría extrema en la cuenca baja del Girona (y evidentemente toda la cuenca Portelles) es más torrencial que en la cuenca media y alta del Girona.

Se deduce de lo anterior que la asignación de tormentas, a partir de los resultados de la pluviometría extrema, a las subcuencas del sistema hidrológico (SC1, IC1, IC2 y SCP) empleando métodos de interpolación basados en la distancia (como, por ejemplo, polígonos de Thiessen) no refleja adecuadamente la coherencia y el comportamiento observado en la pluviometría extrema, debido principalmente a la distancia de la estación de Almudaina, la cual se encuentra más alejada del sistema hidrológico analizado.

Por tanto, y como consecuencia de lo anterior, la asignación espacial de tormentas debe realizarse siguiendo unos criterios acordes con las variables que justifican el comportamiento observado en la pluviometría extrema, que son, indiscutiblemente, la distancia a la línea de costa y la altitud de las estaciones.

Finalmente, y atendiendo a lo anteriormente expuesto, el criterio adoptado ha sido el siguiente:

- Todo el territorio situado a una distancia paralela a la línea de costa igual o inferior a la distancia de la estación Pego Convento (9 km) implica tormenta de tipo costa.
- Todo el territorio a distancia de la línea de costa igual o superior a la distancia Vall de Laguart Fontilles (13 km) implica tormenta de tipo interior.
- Para la franja de terreno entre ambas distancias se adopta el siguiente criterio:
 - Asignación de tormenta de tipo costa para aquellas zonas cuya altitud sea igual o inferior a la media entre la estación de Pego Convento (80 msnm) y la estación Vall de Laguart Fontilles (250 msnm), igual a 165 msnm.
 - Asignación de tormenta de tipo interior para aquellas zonas cuya altitud sea mayor a 165 msnm.

Para implementar esta metodología se han seguido los siguientes pasos:

1. Creación de una línea paralela a la línea de costa de una distancia igual a la estación Pego Convento (9 km), en el SIG ArcView, creando, de esta forma un fichero vectorial.
2. Creación de otro fichero vectorial en el SIG ArcView que delimite la línea de nivel de altitud 165 msnm.

- Exportación de ambos ficheros al SIG GRASS (*software* empleado para llevar a cabo el apartado de caracterización), unión y creación del área incluida dentro de ambas delimitaciones, posteriormente transformada a formato *raster* y aplicada al sistema hidrológico conformado por las cuencas Girona y Portelles.

El resultado se muestra en el siguiente mapa:

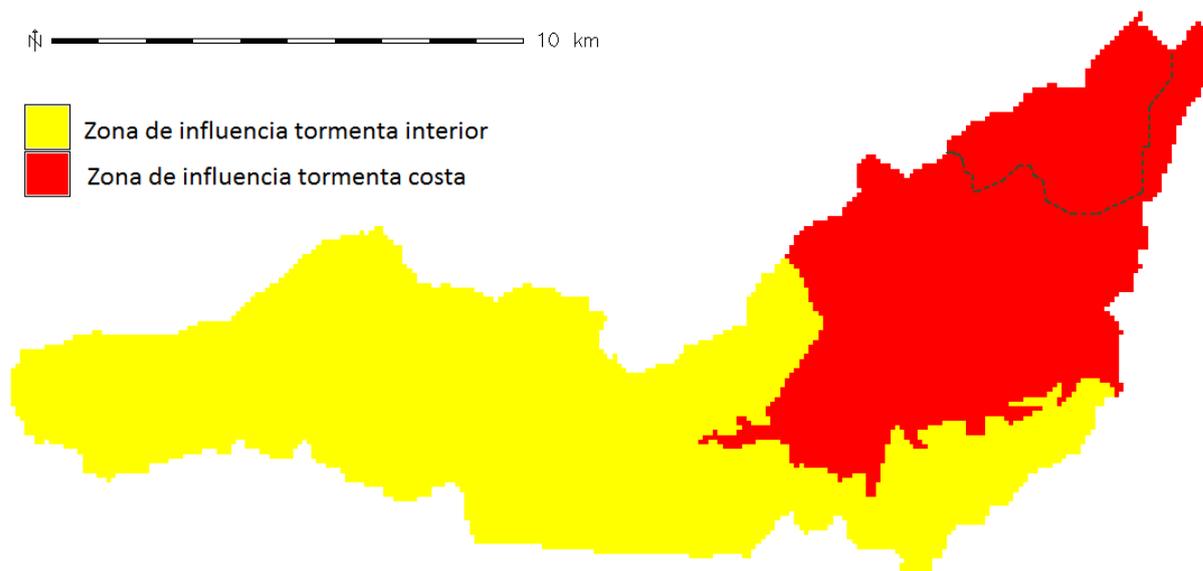


Figura 2.11. Mapa que muestra la delimitación de la influencia de cada tipo de tormenta dentro del sistema hidrológico

Mediante el empleo de herramientas básicas dentro del SIG GRASS se ha identificado qué cantidad de área para cada subcuenca corresponde a cada tipo de tormenta. De esta forma, se ha extraído la tabla siguiente, identificando la influencia que tiene cada tipo de tormenta en cada una de las subcuencas.

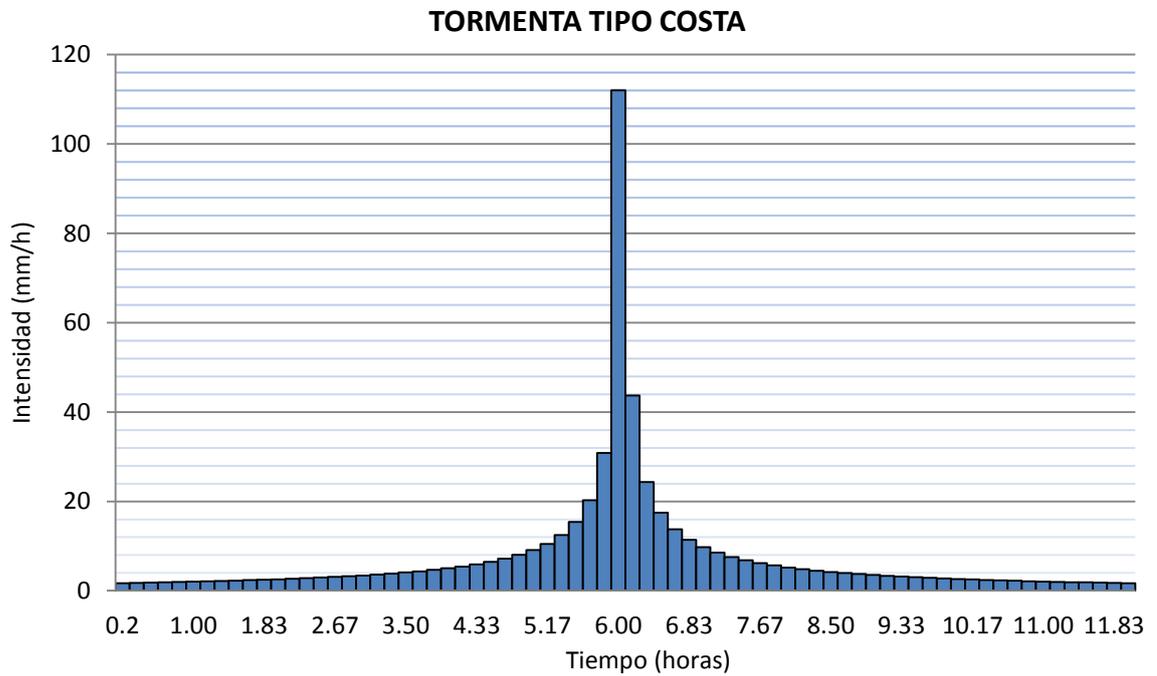
	INFLUENCIA TORMENTAS			
	SC1	IC1	IC2	SCP
TORMENTA TIPO COSTA	0%	17%	75%	100%
TORMENTA TIPO INTERIOR	100%	83%	25%	0%

Tabla 2.17. Influencia de los tipos de tormenta creados para cada una de las subcuencas pertenecientes al sistema hidrológico analizado

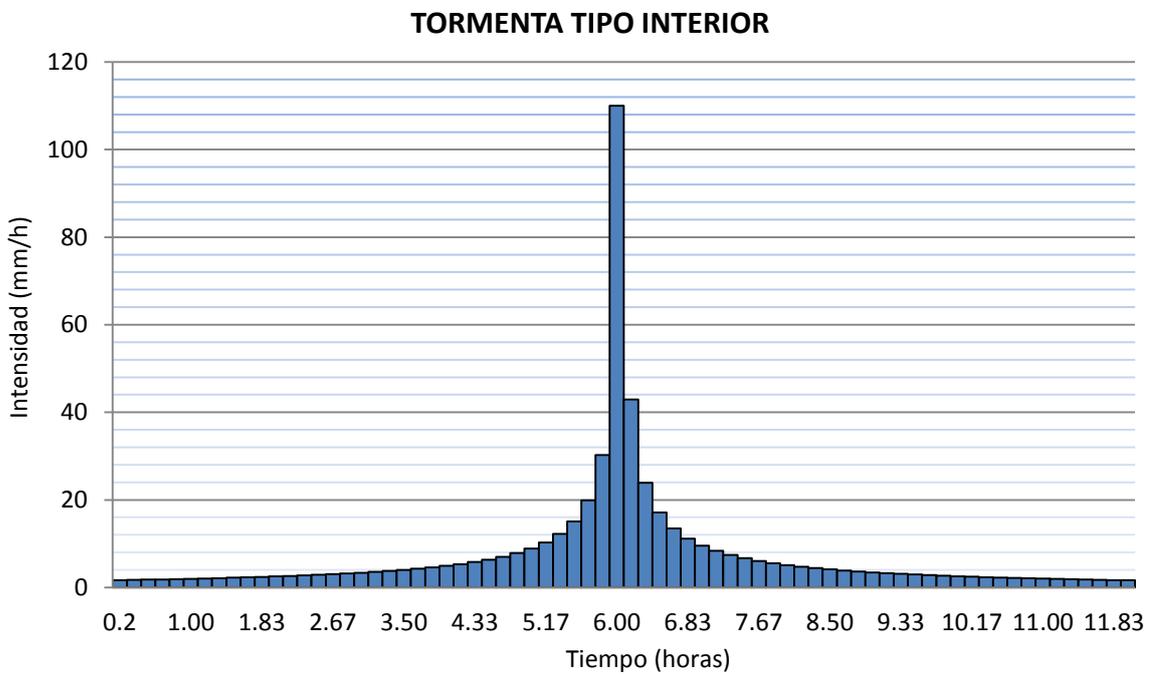
Mientras que las subcuencas IC1 (cuenca baja) e IC2 (cuenca media) presentan variabilidad de tipo de tormenta, la subcuenca SCP correspondiente al barranco de Portelles presenta únicamente tormenta de tipo costa y la subcuenca SC1 (subcuenca alta) presenta solamente tormenta de tipo interior. En términos generales, al sistema hidrológico conjunto le corresponde un 67% de tormenta tipo interior y un 33% restante de tormenta tipo costa.

Así, teniendo en cuenta los criterios de diseño expuestos en este apartado y el precedente, las tormentas de diseño creadas para los diferentes periodos de retorno son las siguientes:

Periodo de Retorno = 2 años

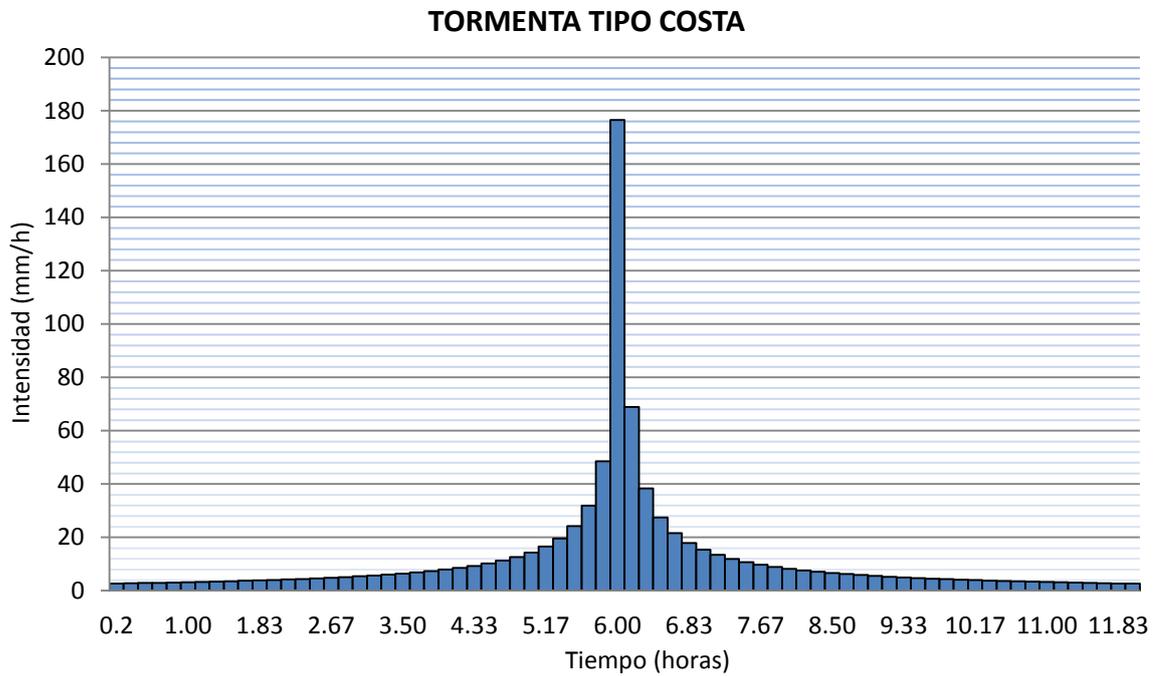


Gráfica 2.21. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 2 años

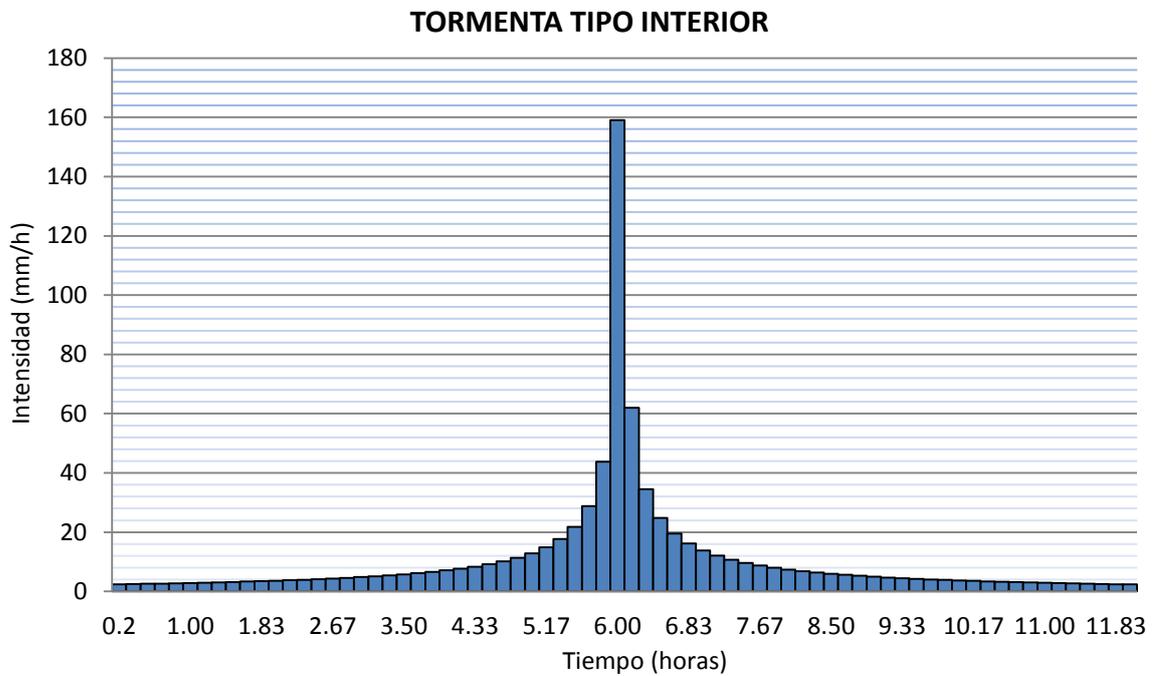


Gráfica 2.22. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 2 años

Periodo de Retorno = 5 años

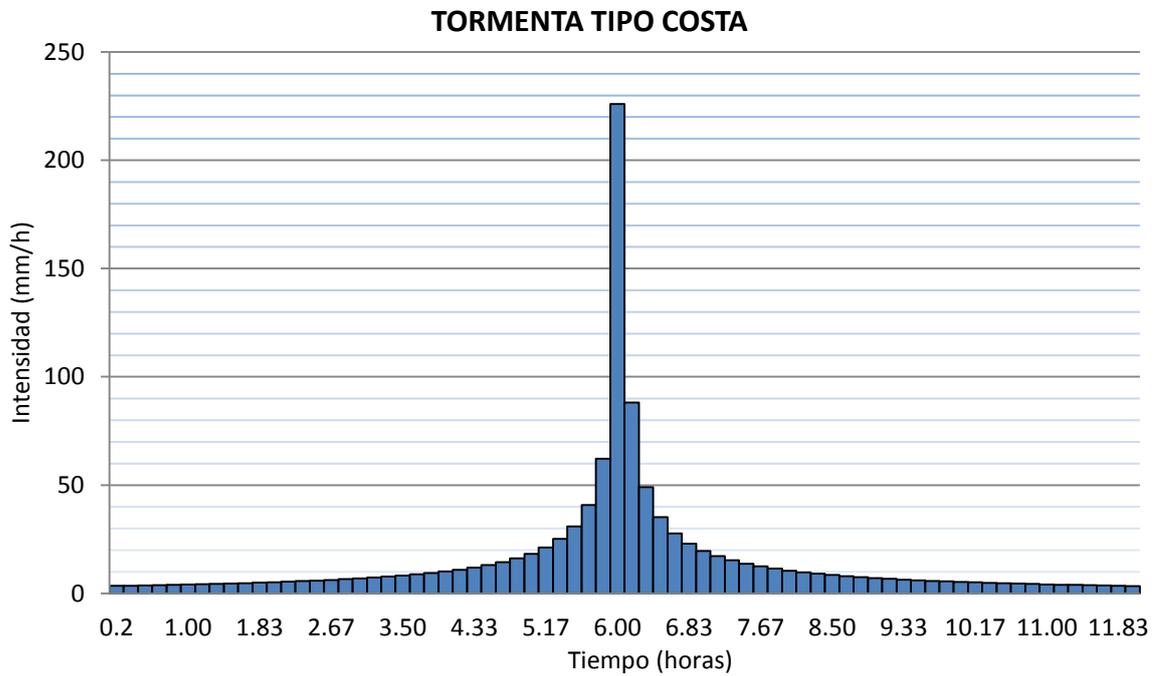


Gráfica 2.23. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 5 años

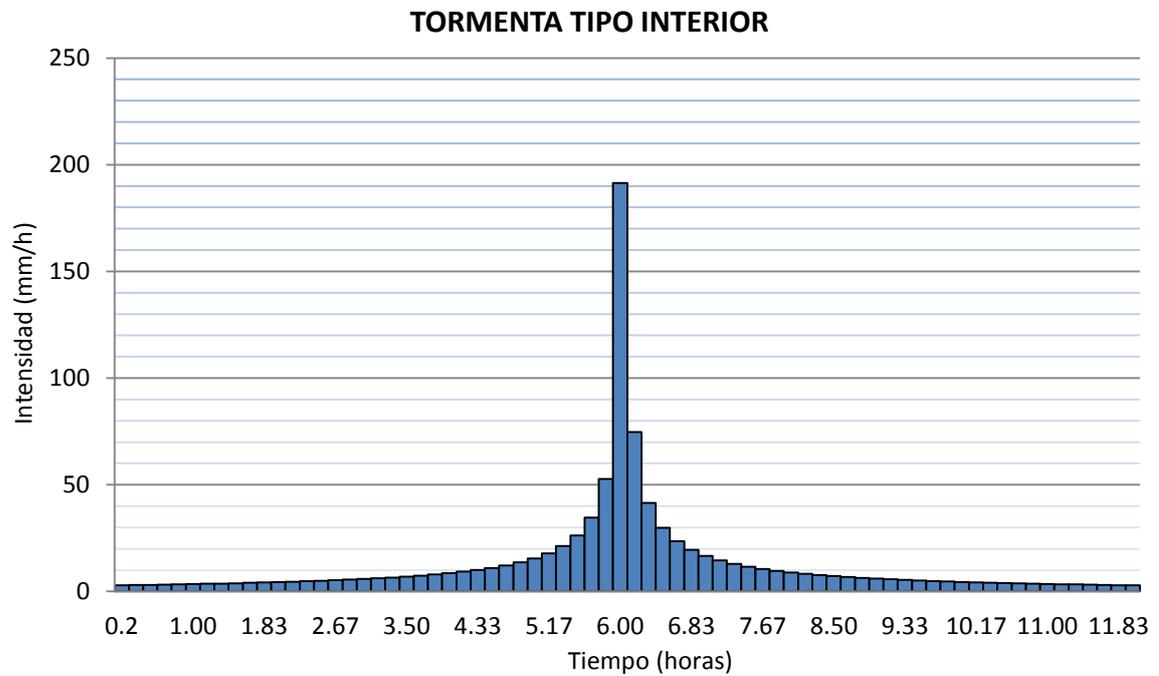


Gráfica 2.24. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 5 años

Periodo de Retorno = 10 años

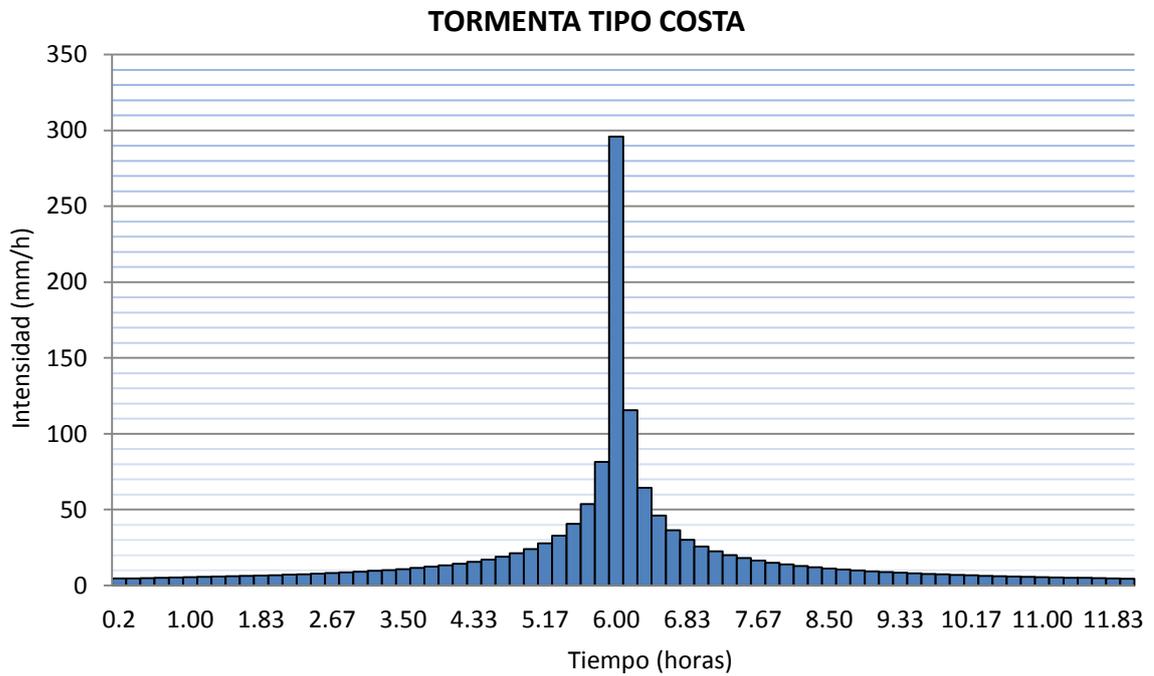


Gráfica 2.25. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 10 años

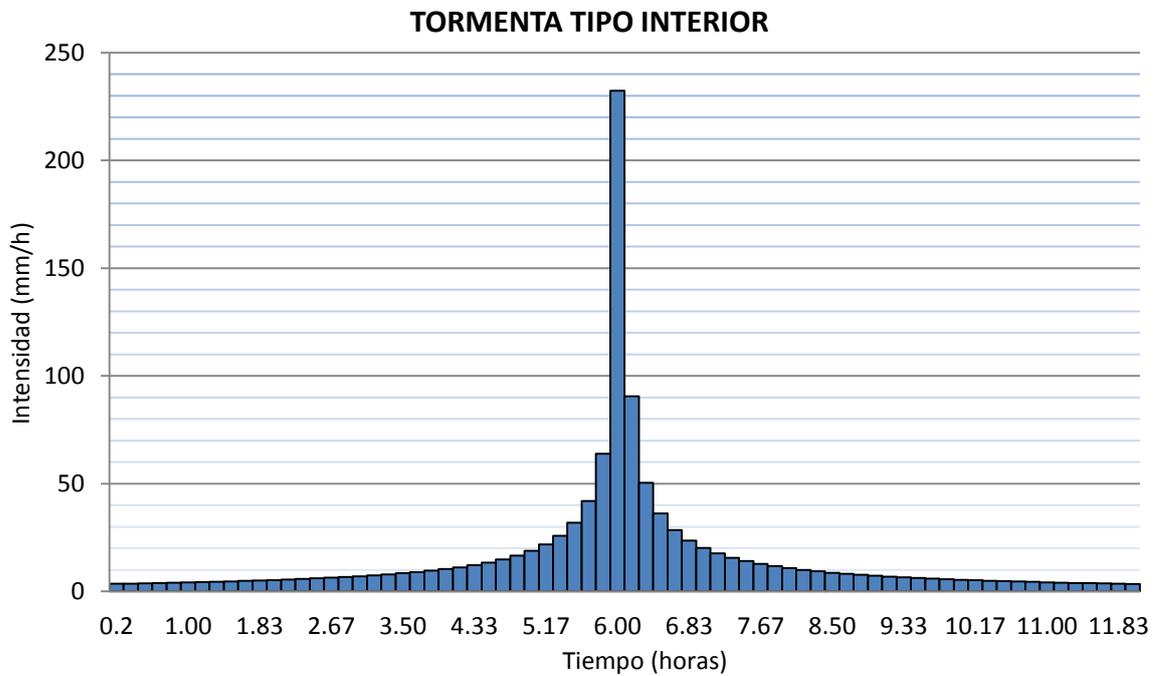


Gráfica 2.26. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 10 años

Periodo de Retorno = 25 años

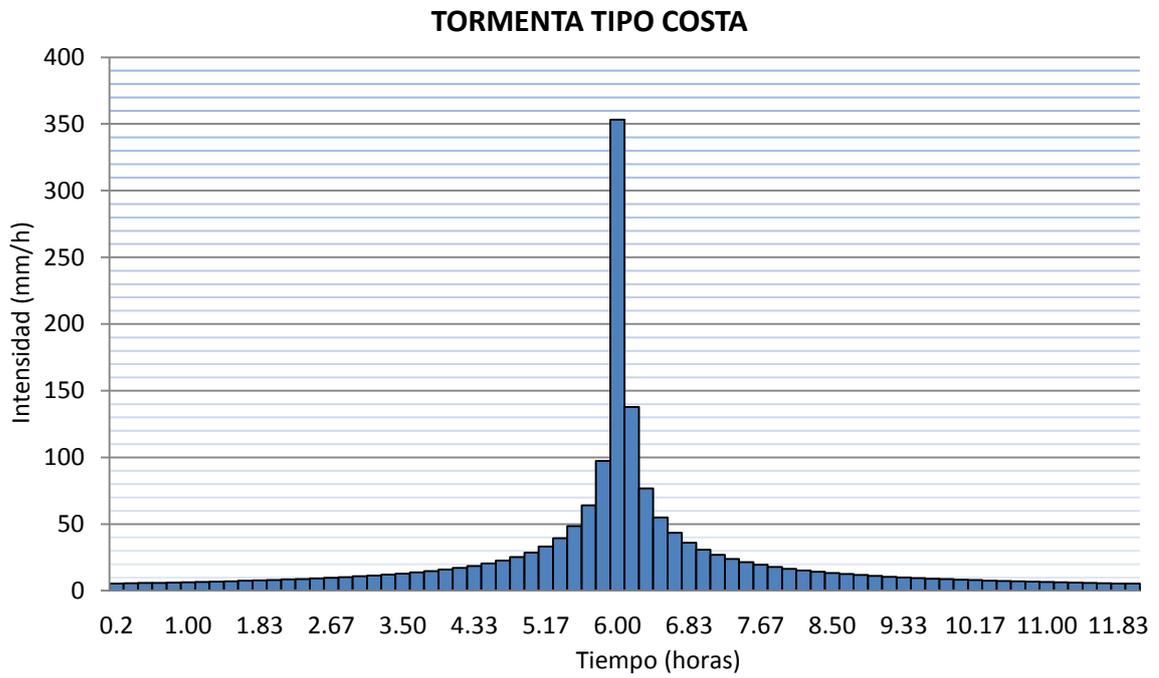


Gráfica 2.27. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 25 años

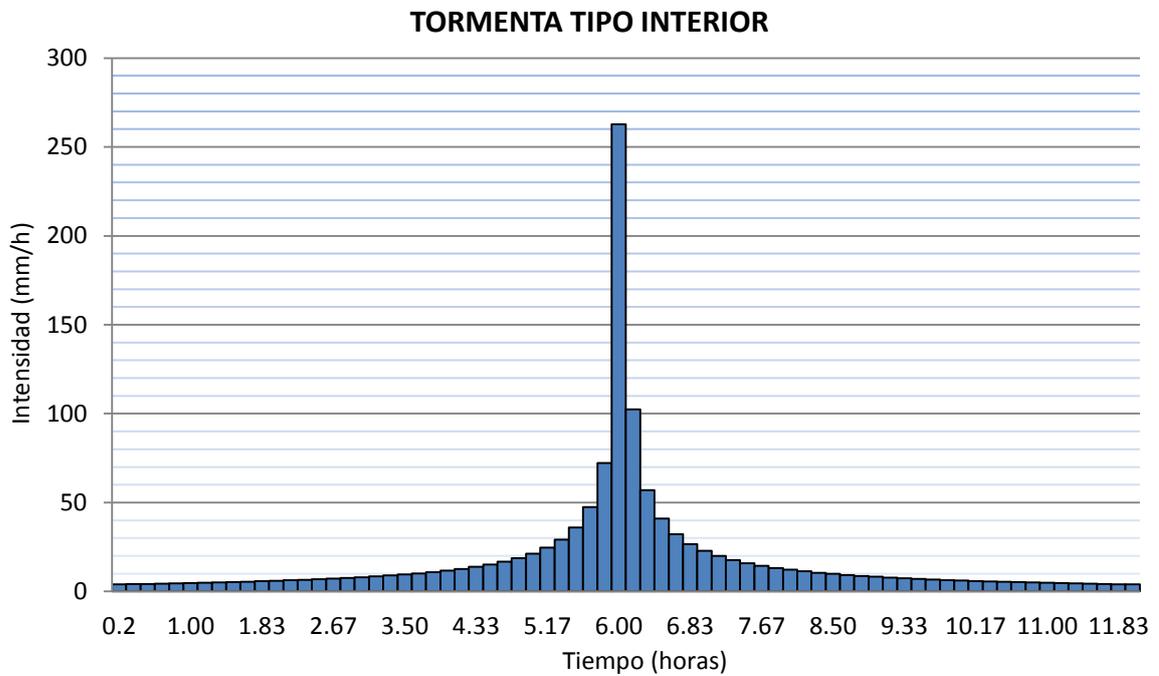


Gráfica 2.28. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 25 años

Periodo de Retorno = 50 años

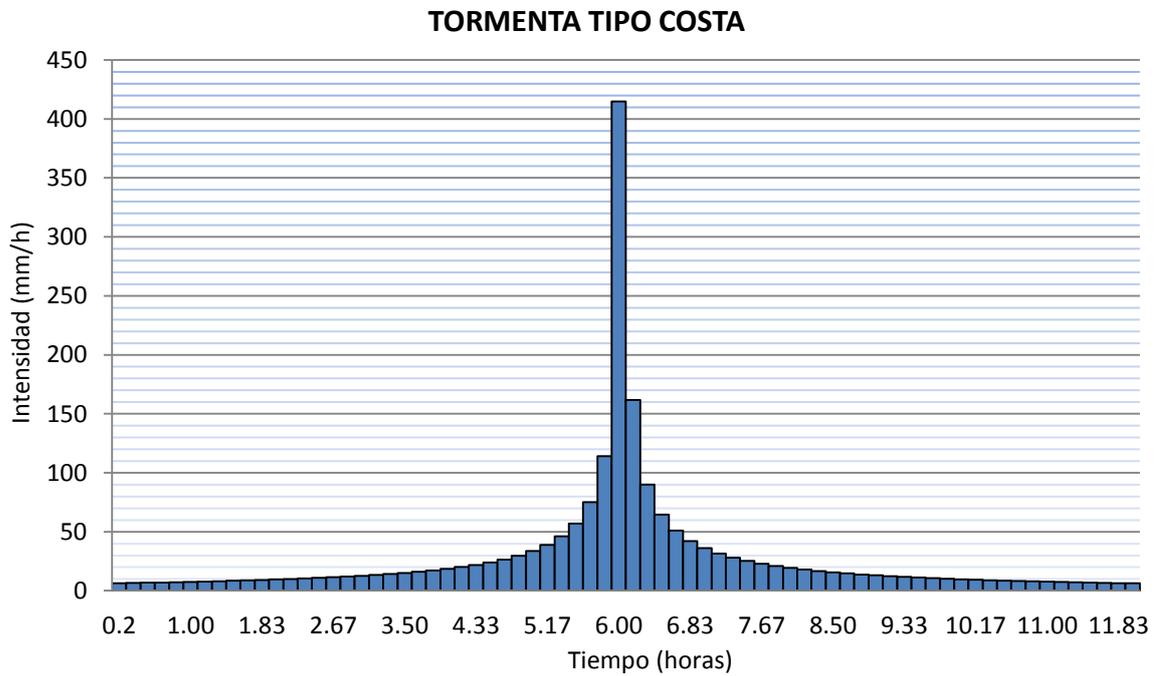


Gráfica 2.29. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 50 años

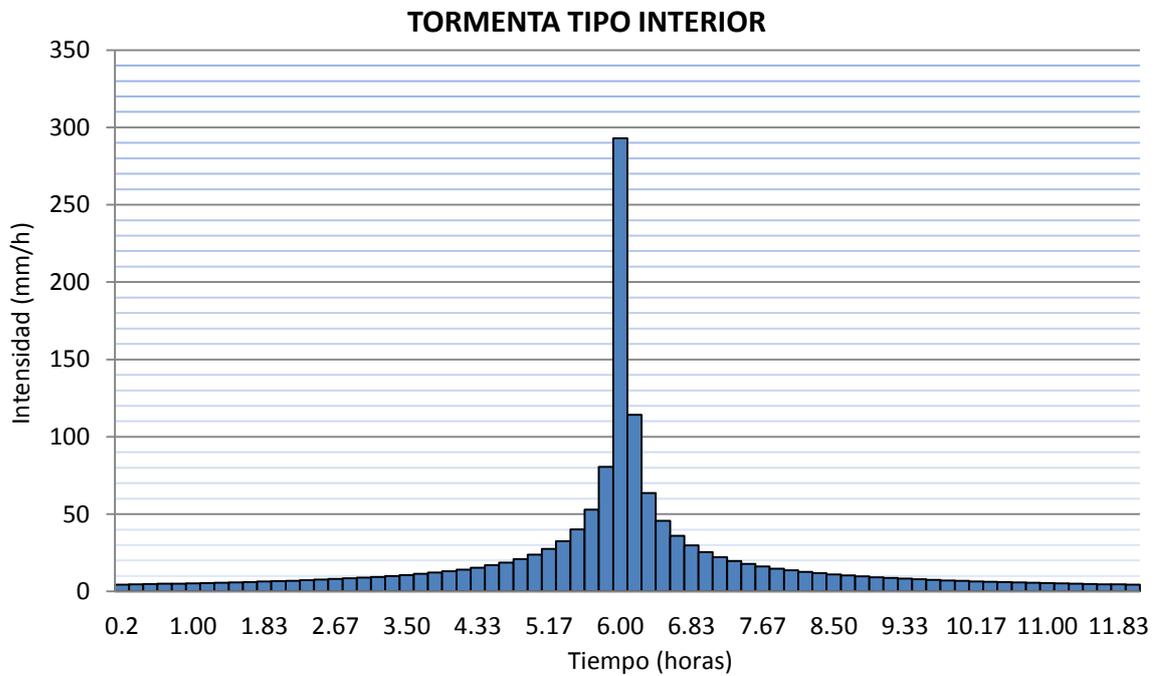


Gráfica 2.30. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 50 años

Periodo de Retorno = 100 años

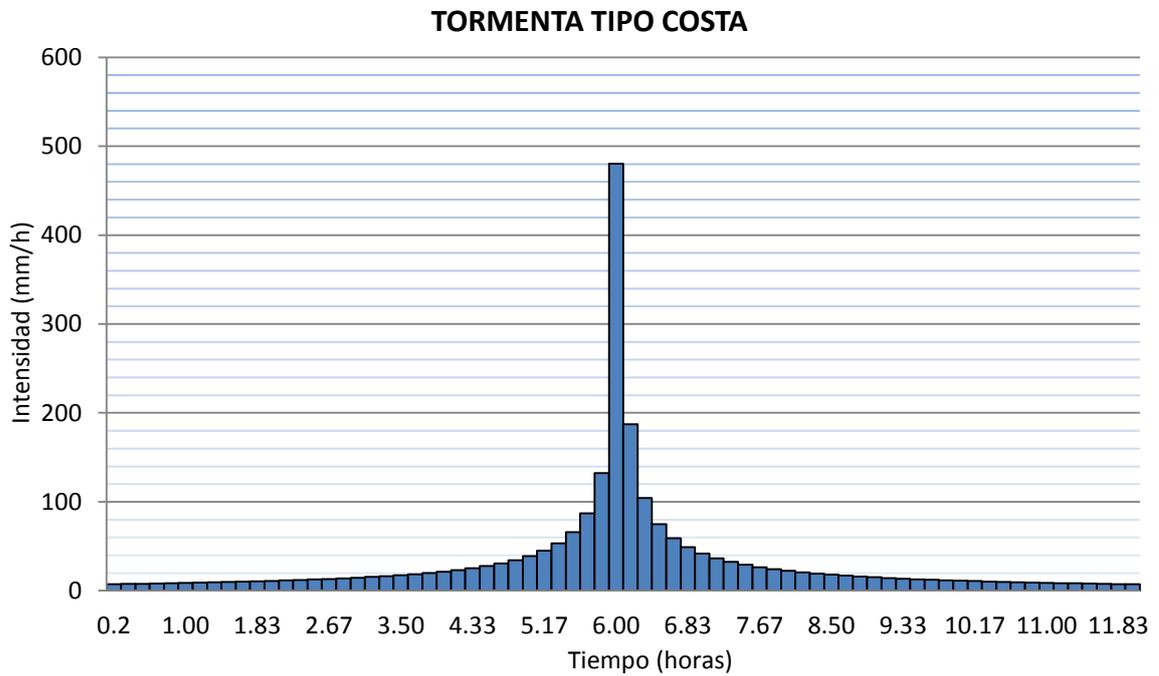


Gráfica 2.31. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 100 años

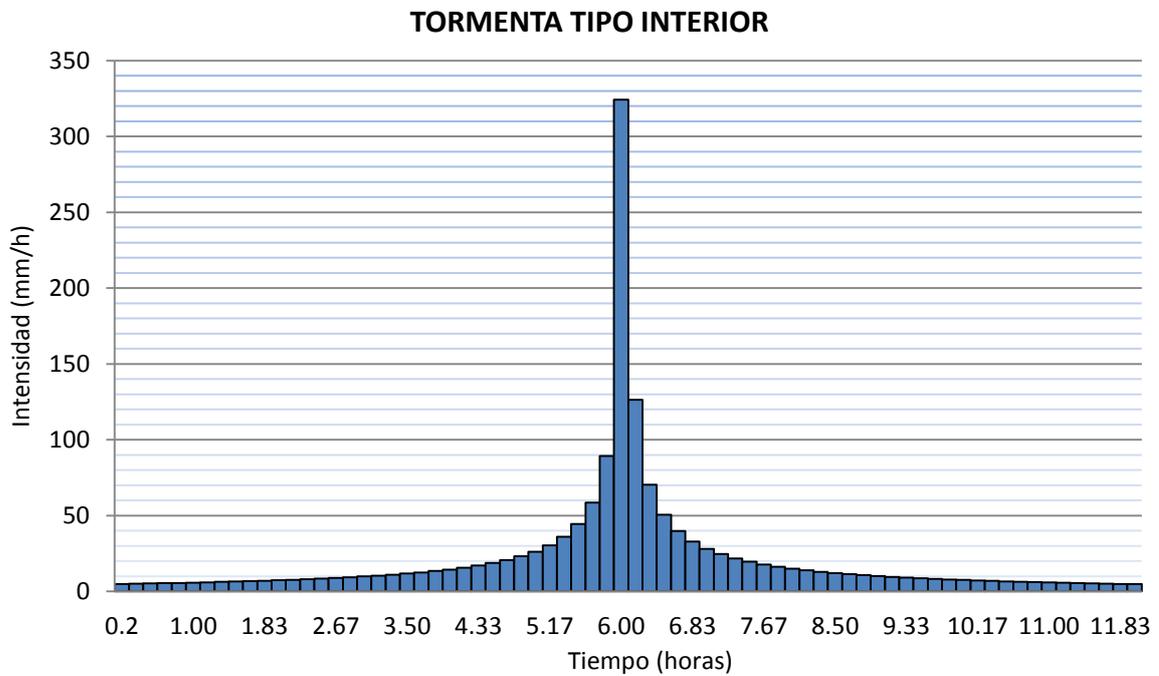


Gráfica 2.32. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 100 años

Periodo de Retorno = 200 años

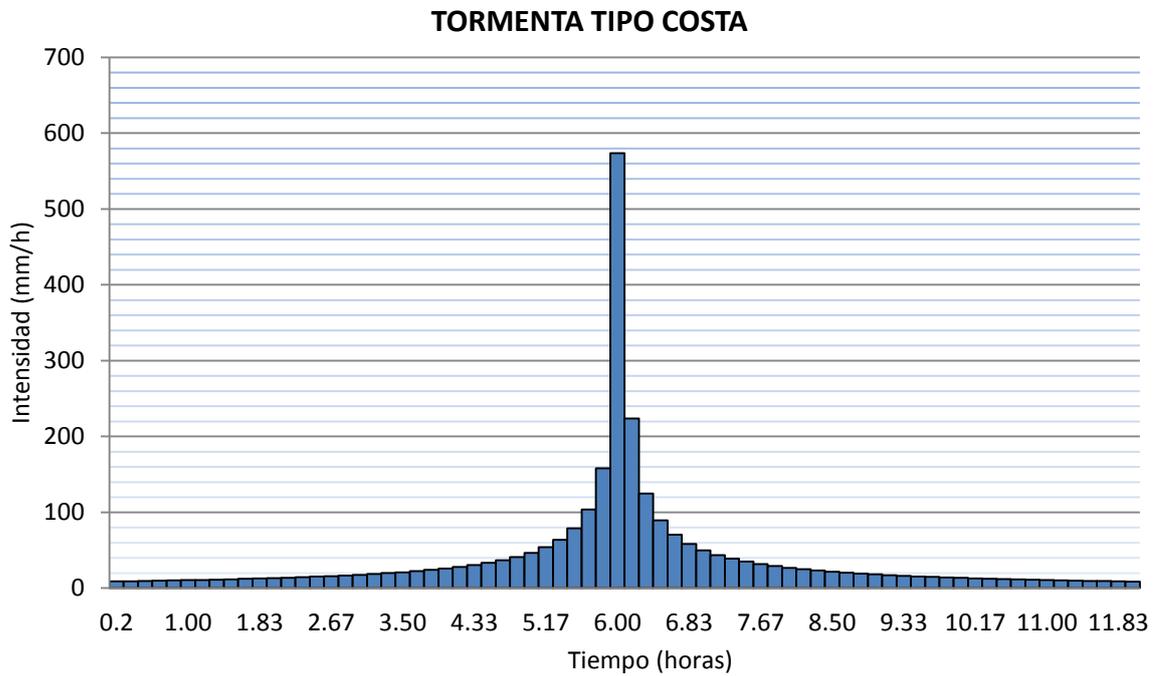


Gráfica 2.33. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 200 años

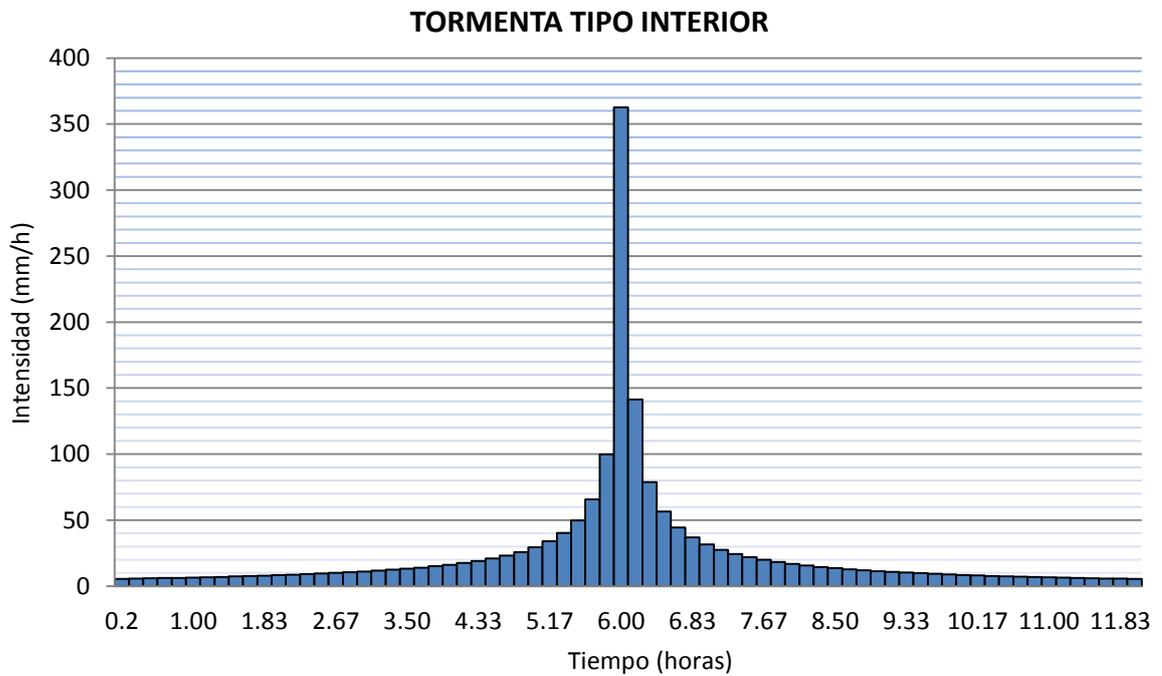


Gráfica 2.34. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 200 años

Periodo de Retorno = 500 años



Gráfica 2.35. Tormenta de diseño tipo costa para TR = 500 años



Gráfica 2.36. Tormenta de diseño tipo interior para TR = 500 años

Y la siguiente tabla recoge los datos de intensidades pico y media y volumen total de precipitación para cada una de las tormentas diseñadas.

TR	INT. PICO (mm/h)		INT. MEDIA (mm/h)		VOLUMEN (mm)	
	T. costa	T. interior	T. costa	T. interior	T. costa	T. interior
2	112.0	110.0	7.5	7.4	89.9	88.3
5	176.5	159.0	11.8	10.6	141.6	127.6
10	225.9	191.4	15.1	12.8	181.2	153.6
25	295.9	232.4	19.8	15.5	237.4	186.5
50	353.3	262.8	23.6	17.6	283.4	210.8
100	414.7	293.0	27.7	19.6	332.7	235.0
200	480.3	324.3	32.1	21.7	385.3	260.2
500	573.5	362.7	38.3	24.2	460.1	291.0

Tabla 2.18. Valores de intensidad pico, intensidad media y volumen de precipitación para cada periodo de retorno considerado

En la tabla se puede observar como los valores para las tormentas de tipo costa son mayores que las tormentas de tipo interior, acrecentándose la diferencia conforme aumenta el periodo de retorno.

2.4.4.3. Condiciones de humedad antecedentes

Para la estimación del volumen de escorrentía esperable para cada cuenca y período de retorno se han empleado los valores del parámetro del modelo de producción del SCS (P_0 SC1 = 32.4 mm, P_0 IC1 = 33.9 mm, P_0 IC2 = 30.4 mm, P_0 SCP = 29.3 mm). Sin embargo, estos valores corresponden a P_0 tipo II del SCS (condiciones medias de húmedas antecedentes del complejo suelo-vegetación). La metodología del SCS propone modificar, atendiendo a tal condición de humedad antecedente, los valores del parámetro umbral de escorrentía. Estas condiciones quedan definidas por el SCS según el rango de precipitación acumulada registrado en los 5 días previos al suceso del evento, atendiendo a lo mostrado en la siguiente tabla (Ferrer, 1993):

CONDICIÓN DE HUMEDAD	PRECIPITACIÓN TOTAL (mm) EN LOS 5 DÍAS ANTERIORES AL EVENTO	
	Estación de Latencia	Estación de Crecimiento
SECA (I)	PT ≤ 13	PT ≤ 36
MEDIA (II)	13 ≤ PT ≤ 28	36 ≤ PT ≤ 53
HÚMEDA (III)	PT ≥ 28	PT ≥ 53

Tabla 2.19. Condiciones previas de humedad del complejo suelo-vegetación establecidas por el SCS

En el caso de este estudio, los eventos de precipitación son los asociados a probabilidades de ocurrencia prefijadas, siendo, por tanto, eventos de diseño cuyo objetivo reside en establecer las condiciones de humedad esperables en la zona del sistema hidrológico analizado. Ello, exige disponer de la serie continua de eventos de precipitación registrados en la zona objeto de interés durante un periodo de tiempo que pueda considerarse significativo.

Para ello, se han empleado las series de eventos de precipitación de las estaciones Alicante-SAIH y Valencia-SAIH del periodo comprendido de octubre de 1996 a septiembre de 2009, deducidas en el trabajo de investigación "Análisis de la estructura estocástica fina de los eventos de precipitación en el

entorno del pico” (Diploma de Estudios Avanzados presentado en la Universitat Politècnica de València por Eduardo Albentosa Hernández en 2011).

En el citado estudio, se desarrolló una metodología que permita extraer de la serie continua del registro pluviométrico eventos de precipitación estadísticamente independientes. Para ello resulta evidente que el tiempo transcurrido entre eventos marca el grado en que ambos dependen mutuamente. Si el intervalo de tiempo entre eventos es relativamente corto, probabilísticamente se tratará del mismo evento. En caso contrario, si el espacio temporal es largo, éstos pertenecerán a sucesos de precipitación diferenciados. Finalmente, el objetivo del mencionado estudio consistió en el establecimiento de la separación mínima entre episodios de precipitación para su consideración como independientes estadísticamente.

Para lograr tal objetivo, en el informe se empleó el registro continuo 5-minutal de 8 pluviógrafos de la red SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar, en el período octubre 1996-septiembre 2009, de los que, como se ha indicado, se han empleado los datos de Valencia y Alicante, representativos de las condiciones pluviométricas en la zona de Calpe. En dicho periodo se obtuvieron 438 eventos estadísticamente independientes en Alicante y 567 en Valencia.

El análisis integral de la secuencia de tales eventos proporciona unos resultados concluyentes en su totalidad referidos a la condición de humedad antecedente esperable tanto en Alicante como en Valencia, que se muestran resumidamente a continuación.

Resultados para la serie de Alicante

Los resultados para la estación de Alicante muestran una separación media interevento de 244.7 horas (superior a 10 días), sobrepasando notablemente el intervalo temporal considerado por el SCS correspondiente a 5 días. A tales efectos, el número de eventos cuya separación con el evento anterior es superior a 5 días es de 245 (56% del total).

Continuando con el análisis de los registros de precipitación precedentes a cada evento de la serie de Alicante en el período de 13 años analizado, y estableciendo como período de latencia desde noviembre hasta febrero (ambos inclusive) y el de crecimiento de marzo a octubre, se obtuvieron los siguientes resultados:

- El número de eventos registrados en estación de crecimiento es de 265 (60.5% del total), mientras que en periodo de latencia es el 173 (39.5% restante).
- De los eventos registrados en estación de crecimiento, 264 (99.6%) presentan una separación con el evento anterior mayor a 5 días, o bien una precipitación acumulada registrada por debajo de 36 mm.
- De los eventos registrados en estación de latencia, 166 (96.0%) presentan una separación con el evento precedente por encima de 5 días o bien una precipitación acumulada registrada inferior a 13 mm.

Resultados para la serie de Valencia

Los resultados para la estación de Valencia muestran una separación media interevento de 185.8 horas (aproximadamente 8 días), sobrepasando el intervalo temporal considerado por el SCS

correspondiente a 5 días. A tales efectos, el número de eventos cuya separación con el evento anterior es superior a 5 días es de 272 (48% del total).

Continuando con el análisis de los registros de precipitación precedentes a cada evento de la serie de Valencia en el período de 13 años analizado, y estableciendo como período de latencia desde noviembre hasta febrero (ambos inclusive) y el de crecimiento de marzo a octubre (al igual que para la serie de Alicante), se obtuvieron los siguientes resultados:

- El número de eventos registrados en estación de crecimiento es de 368 (64.9% del total), mientras que en periodo de latencia es el 199 (35.1% restante).
- De los eventos registrados en estación de crecimiento, 353 (95.9%) presentan una separación con el evento anterior mayor a 5 días, o bien una precipitación acumulada registrada por debajo de 36 mm.
- De los eventos registrados en estación de latencia, 174 (87.4%) presentan una separación con el evento precedente por encima de 5 días o bien una precipitación acumulada registrada inferior a 13 mm.

En definitiva, en el período analizado para las series de Alicante y Valencia, el 98.2% y el 92.4%, respectivamente, de los eventos registrados tuvieron lugar en condiciones tipo I del SCS (condiciones secas de humedad antecedente), lo que permite su establecimiento como hipótesis de diseño dentro del sistema hidrológico Girona-Portelles.

Por lo tanto, los valores de umbral de escorrentía (promedio para las diferentes subcuencas del sistema) a considerar en el actual modelo lluvia-escorrentía han sido los que se muestran en la tabla siguiente.

SUBCUENCA	P ₀ tipo II (mm)	P ₀ tipo I (mm)	Factor Corrector
SC1	32.4	73.7	2.271
IC1	33.9	77.1	2.272
IC2	30.4	68.9	2.267
SCP	29.3	66.3	2.264

Tabla 2.20. Corrección de los valores umbral de escorrentía promedio de las diferentes subcuencas, según "Recomendaciones técnicas para el cálculo hidrometeorológico de avenidas" (CEDEX, 1993)

2.4.4.4. Tiempo de desfase a la punta

El tiempo de desfase a la punta (en adelante, tdp), único parámetro del HU del SCS, y como ya se comentó anteriormente, puede estimarse atendiendo a varios criterios, con una amplia variabilidad de resultados. En el caso que se presenta, debido a la imposibilidad de calibración del modelo por ausencia de datos históricos reales, se escogerá un valor medio del tdp, el cual deberá estar comprendido entre 0.35 y 0.6 por el tiempo de concentración. Finalmente se ha seleccionado un valor correspondiente a $0.45 \cdot T_c$ para cada una de las subcuencas del sistema hidrológico, mostrándose los resultados en la tabla siguiente.

	TIEMPO DE DESFASE A LA PUNTA (h)
SC1	1.46
IC1	2.05
IC2	2.42
SCP	1.07

Tabla 2.21. Tiempos de desfase a la punta para cada subcuenca para el HU del SCS

2.4.4.5. Parámetros de rugosidad e identificativos de los tramos de propagación

El modelo de tránsito de crecidas en cauces empleado (Muskingum-Cunge), requiere del coeficiente de rugosidad de Manning medio característico del lecho y de las márgenes de la sección transversal tipo para cada tramo de propagación. Aunque se trata de un parámetro basado físicamente, es también susceptible de calibración (dadas la incertidumbre en su estimación en cauces naturales y la sensibilidad del modelo a sus valores). Finalmente, se ha adoptado un valor de 0.030 para todas las secciones, incluyéndose dentro del rango característico en cauces naturales.

Tramo de propagación 1 (TP1 en el esquema hidrológico creado en HEC-HMS)

Tramo que discurre por la subcuenca IC2, desembocando en el mar y recogiendo toda la escorrentía proveniente desde aguas arriba del sistema cuenca Girona. Tiene una longitud total de 11.14 km con una pendiente media igual a 0.0063 m/m. Se ha asumido la hipótesis de sección trapezoidal con un talud correspondiente a las márgenes del cauce de 2H: 1V. El ancho prefijado de la sección ha sido consultado mediante la ayuda del Visor Web de Cartografía de la Comunidad Valenciana, estableciendo un valor medio de 25 metros, siendo la anchura de la sección de desembocadura de 30 metros.

Tramo de propagación 2 (TP2 en el esquema hidrológico creado en HEC-HMS)

Tramo que discurre por la subcuenca IC1, terminando en la divisoria de aguas de la subcuenca IC2 y recogiendo toda el agua proveniente desde aguas arriba de IC1. Posee un recorrido de 14.56 km con una pendiente media de 0.0314 m/m. Al igual que para el tramo de propagación 1, se ha asumido sección trapezoidal de talud de márgenes 2H: 1V, estableciendo una anchura media de 17 metros extraída del Visor Web de Cartografía de la Comunidad Valenciana.

2.4.4.6. Parámetros temporales de la simulación

En lo que respecta a los parámetros temporales de control de las simulaciones, se han implantado en el modelo HEC-HMS los siguientes:

- Duración del evento de 48 horas, suficiente para simular el hidrograma de crecida completo debido a la duración de las tormentas de diseño (12 horas) y el tiempo de concentración global del sistema (10.3 horas).
- Discretización temporal de 10 minutos, por los criterios anteriormente expuestos.

2.4.5. HIDROGRAMAS DE DISEÑO DE RESPUESTA SUPERFICIAL DE LA CUENCA GIRONA Y LA CUENCA PORTELLES

Con las premisas expuestas en los apartados anteriores, en el modelo pseudodistribuido se han estimado los hidrogramas de crecida en cada una de las subcuencas y para los períodos de retorno considerados de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

La siguiente tabla muestra el caudal pico, el tiempo al pico, el volumen del hidrograma de crecida y el tiempo de base en diferentes puntos de la cuenca (referidos en el esquema conceptual mostrado en el apartado 2.4.2).

TR (años)	DESEMBOCADURA GIRONA				DESEMBOCADURA PORTELLES			
	Tp (h:min)	Qp (m ³ /s)	V (hm ³)	Tb (h:min)	Tp (h:min)	Qp (m ³ /s)	V (hm ³)	Tb (h:min)
2	15:50	2.5	0.087	24:00	9:40	0.9	0.016	7:40
5	10:30	47.7	1.010	26:40	7:40	9.9	0.137	9:50
10	9:40	112.2	2.147	27:00	7:30	24	0.292	10:10
25	9:20	233.3	4.131	27:10	7:20	52.1	0.574	10:40
50	9:10	349.6	5.978	27:20	7:20	80.2	0.847	11:10
100	9:00	486.1	8.103	27:40	7:20	113.6	1.170	11:30
200	8:50	644.3	10.537	28:00	7:10	152.8	1.542	12:10
500	8:50	873.7	14.039	28:10	7:10	212.8	2.107	12:20

Tabla 2.22. Parámetros característicos de los hidrogramas de diferentes periodos de retorno en los desagües de las cuencas Girona y Portelles

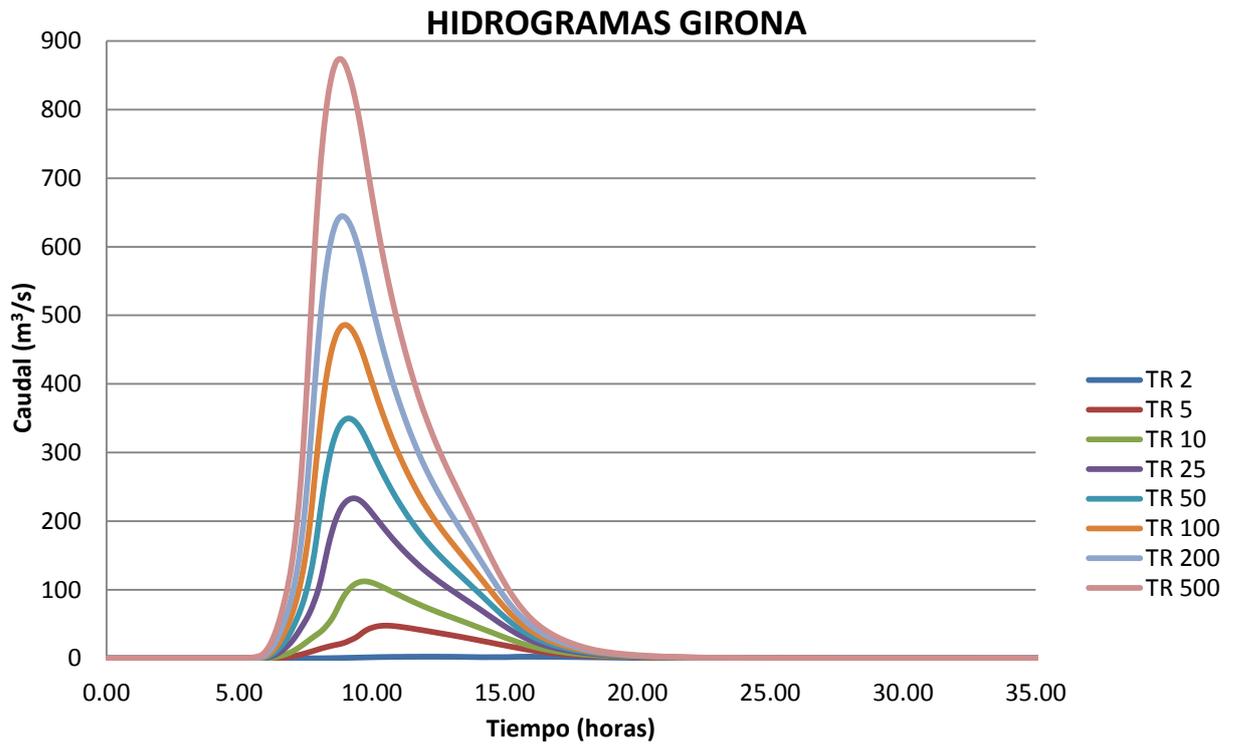
En la tabla:

- Tp: tiempo al pico; referido a la cantidad de tiempo que tarda en presentarse el caudal pico
- Qp: caudal pico; máximo caudal del hidrograma de crecida
- V: volumen de descarga del hidrograma de crecida
- Tb: tiempo de base; duración del hidrograma de crecida

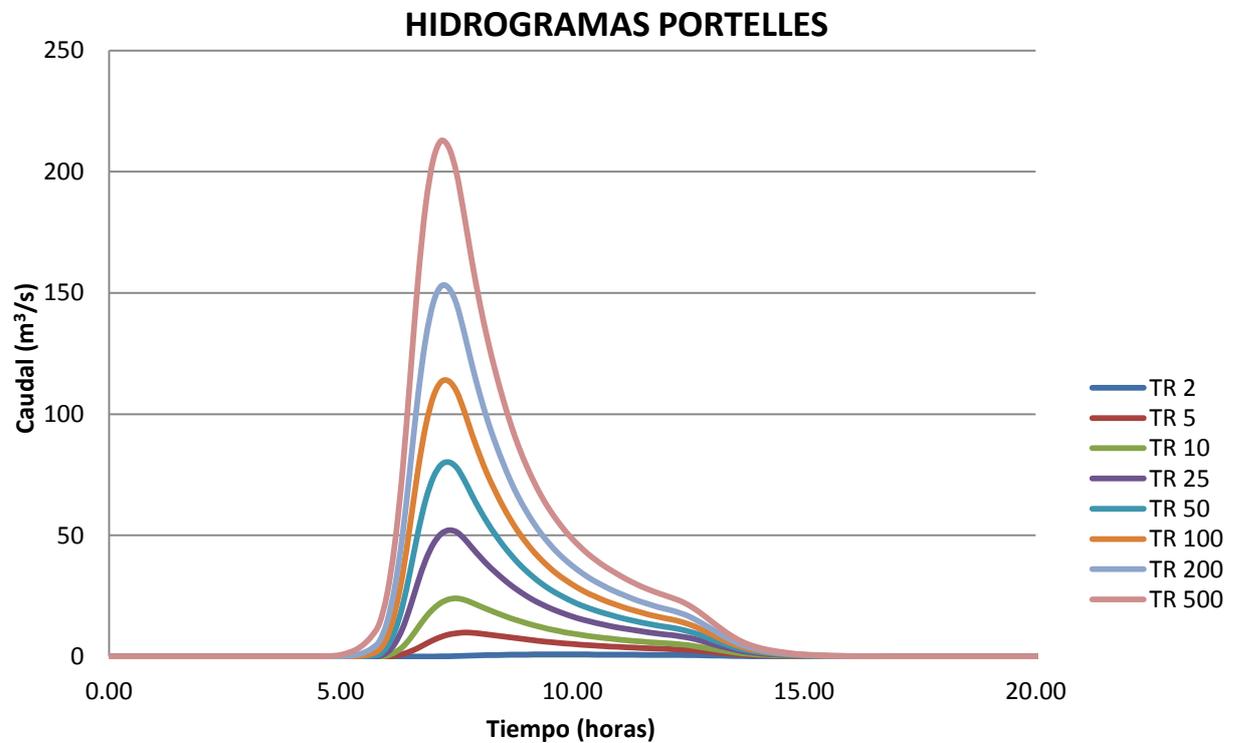
Se puede observar como a medida que el caudal pico y el volumen del hidrograma aumentan con el periodo de retorno, también lo hace la duración de los hidrogramas. Mientras, por otra parte, el tiempo que tarda en presentarse el caudal pico en el sistema decrece.

En la siguiente página se muestran los hidrogramas de crecida para los diferentes periodos de retorno. Se muestran dos gráficas, una de ellas incluyendo los hidrogramas correspondientes al desagüe de la cuenca del río Girona, y la segunda incluye los hidrogramas presentes en el desagüe de la cuenca del barranco de Portelles.

Debido a las diferencias entre la extensión de las cuencas de ambos cauces Girona y Portelles, se puede observar como los hidrogramas de crecida del primero, superan en prácticamente el cuádruple a las dimensiones de los hidrogramas del segundo.



Gráfica 2.37. Hidrogramas de crecida para los diferentes periodos de retorno analizados (TR, en años) en el punto de desagüe de la cuenca del río Girona



Gráfica 2.38. Hidrogramas de crecida para los diferentes periodos de retorno analizados (TR, en años) en el punto de desagüe de la cuenca del barranco de Portelles

3. ESTUDIO HIDRÁULICO

En primer lugar, y como consecuencia de los resultados ampliados y modificados que arroja el estudio hidrológico presentado en el apartado anterior, se adapta el estudio preliminar en modelo unidimensional cuya finalidad es, por una parte, tener una primera aproximación de la cota de la lámina de agua en el río Girona entre la nacional N-332 y la desembocadura al Mar Mediterráneo.

El objetivo de este estudio es analizar la respuesta hidráulica del río Girona a su paso por los municipios de Els Poblets y El Vergel, con el fin de diagnosticar y caracterizar los desbordamientos procedentes del mismo que se producen en el tramo de estudio. Dicha caracterización consiste en identificar, por una parte, los puntos por donde se produce el desbordamiento y por otra, garantizar una solución capaz de soportar un Riesgo 4 según establece el Plan de Acción Territorial de la Comunidad Valenciana (en adelante, PATRICOVA).

Posteriormente se procederá a un análisis de las alternativas que permitan un mejor funcionamiento del sistema, evitando las problemáticas inundaciones causadas en los términos municipales colindantes. Finalmente, atendiendo a una serie de criterios establecidos, se escogerá aquella alternativa que proporcione la solución más adecuada para la zona de estudio.

Este apartado correspondiente al estudio hidráulico se encuentra ampliamente desarrollado en el Documento correspondiente al Trabajo Final de Grado presentado por el alumno Guillermo Micó Pérez (apartado 3. ESTUDIO HIDRÁULICO).

4. VALORACIÓN ECONÓMICA

Como ya ha sido concluido en el apartado de estudio hidráulico, la solución adoptada consta de una ampliación del cauce del río Girona en aquellos tramos en los que es posible su modificación, una ampliación del cauce del Portelles y un canal de desvío de caudales del Girona a éste último.

El nuevo cauce del río Girona ha sido ligeramente ampliado, considerando para su estimación económica los metros cúbicos de material excavado, las expropiaciones necesarias y la modificación del puente de PK 2+064. Para el caso del barranco de Portelles, se ha excavado en el terreno una sección única desde el punto de confluencia con el canal de desvío hasta su desembocadura, realizando las expropiaciones oportunas para ello y modificando los cuatro puentes que cruzan por la zona modificada. Finalmente, para el canal de desvío, se han considerado las unidades de excavación en cauce, despeje y desbroce a ambos lados del canal, colocación del escollero en el lecho y geoceldas en las márgenes y el coste estimativo de expropiación de parcelas.

A continuación se muestra la tabla de precios unitarios para cada unidad de obra considerada:

Unidad de obra	Unidad de medida	Precio unitario(€/Ud. medida)
Despeje y desbroce	m2	0.5
Excavación	m3	9.5
Escollera	m3	45
Expropiación	m2	41.5
Geocelda	m2	10
Geotextil	m2	2.4
Puente	Ud.	500250

Finalmente, la valoración económica de las tres actuaciones por separado resulta la siguiente:

a) Modificación cauce Girona

Unidad de obra	Medición	Precio (€)
Excavación	110698.75	1051638.13
Expropiación	105200	4365800
Puente	1	500250
TOTAL =		5417438.13

b) Modificación barranco de Portelles

Unidad de obra	Medición	Precio (€)
Excavación	100574.20	955454.90
Expropiación	91000	3776500
Puente	4	2001000
TOTAL =		4731954.90

c) Canal de desvío

Unidad de obra	Medición	Precio (€)
Despeje y desbroce	21204.4	10602.2
Excavación	204323.2	1941070.4
Escollera	64694.9	2911270.5
Expropiación	134000	5561000
Geocelda	31806.64	318066.4
Geotextil	46880.3	112512.72
	TOTAL =	5879066.4

Resultando, finalmente, para todos los trabajos a realizar un coste económico de valor **16028459.43 euros**.

5. CONCLUSIONES

De los trabajos desarrollados en el presente estudio, se extraen las siguientes conclusiones:

Cumpliendo con la normativa que establece el PATRICOVA para cubrir los riesgos del 1 al 4, es necesario el análisis del funcionamiento de la zona para un periodo de retorno correspondiente a 100 años.

En el estudio hidrológico, partiendo de un MED y los mapas de grupos de suelo y usos del suelo de la zona objeto de estudio, se han calculado los parámetros hidromorfométricos básicos del sistema hidrológico, así como el parámetro de producción, el cual ha tenido que ser corregido atendiendo a condiciones secas de humedad precedente en el complejo suelo-vegetación.

A partir de los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas, se han extraído las series de máximos anuales asociadas a cada estación, para, con posterioridad la asignación a cada serie de una función de distribución ajustándose a la serie de máximos anuales. A tales efectos, se han generado las tormentas de diseño mediante bloques alternantes y han sido implementadas en un modelo lluvia esorrentía. Dicho modelo ha concluido en un caudal de avenida para retorno 100 años de $486.1 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el barranco de Portelles ha sido de $113.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Realizando el posterior estudio hidráulico de la situación actual, se han definido las capacidades máximas de ambos cauces, mostrando, todo ello, el mal funcionamiento del sistema frente a un periodo de retorno de 100 años y la aparición de desbordamientos incontrolados en zona urbana causando daños de envergadura considerable.

A tal efecto, ha sido necesario aumentar la capacidad del río Girona hasta los $286.1 \text{ m}^3/\text{s}$, situación a partir de la cual dejan de producirse desbordamientos mediante la realización de un trasvase del excedente de caudales al barranco de Portelles, por medio de un canal de desvío.

En el caso de avenidas superiores al periodo de retorno de diseño, es necesario el establecimiento de medidas no estructurales para hacer frente a tales riesgos de inundación, abandonando, en este caso, las medidas conocidas como estructurales. A tales efectos, se decidió la ubicación del desvío en una zona relativamente alejada de la zona urbana, para, en caso de sucederse una avenida de periodo de retorno superior a 100 años, disponer del tiempo suficiente para hacer efectivas las medidas no estructurales.

6. REFERENCIAS

Cunge, J.A., 1969, *On the subject of flood propagation computational method (Muskingum method)*. J. Hydrol. Res. 7 (2), 205-230.

Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). ArcView GIS 3.2.

Etoh, T., Murota, A. y Nakanishi, M., 1987, *SQRT-exponential type distribution of maximum*. *Proceedings del Simposio Internacional Flood Frequency and risk analysis*. 14-17 mayo 1986 págs. 231-239, Louisiana State University, V.P. Sing (edit.), Reidel Pub. Com. USA, 253-264.

Ferrer, J., 1993, *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Ferrer, J. y Ardiles, L., 1995, *Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España*. Ingeniería Civil 87-100.

Ferrer, J., 1996, *El modelo de función de distribución SQRT-ETmax en el análisis regional de máximos hidrológicos: aplicación a lluvias diarias*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Ferrer, M., Rodríguez, J. y Estrela, T., 1995, *Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica*. Ingeniería del Agua, Vol. 2, Núm. 4, pp. 43-58.

Ferrer, M., Ruiz, A., Dimas, M. y Estrela, T., 1998, *Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva*. Ingeniería del Agua, Vol. 5, Núm. 1, pp. 35-46.

Gumbel, E.J., 1942, *On the frequency distribution of extreme values in meteorological data*. Bulletin of the American Meteorological Society 23(3): 95-105.

Jenkinson, A.F., 1969, *Estimation of maximum floods*. World Meteorological Organization, Technical note no. 98, cap. 5: 183-257. General Extreme Value Distribution.

Rossi, F., Fiorentino, M. y Versace, P., 1984, *Two Component extreme value distribution for flood frequency analysis*. Water Resources research, Vol. 20: 847-856.

Cunnane, C., 1978, *Unbiased plotting positions. A review*. Journal of Hydrology 37, 205-222.

CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos), 2003, *Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección*. Ministerio de Fomento.

McCarthy, G.T., 1939, *The unit hydrograph and the flood routing*. U.S. Corps of Engineers, Providence, Rhode Island (USA).

Ministerio de Fomento, 1999, *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes del Ministerio de Fomento.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), 1990, *Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Soil Conservation Service (SCS), 1972, *National Engineering Handbook, Section 4*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Soil Conservation Service (SCS), 1985, *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Témez, J.R., 1991, *Extended and improved rational method. Version of the highways administration of Spain*. Proc. XXIV IAHR Congress Madrid (España), VOL. A, pp. 33-40.

US Army Corps of Engineers (USACE). *HEC-HMS 4.0*. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html>

Eduardo Albentosa, 2011, *Análisis de la estructura estocástica fina de los eventos de precipitación en el entorno del pico (Diploma de Estudios Avanzados)*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.

