

ANEJO II

ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA LA DEFENSA CONTRA INUNDACIONES DEL RÍO BERGANTES EN EL COMPLEJO DE LA FÁBRICA GINER EN MORELLA (CASTELLÓN)

ÍNDICE

A.2.1. INTRODUCCIÓN

A.2.2. ESTUDIO DE PRECIPITACIONES EXTREMAS

A.2.2.1 Información pluviométrica existente

A.2.2.2. Análisis de frecuencia de la serie de máximos

A.2.2.3. Análisis estadístico de la serie de máximos anuales

A.2.2.3.1. Funciones de distribución de máximos

A.2.2.3.2. Aplicación del análisis a la cuenca del Bergantes

A.2.2.3.3. Discusión

A.2.2.4. Conclusión

A.2.3. MODELO HIDROLÓGICO AGREGADO

A.2.3.1. Introducción. justificación del empleo del método

A.2.3.2. Formulación del método hidrometeorológico

A.2.3.3 Características morfométricas de la cuenca

A.2.3.3.1. Metodología empleada para la obtención de las características morfométricas

A.2.3.3.2. Características morfométricas de la cuenca del río Bergantes

A.2.3.4 Modelo de producción

A.2.3.5. Aplicación a la cuenca del bergantes

A.2.3.6. Resultados

A.2.4. MODELO PSEUDO-DISTRIBUIDO

A.2.4.1. Introducción

A.2.4.2. Transformación precipitación-escorrentía

A.2.4.3. Caracterización morfométrica

A.2.4.3.1 División y descripción de subcuencas

A.2.4.3.2 Características morfométricas de las subcuencas

A.2.4.4. Obtención del parámetro de producción

A.2.4.5. Modelo de propagación

A.2.4.5.1 Modelo de propagación a nivel de subcuenca

A.2.4.5.2. Modelo de propagación de cauces

A.2.4.5.2.1. Fundamentos del Método de Muskingum

A.2.4.5.2.2 Aplicación del método de Muskingum en HEC-HMS

A.2.4.6. Tormentas de diseño

A.2.4.6.1 Método de los bloques alternos

A.2.4.6.2 Tormentas de proyecto para la cuenca del Bergantes

A.2.4.7. simulaciones

A.2.4.7.1. Calibración del modelo pseudo-distribuido

A.2.4.7.2. Aplicación a la cuenca del Bergantes

A.2.4.8 Conclusión

APÉNDICES

APÉNDICE II.1. SERIE DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA MENSUAL DE LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE MORELLA

APÉNDICE II.2 OBTENCIÓN DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

APÉNDICE II.3. TORMENTAS DE DISEÑO

APÉNDICE II.4. PROCEDIMIENTO ILUSTRATIVO DE OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS Y MODELO PSEUDO-DISTRIBUIDO DE LA CUENCA

A.2.1. INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de lluvias intensas sobre una zona causa el aumento de los escurrimientos en una red de corrientes. Este aumento, conocido como avenida, alcanza eventualmente grandes dimensiones, y puede provocar inundaciones, daños materiales en zonas aledañas a los ríos y, en ocasiones, la pérdida de vidas humanas. Para aplicar medidas de prevención o mitigación de los daños causados por las avenidas, es necesario conocer su magnitud, su evolución en el tiempo y probabilidad de ocurrencia.

El estudio hidrológico se ha extendido a la cuenca del río Bergantes seleccionando como punto de desagüe el entorno arquitectónico de la Fábrica Giner, con el fin de obtener los valores de caudal esperables en el tramo de estudio, provenientes tanto del cauce principal como del afluente de margen derecha.

Ante la falta de aforos directos de caudal en la zona de interés, el estudio hidrológico se ha realizado por métodos hidrometeorológicos, con los que se determinan los caudales de avenida así como sus hidrogramas correspondientes a partir de valores extremos de precipitación, mediante la simulación del proceso precipitación-escorrentía.

La metodología empleada se sintetiza a continuación:

- En primer lugar se calculan las precipitaciones máximas anuales asociadas a distintos periodos de retorno para 24 horas de duración. La estimación de esta cantidad de lluvia se ha abordado mediante un análisis estadístico de la serie de precipitaciones máximas anuales recogidas en la estación pluviométrica de Morella, seleccionada por ser suficientemente representativa de la cuenca de estudio. Este análisis se ha abordado desde dos enfoques; un enfoque local en el que se hace un análisis individualizado de los datos de la estación y un enfoque regional en el que se incrementa la longitud estadística de las estaciones considerando los datos registrados de la región.
- En segundo lugar se ha realizado el cálculo de los caudales punta empleando un modelo agregado, en concreto el Método Racional Modificado al que se le aplican las variaciones propuestas por J.R Témez. Este método es lo suficientemente preciso para la obtención de caudales pico dadas las características de la cuenca de estudio.

- En tercer lugar se ha dividido la cuenca total en una serie de subcuencas, en concreto cuatro, con el fin de obtener un modelo conceptual conjunto de la cuenca que se aproxime lo más posible a la realidad. Para cada subcuenca se ha obtenido el tiempo de concentración a partir de la fórmula de Témez.

A partir de las precipitaciones de proyecto se definen las tormentas de diseño, construidas a partir de las estadísticas de máximas precipitaciones diarias mediante el método de bloques alternos.

Por último para la transformación lluvia-escorrentía se emplea el método del SCS y se realiza transformando las tormentas de diseño en hidrogramas de avenida que permiten posteriormente determinar los caudales punta en el tramo de estudio.

El proceso descrito anteriormente se ha implementado en el programa HEC-HMS desarrollado por el Army Corps of Engineers de los EE.UU, y que constituye el modelo hidrológico o pseudo-distribuido de generación de avenidas mas comúnmente utilizado en la actualidad.

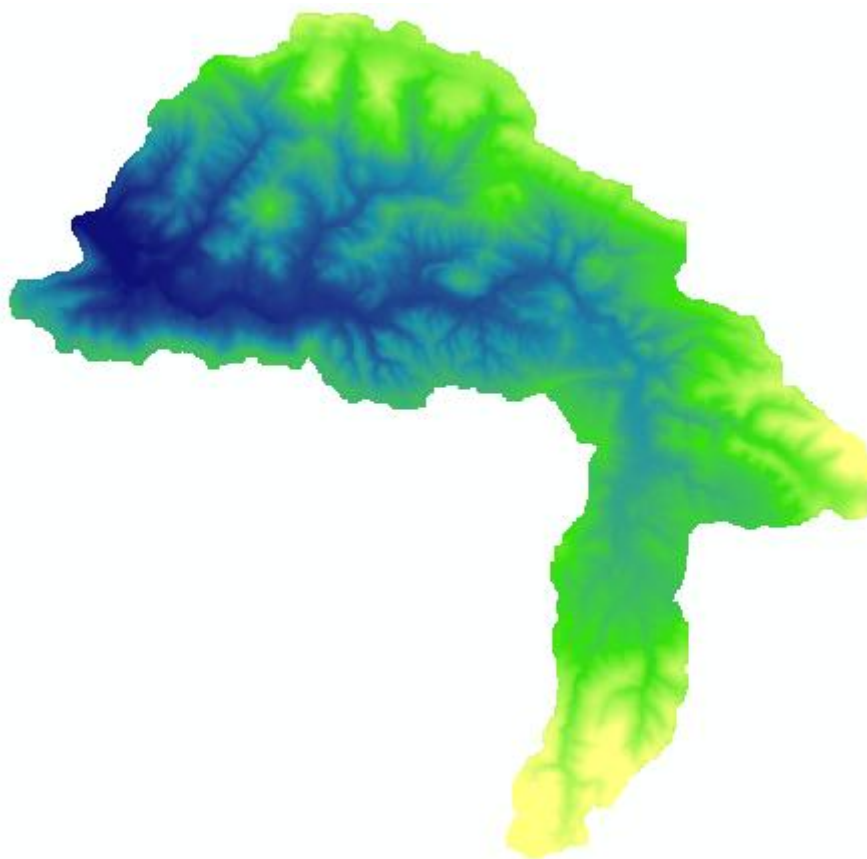


Figura A.2.1. Modelo de Elevación Digital hidrológico

A.2.2. ESTUDIO DE PRECIPITACIONES EXTREMAS

El método más directo de estimar el riesgo de una avenida es recurrir a una estación de aforos suficientemente próxima a la zona de estudio, ajustando a la serie de caudales instantáneos máximos anuales una determinada función de distribución de probabilidad. Desafortunadamente, no existen estas instalaciones comúnmente, por lo que debemos recurrir a los datos proporcionados por las estaciones pluviométricas, seguidamente determinar la función de distribución probabilística más representativa, y, mediante un modelo agregado o pseudo-distribuido (escogiendo aquel que pueda ajustarse en mayor medida a las características de la cuenca de estudio) obtener los caudales circulantes por los puntos o tramos de interés mediante la transformación lluvia-escorrentía.

Emplear el análisis de las precipitaciones puede dar lugar a estimadores de los cuantiles altamente variables debido a:

- La incertidumbre del modelo estadístico.
- Los posibles errores en las series de datos (especialmente los correspondientes a las mayores avenidas).
- La utilización de series mucho más cortas que los períodos de recurrencia que se desean obtener.
- El hecho de que las poblaciones de máximos caudales anuales presentan coeficientes de variación y sesgo altos (lo que da lugar a una alta variabilidad de las propiedades estadísticas de las muestras observadas).

Es por ello, que deberemos asegurar la fiabilidad de las fuentes de datos a las que recurramos, así como detectar los posibles errores, para corregirlos en la medida de lo posible.

A.2.2.1 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA EXISTENTE

Para el estudio de precipitaciones extremas se han empleado las series diarias de precipitación acumulada (mm) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que constituyen la fuente de precipitación histórica más representativa y completa para establecer relaciones entre precipitación máxima y periodos de retorno.

En este caso concreto se ha procedido al análisis de los datos registrados únicamente en la estación pluviométrica AEMET de Morella (código 9562).

Descripción:	Pluvionivometro en Morella	Coordenadas UTM:	Huso	X	Y	Z
			30	746116	4499818	992,2
Comunidad autónoma:	VALENCIA	Municipio:	MORELLA			
Provincia:	CASTELLON	Río:	Bergantes			

Tabla A.2.1. Estación pluviométrica AEMET de Morella

Las razones por las cuales se ha escogido una única estación considerándola suficientemente representativa de las precipitaciones de la cuenca de estudio son las siguientes:

- Extensión de la cuenca: dado que se trata de una cuenca de dimensiones relativamente reducidas (54 km²), una única fuente de datos, con un registro lo suficientemente largo y fiable, podrá ser representativa.
- Ubicación de la estación pluviométrica: la estación seleccionada es dominante frente al resto de estaciones próximas a la zona de estudio.
- Altitud de la estación pluviométrica: dado que la altitud es un condicionante meteorológico, el emplazamiento de la estación deberá estar a una cota comprendida en el intervalo de alturas de la cuenca de estudio. Puesto que está situada a una altura de 992.2 m y el intervalo de alturas de la cuenca del Bergantes abarca desde 757 m hasta 1300 m aproximadamente, se ha considerado que nos proporciona datos representativos, no siendo necesaria realizar una corrección de éstos.
- Longitud de la serie de datos: es suficientemente extensa como para permitir que las distintas funciones de distribución de máximos que se emplearán en el análisis estadístico satisfagan el principio de parsimonia.

A.2.2.2. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LA SERIE DE MÁXIMOS

Los registros existentes de la estación pluviométrica de Morella proporcionados para la realización del estudio hidrológico abarcan desde el año 1916 hasta el año 2007. Sin embargo la serie de datos en este periodo no es íntegra. Esta falta de datos nos obliga a realizar un sesgo de aquellos años hidrológicos que por no estar completos no sean representativos. De este modo, se elimina el riesgo de falsear los resultados. En el Anejo 1 se adjuntan las precipitaciones máximas diarias mensuales acumuladas de la estación pluviométrica de Morella.

No existe registro de datos pluviométricos de la Estación de Morella o están incompletos en los periodos siguientes:

- Año 1919 (abril)
- Año 1920 (agosto y septiembre)
- Año 1921 (enero)
- Año 1928
- Año 1930 (diciembre)
- Año 1931 (julio y agosto)
- Año 1932 (enero y junio)
- Año 1933 (septiembre, octubre, noviembre)
- Año 1935 (mes de enero y junio)
- Entre el año 1936 (a partir de julio) y 1943
- Año 1950 (diciembre)
- Año 1951 (enero, febrero, marzo, abril, junio, julio, agosto)
- Año 1952 (mes de enero)
- Año 1953 (enero, marzo, julio)
- Año 1954 (febrero, julio, septiembre)
- Año 1956
- Año 1957 (enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio)
- Año 1965 (mes de julio)
- Entre el año 1972 (a partir de junio) y 1978

Por tanto de los datos registrados podemos extraer 56 años hidrológicos completos, a partir de los cuales se realizará un análisis de la probabilidad existente de que el máximo diario anual se presente en cada uno de los doce meses del año.

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia:

Mes	<i>n</i>	Probabilidad (%)
Enero	1	1.786
Febrero	5	8.929
Marzo	2	3.571
Abril	3	5.357
Mayo	5	8.929
Junio	5	8.929
Julio	2	3.571
Agosto	5	8.929
Septiembre	4	7.143
Octubre	16	28.571
Noviembre	4	7.143
Diciembre	4	7.143

Tabla A.2.2. Probabilidad de presentación del máximo diario anual

A partir de estos resultados, confirmamos uno de los aspectos más predecibles del régimen de lluvias de la Comunidad Valenciana, el máximo pluviométrico otoñal, que comparte con el resto de la cuenca mediterránea y que es debido a la mayor frecuencia de temporales de levante durante el trimestre de septiembre a noviembre. Siendo octubre, además de con diferencia el mes más lluvioso, el que reúne las condiciones más propicias para que se produzcan temporales de lluvias intensas.

A continuación se muestran los meses, ordenados de mayor a menor probabilidad de presentación de la máxima precipitación anual (considerando años hidrológicos).

Mes	Probabilidad (%)
Octubre	28.571
Febrero	8.929
Mayo	8.929
Junio	8.929
Agosto	8.929
Septiembre	7.143
Noviembre	7.143
Diciembre	7.143
Abril	5.357
Marzo	3.571
Julio	3.571
Enero	1.786

Tabla A.2.3. Meses del año ordenados de mayor a menor probabilidad de presentar el máximo

A partir de esta información se establecen los criterios de validez para la serie de máximas precipitaciones diarias anuales:

- En primer lugar, se considerarán válidos todos aquellos años hidrológicos completos que no presenten ningún valor erróneo.
- En segundo lugar, se incluirán los años hidrológicos incompletos en los que falten uno o dos meses de los siguientes: enero, marzo, abril o julio.
- Por último, se incluirán aquellos años hidrológicos incompletos cuyos meses faltantes sean: enero, marzo y julio.
- Los años hidrológicos que no cumplan alguno de los criterios expuestos no se considerarán válidos para el análisis estadístico de máximos.

Finalmente, incluyendo los datos de aquellos años hidrológicos que satisfacen las restricciones impuestas, se adopta una serie cuya longitud es de 61 datos. Longitud capaz de ajustar la distribución TCEV, siendo ésta la más restrictiva de entre las consideradas por su elevado número de parámetros.

A partir de la tabla de datos adjuntada en la siguiente página y haciendo uso de la herramienta AFINS 2.0 se han obtenido los parámetros estadísticos que caracterizan la serie de datos adoptada:

<i>Media (mm)</i>	69.45
<i>Varianza (mm²)</i>	1457.44
<i>Desviación estándar (mm)</i>	38.18
<i>Coef. Asimetría</i>	2.55
<i>Coef. Variación</i>	0.55
<i>Kurtosis</i>	9.51

Tabla A.2.4. Parámetros estadísticos

Estos parámetros nos permiten hacer un análisis crítico de los resultados. Dado que la media está en torno a los 70 mm y el valor del coeficiente de asimetría es elevado, una buena práctica será comprobar, previamente a la obtención de las distribuciones de máximos, la fiabilidad de los valores extraordinarios, que condicionarán en gran medida los cuantiles de precipitación resultantes, objeto de este apartado.

Los registros extraordinarios considerados son los siguientes:

- Año hidrológico 1965-1966, con una precipitación acumulada de casi 200 mm. Se considera una cifra fiable dado que existen noticias que mencionan los fuertes episodios de lluvias que sucedieron en el mes de octubre de 1965 en la provincia de Castellón (Artículo: Las lluvias en Levante, en el periódico La Vanguardia, Domingo 31 de octubre 1965)
- Año hidrológico 2000-2001, que presenta una cifra de 233.8 mm en el mes de octubre, el valor máximo de precipitación acumulada de la serie de datos registrados. Se comprueba que durante estas fechas se dio uno de los episodios de lluvias más intensas de las últimas décadas, registrándose cantidades superiores a 300 mm en numerosas regiones de la provincia de Castellón, alcanzando precipitaciones de 500 mm, e incluso localmente de 600 mm en poblaciones del interior norte (interior del Baix Maestrat y Els Ports).

Año hidrológico	Pmáx (mm)	Año hidrológico	Pmáx (mm)
1916 - 1917	98.0	1968 - 1969	46.0
1917 - 1918	64.7	1969 - 1970	89.3
1918 - 1919	58.0	1970 - 1971	65.0
1920 - 1921	43.0	1979 - 1980	57.5
1921 - 1922	86.4	1980 - 1981	76.0
1922 - 1923	150.0	1981 - 1982	46.5
1923 - 1924	40.0	1982 - 1983	90.0
1924 - 1925	74.0	1983 - 1984	91.5
1925 - 1926	46.0	1984 - 1985	49.2
1926 - 1927	107.0	1985 - 1986	46.0
1929 - 1930	58.5	1986 - 1987	65.5
1943 - 1944	34.0	1987 - 1988	54.0
1944 - 1945	52.0	1988 - 1989	69.0
1946 - 1947	69.0	1989 - 1990	69.0
1947 - 1948	42.8	1990 - 1991	68.5
1948 - 1949	80.5	1991 - 1992	56.0
1949 - 1950	80.5	1992 - 1993	61.0
1951 - 1952	80.0	1993 - 1994	38.8
1952 - 1953	44.0	1994 - 1995	46.0
1953 - 1954	57.0	1995 - 1996	48.0
1954 - 1955	40.5	1996 - 1997	52.0
1957 - 1958	115.6	1997 - 1998	37.3
1958 - 1959	64.7	1998 - 1999	39.0
1959 - 1960	64.2	1999 - 2000	71.0
1960 - 1961	50.0	2000 - 2001	233.8
1961 - 1962	56.7	2001 - 2002	62.5
1962 - 1963	65.0	2002 - 2003	82.7
1963 - 1964	35.9	2003 - 2004	71.3
1965 - 1966	199.6	2004 - 2005	31.7
1966 - 1967	29.4	2005 - 2006	55.2
1967 - 1968	180.0		

Tabla A.2.5. Serie de precipitación diaria máxima anual en la estación de Morella

A.2.2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE DE MÁXIMOS ANUALES

A.2.2.3.1. Funciones de distribución de máximos

Se han seleccionado para el análisis estadístico las distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en el ámbito hidrológico, concretamente en los estudios de crecidas. Las distribuciones teóricas de máximos finalmente consideradas (en función del tipo de análisis empleado) son:

- Análisis estadístico Local
 - Gumbel
 - GEV (General Extreme Value)
 - TCEV (Two Component Extreme Value)
 - SQRT-ET max (Square-Root Exponential Type Distribution of the maximum)
- Análisis estadístico Regional
 - SQRT-ET max (Square-Root Exponential Type Distribution of the maximum)

Análisis local

A continuación se exponen las principales características de las distribuciones de máximos utilizadas.

- Función de distribución Gumbel

Es la distribución de extremos tradicional en el ámbito de la hidrología, siendo la más utilizada por ser de más sencilla aplicación. Llamada así en honor a *Emil Julius Gumbel* (1891-1966), su aplicabilidad potencial para representar los máximos se limita a muestras de datos cuya distribución es normal o exponencial. Siendo un mal ajuste en climas torrenciales, dado que su coeficiente de asimetría es de valor constante, por lo que la distribución queda del lado de la inseguridad.

Su expresión analítica viene dada por:

$$F_X(x) = e^{-\lambda \cdot e^{-\theta \cdot x}}$$

Donde:

x : valor de la variable aleatoria, en nuestro caso, la precipitación diaria máxima anual

$F_X(x)$: probabilidad de no excedencia del valor x en un año dado.

λ : Parámetro de dispersión de la distribución

$$\mu = (\ln \lambda + 0,5772)/\theta$$

θ : Parámetro de Localización de la distribución

$$\sigma = \frac{\pi^2}{6\theta^2}$$

La estimación de los parámetros de la distribución se realiza por el método de la máxima verosimilitud, el cuantil asociado a un determinado periodo de retorno (T) se calcula mediante la expresión:

$$P(T) = \lambda - \frac{1}{\theta} \cdot \left[\ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right]$$

- Función de distribución GEV

La distribución GEV (*General Extreme Value*), introducida por Jenkinsion (1955,1969), fue recomendada para el análisis de frecuencia de crecidas a nivel local por el Flood Studies Report (FSR) desarrollado por el Natural Environment Research Council (UK NERC, 1975). Actualmente, está en vigor el “Flood Estimation Handbook” (2000) que contempla también el empleo de la distribución GL (Generalised Logistic). Así mismo, la GEV es la distribución propuesta para precipitaciones en los Estados Unidos (Willeke et al., 1995), y para ondas del mar (Haan y de Ronde, 1998).

Este modelo de distribución de máximos tiene tres parámetros dotándola de una mayor capacidad para la reproducción de casuísticas con presencia clara de “outliers” asociados a episodios de carácter extraordinario. La función GEV se presenta como una posible candidata para una correcta caracterización estadística de episodios otoñales de carácter convectivo y asociadas a situaciones meteorológicas de “gota fría”.

La función de distribución GEV consta de tres parámetros, siendo su expresión analítica:

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

Donde:

x : valor de la variable aleatoria, la precipitación diaria máxima anual.

$F_x(x)$: probabilidad de no excedencia del valor x en un año dado.

x_0 : parámetro de localización;

α : parámetro de escala

β : parámetro de forma

Según el valor del parámetro de forma β , podemos diferenciar entre:

- Tipo I. GEV1, EV1 o Gumbel, si $\beta = 0$.

- Tipo II. GEV2 (Fréchet), si $\beta < 0$.

Con límite inferior, función definida para $x > x_0 + \frac{\alpha}{\beta}$

- Tipo III. GEV3 (Weibull), si $\beta > 0$.

Con límite superior, función definida para $x < x_0 + \frac{\alpha}{\beta}$

El cuantil asociado a un periodo de retorno se obtiene invirtiendo la función y sustituyendo F por $(1-(1/T))$

- Función de distribución TCEV

La función de distribución de máximos TCEV (Two Component Extreme Value) es una función de nueva generación en el análisis de la frecuencia de las avenidas (Rossi et al.,1984). Desarrollada teniendo en cuenta la existencia de dos poblaciones de avenidas. Una parte de las avenidas, que denominaremos avenidas ordinarias, originadas por lluvias frontales, habitualmente en invierno y primavera, más frecuentes y de menor magnitud. Y, por otra parte, las avenidas extraordinarias, que representan las lluvias torrenciales, de mayor magnitud, menor frecuencia, y generadas por fenómenos de precipitación de tipo convectivo durante el verano y otoño.

La forma más inmediata de obtener la expresión de una TCEV es asumir que las poblaciones de las avenidas máximas anuales ordinarias (X1) y extraordinarias (X2) derivan de poblaciones Gumbel independientes.

La expresión analítica de esta distribución es:

$$F_x(x) = \exp[-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x}]$$

Donde:

x : valor de la variable aleatoria, la precipitación diaria máxima anual.

$F_x(x)$: probabilidad de no excedencia del valor x en un año dado.

λ_1, θ_1 : Parámetro de crecidas ordinarias, debidas a precipitaciones frontales.

λ_2, θ_2 : Parámetro de crecidas extraordinarias, debidas a precipitaciones convectivas.

Se debe tener en cuenta que presenta como principal inconveniente el elevado número de parámetros de la expresión, que aumenta la incertidumbre en la aproximación, disminuyendo a su vez la robustez del modelo si el número de datos no es suficiente.

- Función de distribución SQRT-ET max

La distribución SQRT-ET max (*Square Root Exponential Type for Maximum*), propuesta en Japón por Etoh, A. Murota y M. Nakamishi (1986), es uno de los escasos modelos de ley desarrollados específicamente para el análisis de máximas lluvias diarias y tiene la característica de conducir a resultados más conservadores que los obtenidos mediante la ley de Gumbel.

Está recomendada para aquellos casos, frecuentes en cuencas mediterráneas, donde coexisten dos poblaciones de máximos: ordinarios y extraordinarios. Por lo que es considerada por el CEDEX más adecuada para numerosas regiones españolas que otras distribuciones tradicionales. Por ello, está siendo, recientemente, la escogida por algunos autores (Ferrer, 1993, 1996), siendo la escogida para la realización del mapa de España que permite calcular fácilmente la precipitación máxima diaria para cualquier periodo de retorno (Ministerio de Fomento, 1999).

La expresión analítica de este modelo de distribución de máximos, formulado con únicamente dos parámetros es la siguiente:

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

Donde:

x : valor de la variable aleatoria, la precipitación diaria máxima anual.

$F(x)$: probabilidad de no excedencia del valor x en un año dado.

k, α : parámetros de escala y frecuencia, que dependen de la media y desviación típica

El cuantil asociado a un periodo de retorno se estima numéricamente.

Análisis regional

Uno de los principales problemas en el análisis de frecuencia de extremos hidrológicos es la escasez de datos disponibles. Este hecho conduce en muchas ocasiones a estimar variables asociadas a elevados periodos de retorno mediante series de escasa longitud estadística. Se plantea como solución posible a este problema el empleo del método estadístico de análisis regional.

Mediante esta herramienta se pretende incrementar la longitud de la serie de datos analizada, dotando de mayor precisión a los resultados y reduciendo la incertidumbre asociada a la variabilidad muestral.

Por ello, además de las distribuciones expuestas anteriormente, se ha optado por un análisis regional empleando la distribución SQRT-ET max proporcionada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio de Fomento, 1999), análisis fundamentado en la tesis doctoral de Francisco Javier Ferrer Polo (1996) cuyo título es “El modelo de función de distribución SQTR-ET max en el análisis regional de máximos hidrológicos: Aplicación a lluvias diarias”.

Este método de análisis asume la existencia de una región homogénea respecto a ciertas características estadísticas que permite aprovechar el conjunto de información disponible en dicha región.

El método regional adoptado, denominado tradicionalmente índice de avenida, acepta como premisa que la variable Y resultante de dividir en cada estación los valores máximos anuales por su media sigue idéntica distribución de frecuencia en toda la región considerada.

$$Y = \frac{P}{\bar{P}}$$

La estimación de los cuantiles locales X_t (P_t en el “Mapa para el Cálculo de Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular” de 1997) en un determinado punto se reduce a reescalar los cuantiles regionales Y_t (denominados Factores de amplificación K_t en la referida publicación) con la media local \bar{P} según la siguiente expresión:

$$X_t = Y_t \cdot \bar{P}$$

La estimación regional de cuantiles consistió en agrupar las 1545 estaciones, con al menos 30 años de registro, en 26 regiones geográficas con características meteorológicas comunes. Siendo contrastada la homogeneidad de las regiones mediante un test estadístico de χ^2 .

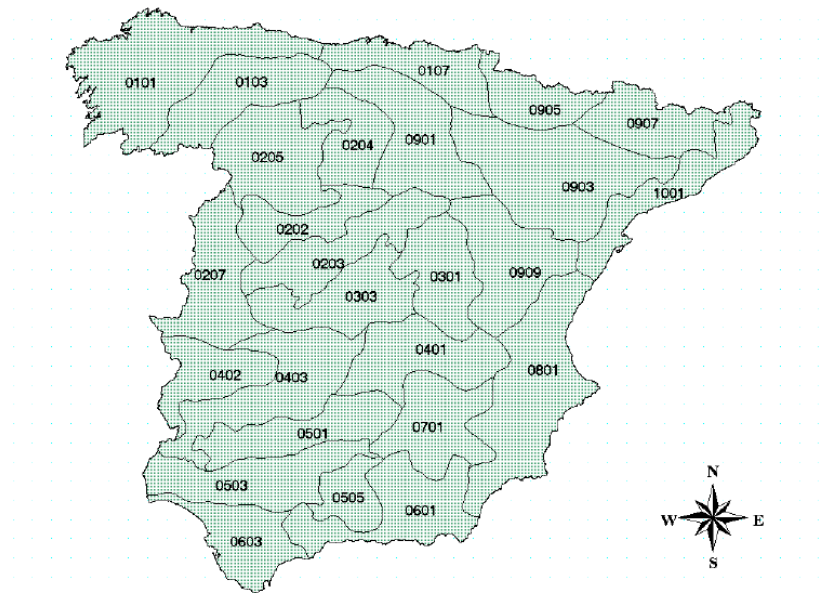


Figura A.2.2. División de la España Peninsular en 26 regiones geográficas con características meteorológicas comunes (CEDEX)

El análisis de la distribución espacial de P se abordó mediante interpolación espacial con técnicas de krigado, cuya ventaja fundamental frente a otros métodos de interpolación, es la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre correlación espacial existente en los propios datos, que queda reflejada en el denominado variograma muestral.

El mapa de Isolíneas de Cv fue obtenido análogamente mediante una interpolación espacial en una malla por el método del inverso de la distancia al cuadrado.

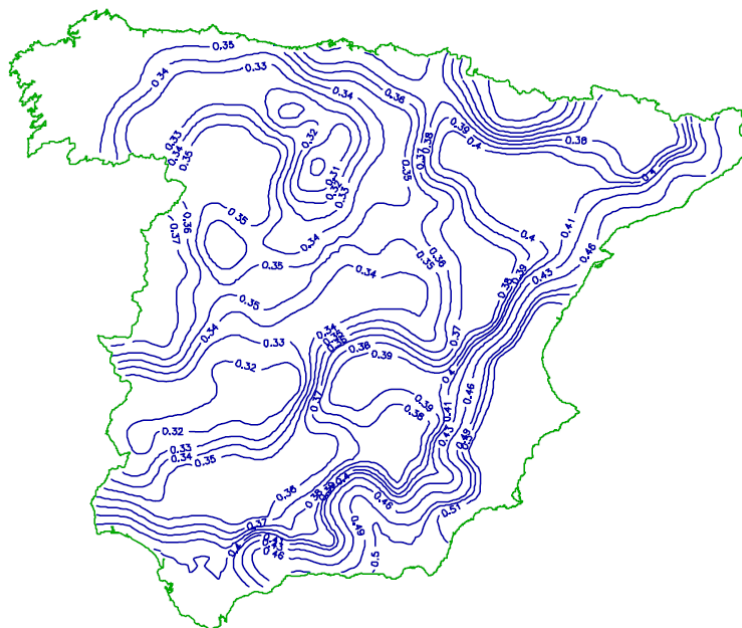


Figura A.2.3. Isolíneas del valor regional del coeficiente de variación Cv (CEDEX)

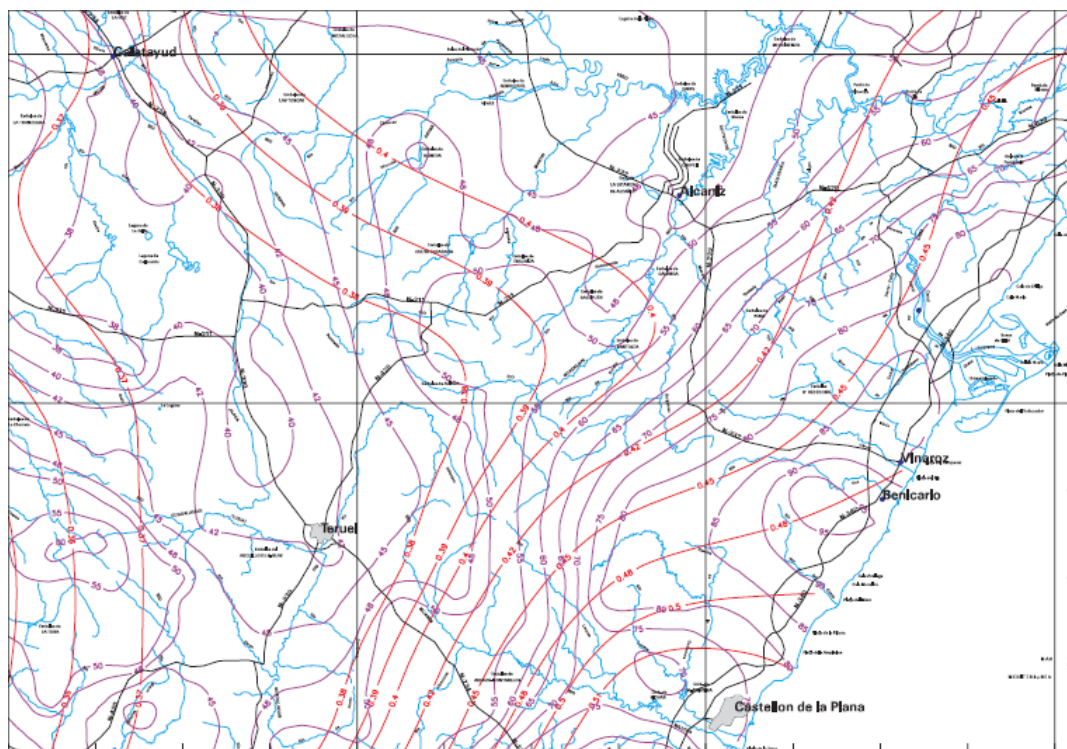


Figura A.2.4. Mapa de isolíneas del valor regional de la máxima precipitación diaria anual media \bar{P} y del coeficiente de variación Cv (CEDEX)

A pesar de existir el mapa de isolíneas regionalizado con los valores de precipitación diaria anual media \bar{P} , para el ajuste de la función de distribución SQRT-ET max se empleará el valor local de la media \bar{P} estimado exclusivamente a partir de la serie de datos de la estación AEMET de Morella, obteniendo de este modo un ajuste más realista.

De modo que la estimación de los cuantiles de precipitación asociados a distintos periodos de retorno se realizará a partir del coeficiente de variación C_v (obtenido del mapa de isolíneas de la publicación “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular”) y de la media local de la estación pluviométrica analizada previamente.

A.2.2.3.2. Aplicación del análisis a la cuenca del Bergantes

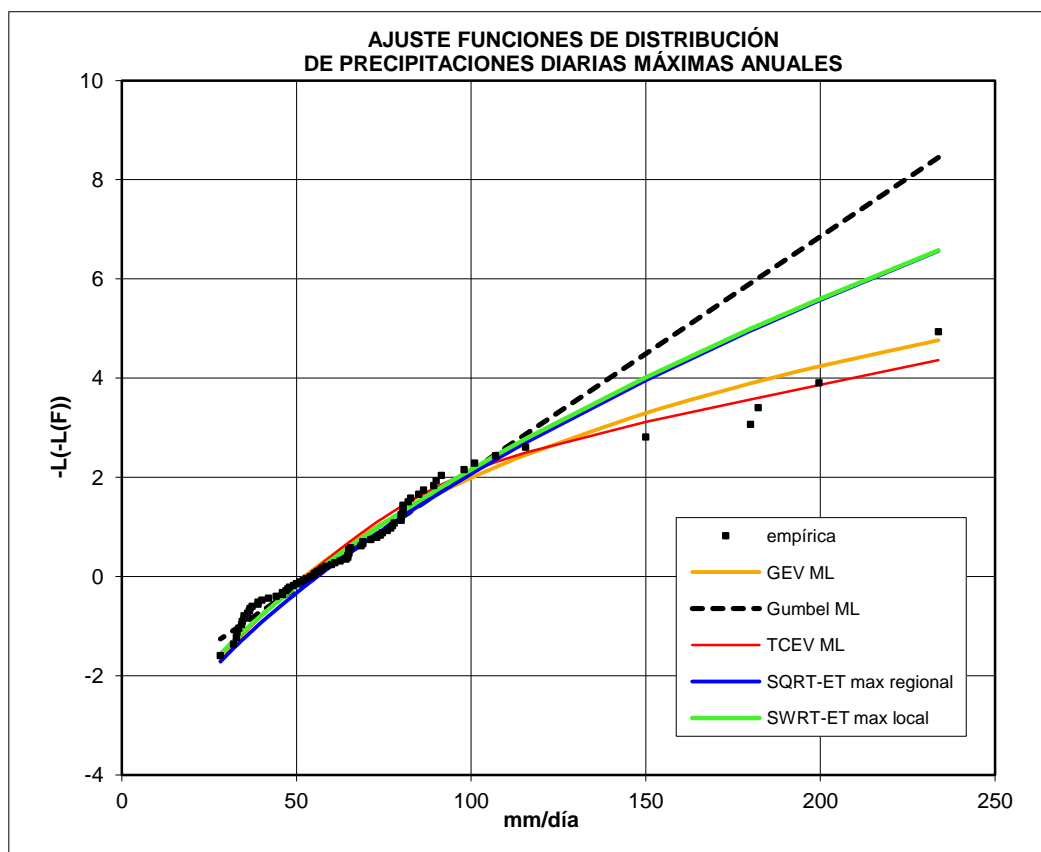
El cálculo de los parámetros de las distribuciones locales así como los cuantiles asociados a cada periodo de retorno se han calculado mediante el software AFINS 2.0 (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente de la Universidad Politécnica de Valencia).

A continuación se presentan los valores obtenidos para la serie de datos válidos registrados en la estación pluviométrica de Morella.

	Distribución	Parámetros				Verosimilitud
Análisis local	Gumbel	λ		θ		-287.778
		13.3882		0.0472380		
	GEV	X_0		α	β	-281.961
		52.2798		17.8351	-0.286828	
	TCEV	λ_1	θ_1	λ_2	θ_2	-281.177
		33.1604	0.0699825	0.391105	0.0146425	
	SQRT-ET max	K		α		-283.391
		101.982		0.826480		
Análisis regional	SQRT-ET	K		α		-
	max	127.249		0.8533751		

Tabla A.2.6 Parámetros de las funciones de distribución de máximos

En la figura siguiente se muestra el ajuste gráficamente:



Gráfica A.2.1 Comparación entre ajustes de funciones de distribución

Los cuantiles estimados asociados a distintos periodos de retorno para cada una de las distribuciones consideradas se muestran en la tabla siguiente:

		Cuantil de precipitación (mm)				
		Periodo de retorno T(años)				
		Distribución				
Análisis local	Gumbel	122.6	137.5	152.3	167	186.5
	GEV	145.7	180.5	222.7	274.1	359.6
	TCEV	155.4	202.4	249.7	297.6	358.1
	SQRT-ET max	126.9	146.7	167.7	190.2	220.9
Análisis Regional	SQRT-ET max	128.8	148.4	169.1	190.9	221.6

Tabla A.2.7. Cuantiles de precipitación diaria máxima de la estación AEMET de Morella

A.2.2.3.3 Discusión

Dado que los valores de verosimilitud proporcionados por la herramienta AFINS 2.0 son similares, se hará un primer descarte de aquellas funciones de distribución que queden del lado de la inseguridad.

En primer lugar, a la vista de los resultados y mediante el análisis de los ajustes representados, se observa que el modelo Gumbel claramente infraestima los cuantiles de retorno ligeramente superior a 25 años, quedando significativamente del lado de la inseguridad para periodos de recurrencia superiores a 100 años. De forma similar los ajustes de las funciones de distribución SQRT-ET max, tanto para el análisis local como regional, infraestiman los cuantiles de precipitación asociados a periodos de retorno elevados.

Se concluye, que los modelos que presentan gráficamente un mejor ajuste a la CDF Empírica son las distribuciones GEV y TCEV. Sin embargo, la función de distribución TCEV sobreestima los cuantiles de precipitación para periodos de retorno en torno a los 200 años y presenta, como principal inconveniente el elevado número de parámetros de la expresión, que aumenta la incertidumbre en la aproximación y disminuye la robustez del modelo.

Por los motivos expuestos, la función de distribución finalmente seleccionada es la GEV (General Extreme Value), capaz de representar fielmente los dos mecanismos distintos que se originan en las avenidas de los ríos mediterráneos.

A.2.2.4. CONCLUSIÓN

La siguiente tabla recoge los cuantiles de precipitación diaria máxima anual asociados a distintos periodos de retorno finalmente adoptados tanto para el cálculo de la intensidad media de precipitación, necesaria para el cálculo de caudales circulantes por el cauce del río Bergantes en el entorno de la Fábrica Giner, como para el diseño de las tormentas de proyecto.

Periodo de retorno T (años)	25	50	100	200	500
Pd máxima anual (mm)	145.7	180.5	222.7	274.1	359.6

Tabla A.2.8 Cuantiles de precipitación máxima anual

A.2.3. MODELO HIDROLÓGICO AGREGADO

A.2.3.1. INTRODUCCIÓN. JUSTIFICACIÓN DEL EMPLEO DEL MÉTODO

Para realizar el cálculo de los caudales punta de avenida se utiliza el Método Racional Modificado, al cual se le aplican las variaciones propuestas por J.R Témez en el XXIV Congreso de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (Madrid, 1991), tras experimentar en numerosas y variadas cuencas aforadas.

Respecto a la formulación del Método Racional contenida en la Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial, J.R. Témez modifica la obtención de la Precipitación Máxima Diaria, aplicándole un Factor Reductor de Lluvia, debido a la variabilidad espacial de las precipitaciones en cuencas de tamaños mayores a 1 km^2 ; e introduce un Coeficiente de Uniformidad temporal, dejando de aplicar la mayoración del 20% exigida en la Instrucción.

Para el resto del procedimiento, se respeta lo indicado en dicha Instrucción, en la que se menciona la utilidad de los métodos hidrometeorológicos para cuencas pequeñas y advierte de la pérdida de precisión en cuencas de gran tamaño, siendo la estimación de caudales menos correcta.

El límite de aplicación de este método está impuesto por el Tiempo de Concentración, debiendo estar comprendido en un intervalo entre 0,25 y 24 horas; y la Superficie de la cuenca de estudio que deberá ser superior a 1 km^2 e inferior a los 3000 km^2 .

La aplicación de este método para la obtención de los caudales pico de crecida en la zona de actuación está justificada, dado que las características de nuestra cuenca satisfacen las restricciones expuestas.

A.2.3.2. FORMULACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETEOROLÓGICO

El caudal pico de referencia Q asociado a un periodo de retorno en el punto de desagüe de la cuenca de estudio se obtendrá mediante la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot A \cdot I_t}{3,6} \cdot K$$

Donde:

Q : caudal en m^3/s

C : coeficiente medio de esorrentía de la cuenca o superficie drenada

A : Área de la cuenca en km^2

I_t : Intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y asociada a una duración t (tiempo de concentración) en mm/h

K : coeficiente de uniformidad temporal

A continuación se expone la obtención de cada uno de los factores influyentes en la determinación del caudal de referencia:

- **Tiempo de concentración t_c (h).** Éste parámetro se define como el intervalo de tiempo que tarda en llegar a la zona de estudio una gota de agua caída en el punto más lejano de la cuenca natural. Para su cálculo se ha utilizado la fórmula empírica de Temez.

$$t = t_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

Donde:

L : longitud del cauce principal, en km

J : pendiente media (m/m)

- **Coefficiente de uniformidad temporal K .** Tiene en cuenta el error introducido en la hipótesis de uniformidad temporal de la precipitación a medida que crece el tamaño de la cuenca.

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

Donde t_c es el tiempo de concentración.

- **Coefficiente de reducción areal o simultaneidad K_A .** Dado que los datos de precipitación P_d obtenidos son de puntos concretos de la cuenca, se pretende homogeneizar espacialmente dichos valores de precipitación aplicando un coeficiente corrector en aquellas cuencas de superficie mayor a 1 km^2 . Este coeficiente viene dado por la expresión:

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

Donde A es la superficie de la cuenca de estudio en km^2

- **Intensidad media I_t (mm/h).** Se podrá obtener la intensidad media de precipitación a emplear en la estimación de caudales de referencia por métodos hidrometeorológicos mediante la expresión de la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia:

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_t}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

Donde:

I_t : intensidad de precipitación en un intervalo de duración t igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h

I_d : intensidad media diaria, que es la intensidad de precipitación para una duración efectiva de la lluvia de un día, expresada en mm/h.

$$I_d = \frac{P_d}{24} = \frac{P_{d,0} \cdot K_A}{24}$$

P_d : la precipitación máxima diaria afectada por el coeficiente corrector K_A .

$P_{d,0}$: precipitación máxima diaria asociada a un determinado periodo de retorno.

I_1 : intensidad horaria de precipitación, en mm/h.

t : duración efectiva de la lluvia para la que se quiere calcular la intensidad, se tomará igual al tiempo de concentración t_c de la cuenca, se expresa en horas.

I_1/I_d : factor regional adimensional independiente del periodo de retorno que relaciona la intensidad máxima horaria con la diaria. También denominado factor de torrencialidad y puede obtenerse a partir del mapa de isolíneas proporcionado en MOPU (1990). Para la zona que nos ocupa se toma igual a 11.

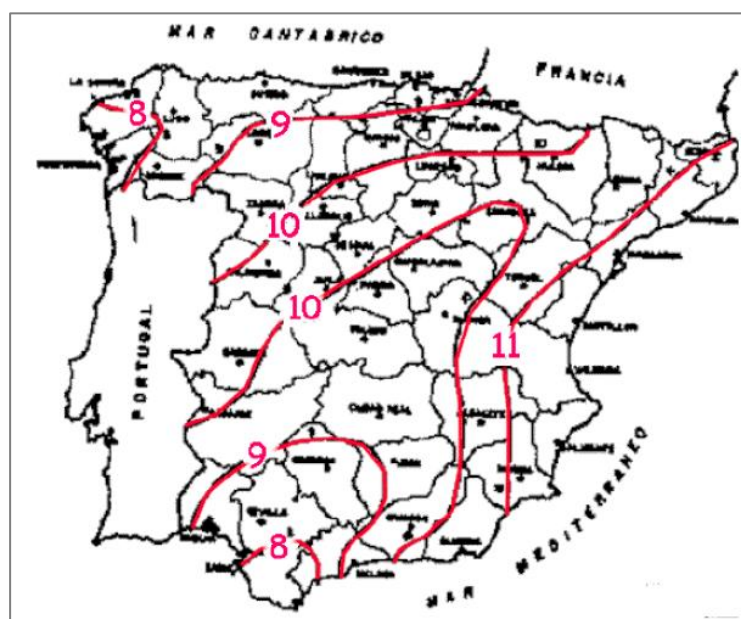


Figura A.2.4. Mapa de isolíneas del factor de torrencialidad I_1/I_d
(Instrucción 5.2 IC “Drenaje superficial”)

- **Coefficiente de escorrentía (C).** Si la razón P_d/P_o fuera inferior a la unidad, el coeficiente de escorrentía podrá considerarse nulo. En caso contrario, podrá obtenerse de la fórmula deducida por Témez a partir del método del SCS, adoptado por la instrucción de carreteras (MOPU 1990):

$$C = \frac{\left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) + 23 \right]}{\left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) + 11 \right]^2}$$

Donde:

P_d : volumen de precipitación diaria corregida (afectada por el coeficiente K_A de reducción areal) para un periodo de retorno determinado, en mm.

P_o : umbral de escorrentía corregido (afectado por el factor corrector que tiene en cuenta la condición inicial de humedad), en mm

El umbral de escorrentía es el parámetro del modelo de producción, que nos permite estimar la parte de precipitación que provocará escorrentía, es decir, la lluvia neta.

Este valor se encuentra tabulado en función del tipo de cubierta o uso del suelo, la pendiente (distinguiendo entre zonas con pendiente menor al 3% y superficies de pendiente mayor a este valor), las características hidrológicas y el tipo o grupo de suelo (A, B, C o D).

El umbral de escorrentía obtenido debe corregirse mediante un factor que tiene en cuenta la humedad antecedente del complejo suelo-vegetación. Este factor r está regionalizado en el mapa de valores proporcionado por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU, 1990). Existiendo una versión actualizada, basada en un contraste experimental, que corrige los valores propuestos por la Instrucción.

A.2.3.3 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA

El río Bergantes es un río de la Comunidad Valenciana y Aragón que nace en los Montes de Vallivana a cotas que alcanzan los 1270 m, en la comarca de Los Puertos de Morella (Provincia de Castellón). Desagua en el río Guadalope y su cuenca incluye la única parte de la Comunidad Valenciana que pertenece a la cuenca hidrográfica del Ebro, que finalmente desemboca en el Mar Mediterráneo.

La cuenca del río Bergantes considerada cuyo punto de desagüe se emplaza en el entorno de la Fábrica Giner, a una altitud de 757 m, tiene una superficie total de 54 km². El cauce principal tiene una longitud de unos 21.65 km.

A unos 10 km aguas abajo de su cabecera, el cauce principal cambia de alineación Norte a Oeste, aumentando a partir de este punto la amplitud de la cuenca. Seguidamente recibe por margen derecha las escorrentías de dos pequeños afluentes, los barrancos del Tint y La Peneya. Tras dejar por margen derecha la localidad de Morella, el cauce llega a las proximidades de la Fábrica Giner.

El caudal en los cauces de la cuenca de drenaje del río Bergantes presenta una alta variabilidad, tanto temporal como espacial. Los afluentes de cabecera discurren habitualmente casi secos, salvo en episodios de crecidas. Se considera régimen estacional a partir del municipio de Morella, y régimen ocasional aguas arriba de este núcleo, presentando únicamente pozas aisladas durante el verano.

Dentro de las múltiples características morfométricas que se pueden emplear para la definición de una cuenca vertiente, se han considerado principales las siguientes por su mayor relevancia y su necesidad en posteriores cálculos hidrológicos e hidráulicos:

- Superficie (S).
- Longitud del cauce principal (Lc).
- Máxima diferencia de cotas en el cauce principal (H).
- Pendiente media del cauce principal (J).

Además, para un análisis morfológico más completo de la cuenca se han obtenido los parámetros de forma comúnmente empleados en este ámbito:

- Índice de Gravelius.
- Factor de forma de Horton.
- Ratio de circularidad de Miller.

A.2.3.3.1. Metodología empleada para la obtención de las características morfométricas

Características morfométricas principales

Para la obtención de la superficie de la cuenca, la longitud del cauce principal y la máxima diferencia de cotas se ha empleado la herramienta *ArcGis*.

Haciendo uso de la fórmula empírica de Témez expuesta en el apartado anterior, se podrá obtener el Tiempo de Concentración t_c (horas), función de la longitud del cauce principal L_r (km) y de la pendiente media J_r (m/m).

Parámetros de forma

- Índice de Gravelius o Coeficiente de compacidad

Relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área igual a la de la cuenca:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde P es el perímetro (km) y A el área de la cuenca (km^2).

A mayor Coeficiente de Compacidad, mayor Tiempo de Concentración, por lo que cabe esperar que la magnitud de la escorrentía generada por una precipitación sea menor en cuencas con menor Coeficiente de Compacidad.

Coeficiente con valores en torno a la unidad para cuencas redondeadas, en la medida que se aleje de este valor la cuenca tenderá a ser más alargada.

- Factor de forma (Horton)

Relación entre el ancho medio de la cuenca (B) y la longitud de su cauce principal (L_c). El ancho medio se obtiene al dividir el área de la cuenca por la longitud del cauce principal, quedando el Coeficiente de Forma definido por:

$$K_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2}$$

- Ratio de circularidad de Miller (R_c)

Miller usó una razón circular adimensional, definida como la razón del área de la cuenca al área de un círculo que tiene el mismo perímetro de la cuenca.

$$R_c = \frac{A}{A_{\text{círculo}}} = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Donde P es el perímetro (km) y A el área de la cuenca (km^2).

A.2.3.3.2. Características morfométricas de la cuenca del río Bergantes

La tabla siguiente muestra las características morfométricas principales que definen la cuenca de estudio:

S (km^2)	Lc (km)	Δ COTA (H)	Jr (%)	t_c (h)
54.02	21.65	516.1	0.0238	6.32

Tabla A.2.9. Características morfométricas de la cuenca

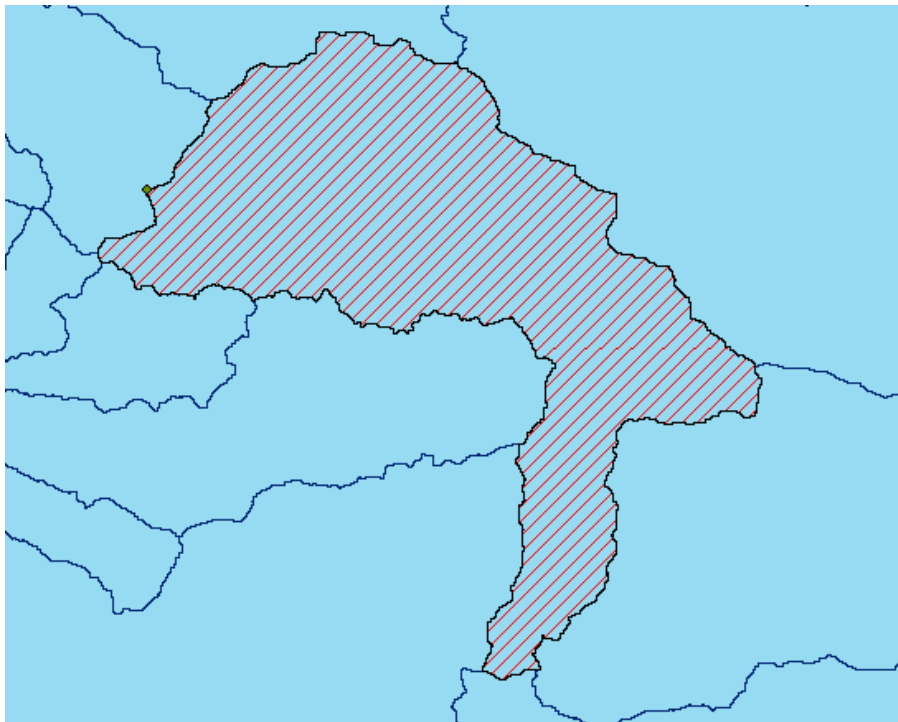


Figura A.2.5. Delimitación de la cuenca del río Bergantes

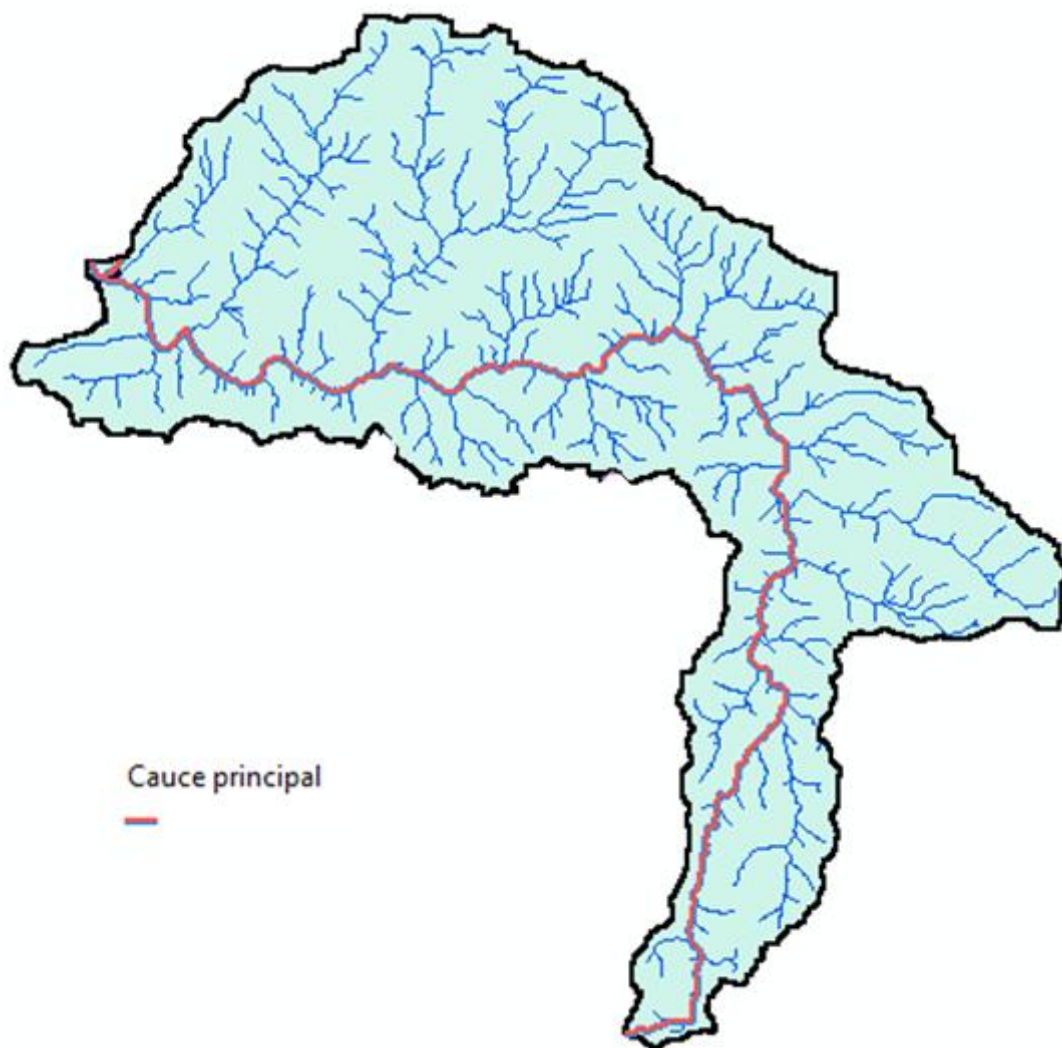


Figura A.2.6. Cauce principal de la cuenca del río Bergantes

Los valores para los factores de forma obtenidos se adjuntan a continuación, éstos confirman lo que visualmente se intuye, se trata de una cuenca de superficie no muy extensa pero notablemente alargada.

Área (km ²)	54.02
Perímetro (km)	49.27
Longitud del cauce principal (km)	21.65
Índice de Gravelius.	1.877
Factor de forma de Horton.	0.115
Ratio de circularidad de Miller	0.28

Tabla A.2.9. Factores de forma

A.2.3.4 MODELO DE PRODUCCIÓN

El umbral de escorrentía es el parámetro del modelo de producción, que nos permite estimar la parte de precipitación que provocará escorrentía, es decir, la lluvia neta.

El valor del umbral de escorrentía es función de:

- I. Tipo y uso del suelo.
- II. Grado de desarrollo de la cubierta vegetal.
- III. Pendientes del terreno.
- IV. Condiciones iniciales de humedad del complejo suelo-vegetación.

La relación entre el umbral de escorrentía y las tres primeras variables es de tipo tabular; los valores de escorrentía así calculados son en condiciones de humedad medias, lo que se denomina como AMC II (“*Antecedent Moisture Condition*”). Debiendo corregirse en función de la cuarta variable; a tal efecto el SCS define tres estados previos de humedad en el suelo: tipo II (medio), tipo I (seco) y tipo III (húmedo), en función de la precipitación de los cinco días anteriores, que determinan el factor corrector del valor anteriormente calculado.

Se ha adoptado, para la determinación del umbral de escorrentía P_0 , las tablas que aparecen en la Instrucción 5.2 IC de Drenaje Superficial (MOPU, 1990) para condiciones previas de humedad del suelo de tipo medio (adjuntadas en el Apéndice 2).

El umbral de escorrentía obtenido debe corregirse mediante un factor que tiene en cuenta la humedad antecedente del complejo suelo-vegetación. Este factor β está regionalizado en el mapa de valores proporcionado por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU, 1990). Existiendo una versión actualizada, basada en un contraste experimental, que corrige los valores propuestos por la Instrucción.

El mapa basado en el contraste experimental (proporcionado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia) es la adaptación más reciente, por lo que se empleará éste para obtener el valor corrector; que para la zona de estudio es $\beta = 2.05$.

La determinación del umbral de escorrentía se ha realizado mediante la superposición de los mapas correspondientes a cada una de las variables de las que depende (tipo del suelo, usos del suelo y pendientes) apoyándose en la utilización de los sistemas de información geográfica, en particular de la aplicación ArcGis.

La información utilizada para estimar las variables tipo y cubierta del suelo así como la pendiente del terreno se enumera a continuación:

I. Tipo del suelo: Mapas de litología y capacidad de uso del suelo a escala 1:50000 facilitados por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia.

II. Cubierta del suelo: Mapas uso del suelo a escala 1:500000 facilitados por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia.

III. Pendientes del terreno: Obtenidas a partir del procesamiento del Modelo de Elevación Digital del terreno.

A partir de los mapas enumerados anteriormente (presentados en el Apéndice 2) se ha obtenido el siguiente mapa del umbral de escorrentía P_0 :

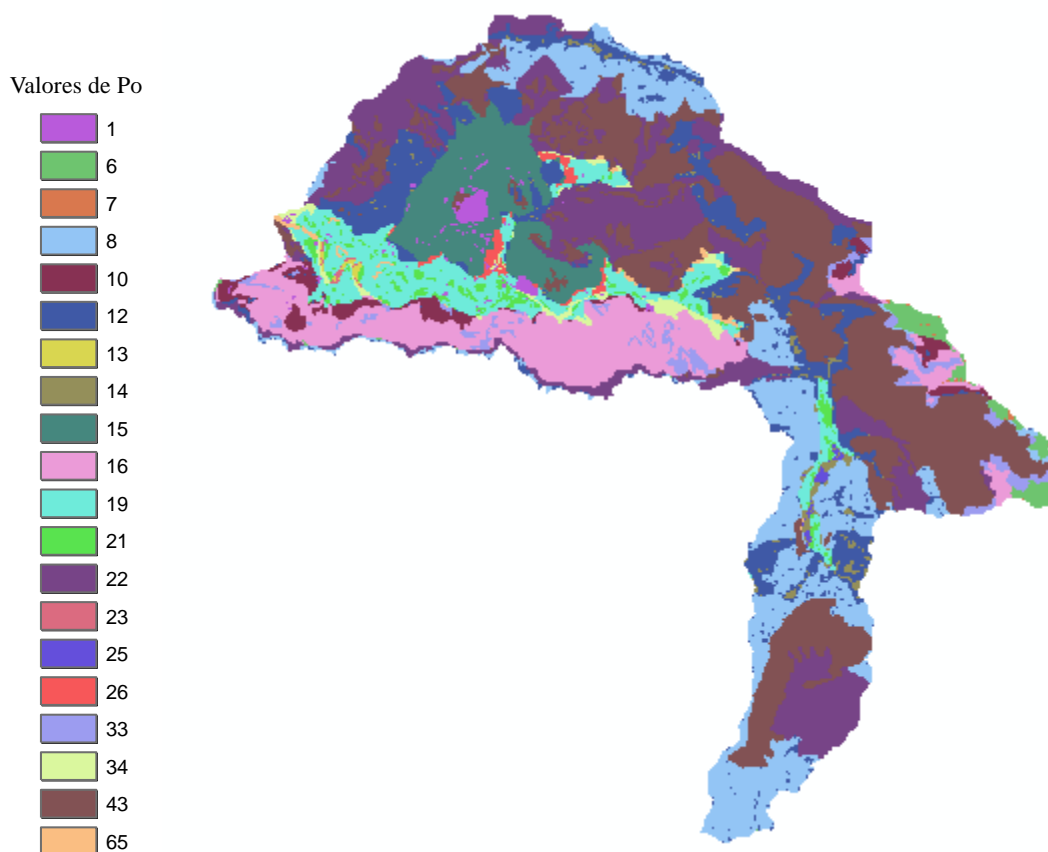


Figura A.2.7. Valores del umbral de escorrentía P_0 .

El valor medio ponderado del umbral de escorrentía P_0 de la cuenca del río Bergantes es 22.6 mm; asumiendo un coeficiente corrector de humedad de 2.05 (elección justificada previamente), el valor final de P_0 es 46.33 mm.

A.2.3.5. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL BERGANTES

A continuación se expone la obtención de cada uno de los factores influyentes en la determinación del caudal de referencia:

- Tiempo de concentración t_c (h)

$$t_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} = 0,3 \cdot \left(\frac{21.65}{0.0238^{1/4}} \right)^{0,76} = 6.32 \text{ horas}$$

- Coeficiente de uniformidad temporal K

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14} = 1 + \frac{6.32^{1.25}}{6.32^{1.25} + 14} = 1.417$$

- Coeficiente de reducción areal o simultaneidad K_A .

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15} = 1 - \frac{\log (54.02)}{15} = 0.8845$$

- Intensidad media I_t (mm/h) asociada a cada uno de los periodos de retorno.

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_t}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

Periodo de retorno T (años)	25	50	100	200	500
Pd (mm/d)	128.89	159.67	197.01	242.45	318.11
Id (mm/h)	5.37	6.65	8.21	10.1	13.25
It (mm/h)	17.3	21.4	26.5	32.6	42.7

Tabla A.2.10. Intensidades asociadas a distintos periodos de retorno

- Coeficiente de escorrentía (C).

$$C = \frac{\left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) + 23 \right]}{\left[\left(\frac{P_d}{P_o} \right) + 11 \right]^2}$$

Periodo de retorno T (años)	25	50	100	200	500
Coeficiente de escorrentía C	0.242	0.310	0.381	0.454	0.549

Tabla A.2.11. Coeficientes de escorrentía asociadas a distintos periodos de retorno T

A.2.3.6. RESULTADOS

El caudal pico de referencia Q en el punto de desagüe de la cuenca de estudio se obtendrá mediante la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot A \cdot I_t}{3,6} \cdot K$$

Los caudales circulantes por el cauce del río Bergantes en el entorno de la Fábrica Giner asociados a distintos periodos de retorno finalmente obtenidos a partir de los valores previamente calculados se muestran en la siguiente tabla:

Periodo de retorno T (años)	25	50	100	200	500
Caudal (m³/s)	89	141.3	214.4	314	498.6

Tabla A.2.12. Caudales asociadas a distintos periodos de retorno T

A.2.4. MODELO PSEUDO-DISTRIBUIDO

A.2.4.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es la construcción de un modelo hidrológico pseudo-distribuido que reproduzca fielmente la respuesta del sistema, con tal de obtener los hidrogramas de crecida, que proporcionan una mayor información del comportamiento del régimen de caudales en la cuenca del Bergantes durante los episodios de avenidas.

Se ha calibrado la condición de humedad inicial de diseño en el modelo pseudo-distribuido para la obtención de los caudales punta resultantes del método de Témez modificado. Para ello se ha empleado el software HEC-HMS 3.5, desarrollado por *U.S.Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*.

A continuación se exponen los fundamentos teóricos de las metodologías de simulación hidrológica empleadas, la caracterización y justificación del esquema conceptual finalmente adoptado de la cuenca del Bergantes, así como del resto de *inputs* del HEC-HMS necesarios para la obtención de los hidrogramas de crecida.

A.2.4.2. TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA

Modelo del SCS

El modelo de producción empleado ha sido el conocido como el Número de Curva del SCS (Soil Conservation Service). Aunque inicialmente este método fue diseñado para modelar el proceso lluvia-escorrentía diario, ha sido ampliamente utilizado para la simulación hidrológica continua. Su principal ventaja radica en su gran adaptabilidad a la modelación distribuida y su simplicidad al dar un procedimiento estandarizado para la asignación de los parámetros a partir de las características del terreno: datos edafológicos y de vegetación o usos del suelo.

El método del Número de Curva del SCS de los Estados Unidos fue desarrollado en 1954, siendo el producto final de investigaciones de campo exhaustivas llevadas a cabo a finales de 1930 y principios de 1940 (Singh y Frevert, 2002). Este es uno de los métodos más extendido y experimentado de los modelos empíricos para la estimación de los volúmenes de infiltración; su éxito se debe a que toma en cuenta, con un solo parámetro (si se asume la relación $P_0 - S$), las principales características de la cuenca que producen la escorrentía, como son la pendiente y el uso y tipo de suelo.

Este método presenta como ventajas su simple y fácil aplicación, su predictibilidad, estabilidad, y que es un método conceptual para estimar la esorrentía directa a partir de la precipitación (Ponce y Hawkins, 1996: citado por Singh).

El método se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera establece que la relación entre el volumen de esorrentía directa y la esorrentía potencial máxima, correspondiente a una superficie impermeable, es igual a la relación entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial.

La formulación de las hipótesis planteadas y la ecuación del balance hídrico se muestran a continuación:

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

$$P_0 = \lambda S$$

$$P = P_0 + E + F$$

Donde:

F : infiltración acumulada desde que comienza el encharcamiento en superficie.

E : esorrentía acumulada.

S : máxima infiltración acumulada posible.

P : precipitación acumulada.

P_0 : umbral de esorrentía.

De la combinación de las ecuaciones anteriores, determinamos la esorrentía acumulada:

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

A partir de los resultados de numerosas investigaciones basadas en análisis empíricos el SCS propone la siguiente relación entre P_0 y S :

$$P_0 \approx 0.2 S$$

Finalmente, el método asume la existencia de un umbral P_0 por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía, una vez la precipitación caída supera este umbral, que actúa como intercepción inicial, empieza el fenómeno de la escorrentía de superficie. Con lo cual la escorrentía acumulada queda en función de un único parámetro, el umbral de escorrentía P_0 :

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

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

Una vez calculado el umbral de escorrentía P_0 , el cálculo del hietograma neto lo realiza directamente el programa HEC-HMS una vez que le facilitamos el número de curva (CN), parámetro a partir del cual fue desarrollada la formulación original del SCS; el CN es un número entero que varía entre 0 (superficies sin escorrentía) y 100 (superficies impermeables). La relación existente entre CN y P_0 es biunívoca:

$$CN = \frac{5080}{P_0 + 50.8}$$

Siendo P_0 el umbral de escorrentía expresado en mm.

A.2.4.3. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA

A.2.4.3.1 División y descripción de subcuencas

Para una correcta modelización del comportamiento de la cuenca del Bergantes durante los episodios de crecidas, en primer lugar se realiza la división de la misma en una serie de subcuencas. La elección del número y delimitación de las subcuencas tiene como objetivo obtener un modelo conceptual conjunto de la cuenca de estudio que se aproxime lo máximo posible a la realidad. El esquema pseudo-distribuido finalmente adoptado se compone de 4 subcuencas.

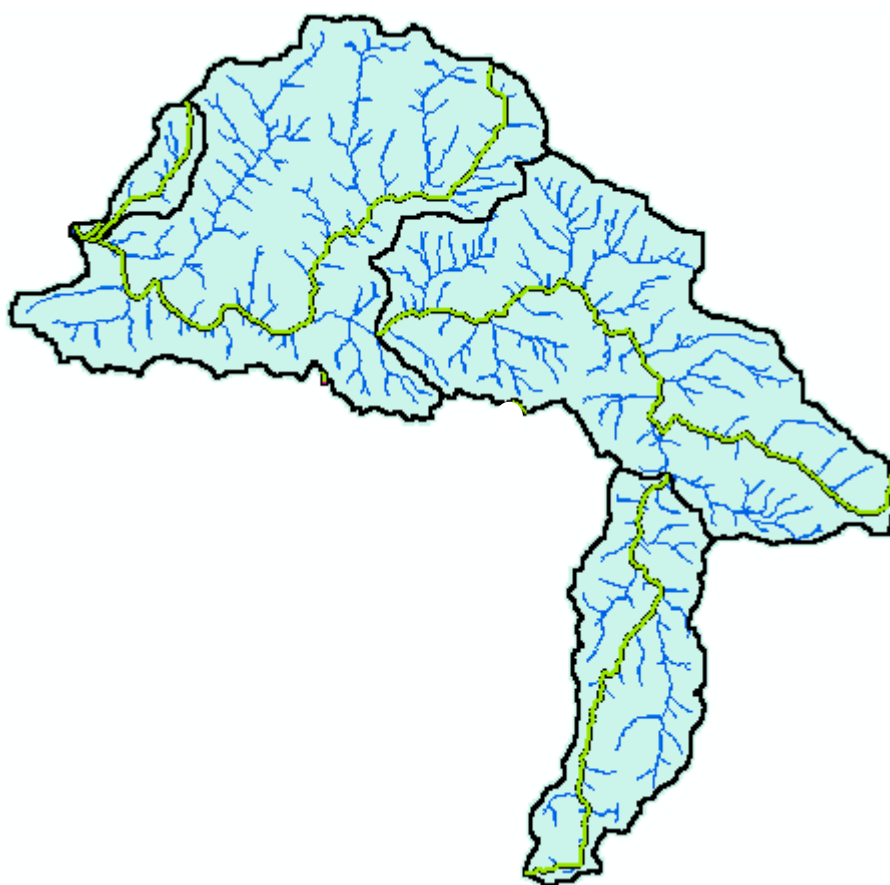


Figura A.2.8 Delimitación y cauce principal de las subcuencas

- Subcuenca SC1: es la subcuenca de cabecera, que incluye el nacimiento del río Bergantes. En la confluencia del barranco Bergantes con el barranco de la Masa, da comienzo la denominación del Bergantes como río. Su punto de desagüe se sitúa aguas arriba de la confluencia con el barranco de Mesiana, dejando el Mas de la Torreta por margen izquierda y la Masía del Coll por margen derecha.

- Subcuenca SC2: la extensión de la subcuenca ocupa desde el desagüe de la subcuenca de cabecera hasta la Font del Àguila. A lo largo cauce principal existen distintos afluentes que realizan aportaciones al río Bergantes, entre los que podemos destacar (por orden de confluencia): el barranco de Mesiana y dels Camps, la fuente de Colomé, seguida por el barranco d'en fornós, la fuente del Moreno y el barranco de Almoina, finalizando en la Font del Àguila, ya mencionada como punto de desagüe de la SC2.
- Subcuenca SC3: es la subcuenca de mayor extensión, aunque su superficie no difiere en gran medida de la subcuenca SC2 que la precede. Se extiende hasta la confluencia con un pequeño afluente situado en la margen derecha del río, en el entorno de la Fábrica Giner. Incluye una serie de tributarios: barranco de la Coleta que confluye con el barranco del Mas del Prat y seguidamente con el barranco de la Pedrera y, por último con la Font Fontanella que desemboca directamente al río Bergantes. Aguas abajo, dejando atrás la localidad de Morella, existe otro importante tributario, el barranco de la Penella. Los nacimientos de los barrancos mencionados delimitan la zona Norte de la cuenca de estudio.
- Subcuenca SC4: es la subcuenca de menor extensión y corresponde a la superficie drenante del afluente situado en la margen derecha del río en las proximidades de la Fábrica Giner. El desagüe de esta cuarta subcuenca es la misma confluencia con el río Bergantes, cuyo emplazamiento se sitúa a escasos metros del complejo arquitectónico de la Fábrica. Es por ello que se ha optado por su delimitación independiente, pues el afluente se sitúa en la zona de actuación y su comportamiento hidráulico condicionará las intervenciones a realizar, siendo conveniente su análisis de manera aislada.

A.2.4.3.2 Características morfométricas de las subcuencas

Dentro de las múltiples características físicas que se pueden emplear para definir una cuenca hidrológica, incluimos en este estudio, para cada una de las subcuencas las siguientes:

- Superficie (S).
- Longitud del cauce principal (L_{rp}).
- Máxima diferencia de cotas en el cauce principal (H).
- Pendiente media del cauce principal (J_{rp}).

Una vez realizada la delimitación de las subcuencas mediante la herramienta *ArcGis*, en concreto empleando la extensión HEC-GeoHMS, se han obtenido las características morfométricas de cada una de las subcuencas siguiendo el procedimiento análogo ya realizado previamente en el modelo agregado para la obtención de las características de la totalidad de la cuenca de estudio. Del mismo modo que anteriormente, se recurre a la fórmula empírica de Témez para el cálculo del tiempo de concentración t_c (horas).

	S (km ²)	L _{rp} (km)	J _{rp} (m/m)	t _c (h)
SC1	8.98	8.01	0.159723	2.1
SC2	20.79	11.3	0.053166	3.3
SC3	22.88	10.9	0.046804	3.3
SC4	1.37	2.85	0.103166	1.0

Tabla A.2.13. Características morfométricas y t_c de las subcuencas

A.2.4.4. OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO DE PRODUCCIÓN

El umbral de escorrentía es el parámetro del modelo de producción (cuyos fundamentos se han expuesto previamente), que nos permite estimar la parte de precipitación que provocará escorrentía, es decir, el hietograma neto.

El valor del umbral de escorrentía es función del tipo y uso del suelo, desarrollo de la cubierta vegetal y la pendiente del terreno; existiendo una relación tabular con estas tres variables que nos proporciona el valor de P_0 en condiciones medias de humedad. Sin embargo se debe tener en cuenta una cuarta variable: las condiciones iniciales de humedad del complejo suelo-vegetación.

La determinación del umbral de escorrentía de cada una de las subcuencas, debiéndose haber realizado anteriormente la delimitación de éstas, se ha obtenido mediante la superposición de los mapas correspondientes a cada una de las variables de las que depende tabularmente, mediante el empleo de la herramienta *ArcGis* que permite realizar estas operaciones de forma automática y considerablemente precisa.

La estimación del coeficiente corrector que tiene en cuenta la condición de humedad inicial se realizará a partir la comparación entre los valores del umbral de escorrentía obtenidos para condiciones medias de humedad con la herramienta ArcGis con los calibrados con el software HEC-HMS 3.5 para la obtención de los caudales punta resultantes del método de Témez

A continuación se adjunta una tabla con los valores del umbral de escorrentía P_0 obtenidos para condiciones medias de humedad.

	P_0 (mm)
SC1	18.79
SC2	27.59
SC3	19.44
SC4	25.59

Tabla A.2.14 Umbral de escorrentía para condiciones medias de humedad

A.2.4.5. MODELO DE PROPAGACIÓN

A.2.4.5.1. Modelo de propagación a nivel de subcuenca

El proceso de transformación lluvia neta en escorrentía superficial en todas las subcuencas ha sido modelado en términos de la teoría lineal de los sistemas hidrológicos, empleando hidrogramas unitarios para la representación de la respuesta hidrológica, es decir, de la escorrentía directa que resulta de una lluvia efectiva unitaria (lluvia neta de volumen unitario) distribuida homogéneamente sobre la cuenca y constante sobre una unidad de tiempo. En concreto, la duración seleccionada es de 10 minutos, dicha elección viene condicionada por el paso temporal de cálculo empleado en la simulación. La formulación adoptada, así como la elección de los valores de parámetros como la duración de la lluvia neta, se han basado en las recomendaciones del SCS.

Se considera, por tanto, que la totalidad de la cuenca vertiente responde como un sistema lineal transformador de inputs de lluvia neta (hietogramas) en outputs de caudales (hidrogramas), de manera que el hidrograma $Q(t)$ producido por la

transformación de lluvia neta $i_e(t)$ es calculado por medio de la clásica convolución matemática:

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

El hidrograma unitario fue propuesto por Sherman (1932), y desde entonces es el procedimiento más frecuentemente utilizado para calcular los hidrogramas de avenidas, siendo recomendada su aplicación en cuencas de tamaño medio. En cuencas no aforadas en las que no existe registro de datos de caudales, como es el caso de la cuenca de estudio, se utilizan HU sintéticos.

Un HU sintético es aquel derivado de fórmulas empíricas, que se puede utilizar en cuencas donde no existen datos de aforos. En general, tratan de establecer el tiempo base y el tiempo al pico de este hidrograma en función de variables geomorfológicas de la cuenca vertiente, cuyo valor es fácilmente obtenible a partir de datos hidromorfométricos.

El programa HEC-HMS nos permite seleccionar entre distintos hidrogramas unitarios:

- Hidrograma Unitario especificado por el usuario.
- Hidrograma Unitario de Snyder.
- Hidrograma Unitario de Clark.
- Hidrograma Unitario Adimensional del Soil Conservation Service

Siguiendo con la metodología propuesta por el SCS, el hidrograma elegido ha sido el HU adimensional del SCS (1972), basado en un hidrograma adimensional obtenido empíricamente del análisis de un elevado número de cuencas rurales de reducido tamaño; precisa como único parámetro el tiempo de desfase de la punta, a partir del cual se calcula el tiempo de punta y el caudal punta.

En el HU adimensional tanto el caudal como el tiempo se expresan como cociente del caudal pico y el tiempo al pico, es decir, se representa gráficamente en ordenadas la relación $\delta_{\Delta t}(t)/Q_P$ y en abscisas la relación t/t_P .

Según las recomendaciones del SCS, el caudal punta se estima en función del t_p a partir de la siguiente expresión:

$$Q_p = \frac{A}{4.8 t_p}$$

Donde:

Q_p : caudal punta (en m^3/s)

A : área de la cuenca (en km^2)

t_p : tiempo al pico (en horas)

El tiempo al pico t_p puede calcularse a partir del tiempo de desfase a la punta (t_{dp}) como:

$$t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{dp}$$

Donde:

Δt : intervalo de tiempo computacional (en horas)

t_{dp} : tiempo de desfase entre picos (en horas)

El SCS en estudios realizados posteriormente a la formulación original, propone la estimación del t_{dp} (diferencia de tiempos entre el centro del hietograma de lluvia eficaz y el pico del hidrograma) a partir del tiempo de concentración de la cuenca o, en su caso, de la subcuenca de estudio, como $0.6 \cdot t_c$. Para la reproducción de una respuesta más rápida de la cuenca, generalmente, se estima el tiempo entre picos como $0.35 \cdot t_c$.

La elección de la duración del intervalo de tiempo computacional se basa en la recomendación del SCS, que propone para una correcta simulación que el Δt seleccionado sea inferior al 29% del t_{dp} .

Por tanto, el tiempo de desfase entre picos es de 2.2 horas y la duración del intervalo de tiempo computacional seleccionada es de 10 minutos.

A.2.4.5.2. Modelo de propagación de cauces

El análisis de un sistema hidrológico empleando un modelo pseudo-distribuido requiere, en primer lugar, la división en subcuencas, nudos de conexión y tramos de cauce que hagan efectiva la conectividad entre dichas subcuencas permitiendo la adecuada suma de los hidrogramas de crecida en los nudos, y su propagación en los distintos tramos de la red fluvial.

Este último componente del análisis del sistema hidrológico estima el movimiento de la onda de crecida a través del sistema fluvial, que va modificando su forma y el tiempo de punta debido a los efectos de almacenamiento y fricción.

Existen dos tipologías generales de cálculo de la propagación de hidrogramas en cauces: métodos hidrológicos y métodos hidráulicos. Los métodos hidráulicos resuelven las ecuaciones diferenciales del flujo transitorio en cauces abiertos, en tanto que los métodos hidrológicos, más simples, generalmente emplean la ecuación de continuidad y las relaciones existentes entre el caudal circulante y el volumen almacenado.

De entre los distintos métodos de propagación en cauces que permite emplear el programa HEC-HMS, se ha seleccionado para modelar la propagación del hidrograma de crecida a través del cauce principal de la red de drenaje, el método de Muskingum (US. ARMY, 1981). Los fundamentos de este método se presentan a continuación.

A.2.4.5.2.1. Fundamentos del Método de Muskingum

Este método, es el más empleado en hidrología, es un método de tránsito agregado de crecidas en cauces basado en una adaptación de la ecuación de continuidad. El método modela el almacenamiento volumétrico de la crecida en unos tramos de cauce mediante la combinación del almacenamiento en prisma y en cuña.

Durante el avance de la onda de crecida, el caudal que entra en un tramo de río es mayor que el que sale, resultando el almacenamiento en cuña positivo; por el contrario en la fase de recesión de la crecida el caudal de salida es mayor que el de entrada y la cuña es negativa. Adicionalmente a este almacenamiento en cuña, existe el denominado almacenamiento en prisma formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del cauce del tramo de propagación.

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 será igual a $K \cdot Q$ siendo K 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 del almacenamiento por cuña modelado. La ecuación del almacenamiento total, suma de ambos será:

$$S = K [XI + (1 - X)Q]$$

Donde:

Q : caudal de salida del tramo de cauce considerado.

I : caudal de entrada al tramo de cauce considerado.

K : Con dimensiones de tiempo (horas), tiene el sentido de tiempo de viaje de la onda de crecida a lo largo del tramo. En definitiva K es un coeficiente de almacenamiento y en general es difícil de obtener si no se poseen hidrogramas de entradas y salidas en un tramo. El parámetro K (s) resulta del cociente entre la longitud del tramo L (m) y la velocidad media del flujo o celeridad de la onda c (m/s).

X : Coeficiente adimensional de forma del cauce que determina el grado de laminación del hidrograma a lo largo del tramo. Indica en qué tramo del cauce se produce el control hidráulico y toma valores que oscilan entre 0 (almacenamiento tipo embalse, directamente relacionado con el caudal de salida) y 0.5 (traslación de la onda sin atenuación en canal, cuña totalmente desarrollada). En cauces naturales, X se encuentra entre 0 y 0.3. En cualquier caso el modelo es muy poco sensible al valor de este parámetro (Ven Te Chow.). En este estudio se ha adoptado un valor medio $X=0.2$.

Por tanto el método de Muskingum asume una relación lineal entre el volumen almacenado en el tramo y los caudales entrantes y salientes, mediante los parámetros K y X . Estos parámetros varían con el caudal pero suelen considerarse constantes tomando el sentido de unos valores medios.

La ecuación de continuidad con discretización centrada puede expresarse como:

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

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

$$Q_{t+1} = C_0 I_{t+1} + C_1 I_t + C_2 O_t$$

Donde:

$$C_0 = \frac{(\Delta t/K - 2X)}{2(1 - X) + (\Delta t/K)}$$

$$C_1 = \frac{(\Delta t/K + 2X)}{2(1 - X) + (\Delta t/K)}$$

$$C_2 = 1 - C_0 - C_1$$

A.2.4.5.2.2 Aplicación del método de Muskingum en HEC-HMS

El modelo HEC-HMS requiere de tres parámetros para modelar la laminación en un tramo de propagación mediante el método de Muskingum: K y X (descritos anteriormente) y el número de subtramos.

El número de subtramos o número de pasos (n) es el número de escalones o embalses lineales considerados. Es adimensional y se recomienda estimarlo como el cociente entre el tiempo de viaje de la onda a través del tramo de propagación y el lapso de tiempo computacional.

$$N = \frac{C}{\Delta t}$$

El parámetro K se obtiene del cociente entre la longitud del tramo de propagación y la celeridad de la onda.

$$K = \frac{L_{rp}}{C}$$

Donde: K(s), Lrp (m), C (m/s)

Para la obtención de los hidrogramas en la cuenca del río Bergantes se ha asumido una velocidad promedio de la onda de avenida de 1 m/s.

Por tanto, los resultados obtenidos para los dos tramos de propagación de la cuenca son:

	<i>X</i>	<i>K</i>	<i>n</i>
TRAMO 1	0.2	2.2	10
TRAMO 2	0.2	1.6	8

Tabla A.2.15 Parámetros del método de Muskingum

A.2.4.6. TORMENTAS DE DISEÑO

Para la correcta obtención de los hidrogramas haciendo uso de los modelos hidrológicos existentes en la actualidad, no basta con conocer la precipitación máxima de una tormenta, sino que se requiere conocer la evolución de esa precipitación a lo largo del episodio de tormenta. Esta distribución temporal de la lluvia se ha llevado a cabo mediante el método de los bloques alternos (alternating block method, Chow et al. 1994).

A.2.4.6.1 Método de los bloques alternos

El método de bloques alternos permite desarrollar de forma simple un hietograma de diseño utilizando una curva IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia). La distribución temporal de la lluvia según el método de los bloques alternos se basa en asumir, para cualquier intervalo de tiempo la intensidad media más desfavorable.

El proceso de cálculo de la tormenta por bloques alternos, para un periodo de retorno determinado se describe a continuación:

En primer lugar se fijan n intervalos de tiempo de duración Δt , de manera que la duración total de la tormenta sea igual a $n \cdot \Delta t$. Seguidamente se obtienen, a partir de la curva IDF empleada, las intensidades de precipitación correspondientes a cada una de las duraciones, $i(k \Delta t)$.

El valor de intensidad correspondiente a cada uno de los n bloques que conforman la tormenta se define de la siguiente forma:

$$b_1 = i(\Delta t), \dots, \frac{b_1 + b_2}{2} = i(2\Delta t), \dots, \frac{\sum_{j=1}^{k-1} b_j}{k} = i(k\Delta t)$$

Por lo que la intensidad correspondiente a un bloque k de los n bloques que definen la tormenta, resulta:

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

Finalmente 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 de derecha a izquierda del bloque central. En el caso de que el número n de bloques sea par, se colocará el bloque de mayor intensidad en la posición “ $n/2$ ”, ya que el presentarse la punta de precipitación de manera adelantada suele producir los caudales de escorrentía mayores.

A.2.4.6.2 Tormentas de proyecto para la cuenca del Bergantes

Con las premisas expuestas, se han construido, para cada periodo de retorno considerado, tormentas de proyecto por el método de los bloques alternos de una duración de 12 horas en intervalos quinceminutales.

La elección de una duración de 12 horas viene justificada por el hecho que éste es el valor múltiplo de 6 inmediatamente superior al tiempo de concentración de la cuenca de estudio, siendo esta segunda condición un requisito indispensable para la correcta modelación del comportamiento de la cuenca.

La discretización temporal seleccionada es de 15 minutos de duración, valor inferior a $0.2 \cdot t_c$ de la cuenca e inferior a 30 minutos (máximo recomendado para eventos de crecidas). El mínimo viene condicionado por la precisión de los instrumentos de medida a partir de los cuales se han obtenido los datos pluviométricos, siendo la duración mínima, habitualmente, 5 minutos.

Dado que se asume simultaneidad temporal de la precipitación en la totalidad de la cuenca, los cuantiles de precipitación máxima anual asociados a los distintos periodos de retorno deben corregirse mediante el factor de reducción areal K_A (ya especificado en la metodología de Témez) para su posterior utilización en la expresión de Témez para la curva IDF.

En el Apéndice 3 se adjuntan todas las tormentas de proyecto calculadas para los diferentes periodos de retorno. A modo de ilustración se adjunta la representación gráfica de la tormenta de proyecto para periodo de retorno de 200 años.

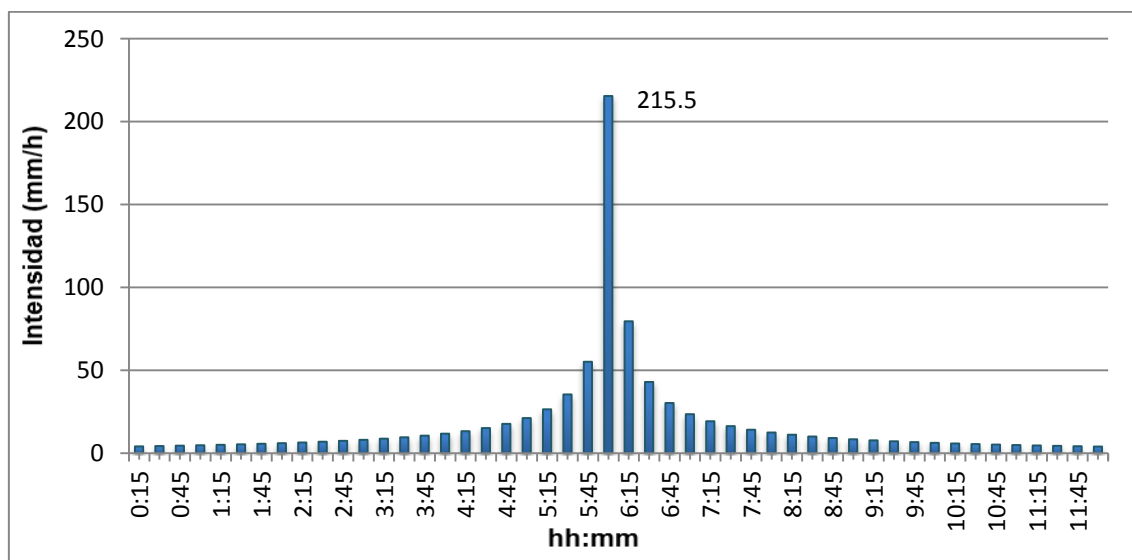


Figura A.2.9 Tormenta de diseño para $T=200$ años

A.2.4.7. SIMULACIONES

A.2.4.7.1. Calibración del modelo pseudo-distribuido

La condición inicial de humedad del complejo suelo-vegetación es una variable del sistema hidrológico que afecta de forma directa a los valores que adopta el umbral de escorrentía, por lo que debe ser tenida en cuenta en los estudios de crecidas. Su incidencia en el proceso lluvia-escorrentía en la cuenca es determinante, sin embargo su estimación a nivel de diseño presenta dificultades, aún disponiendo de eventos registrados en la cuenca de estudio.

En la metodología del Método Racional Modificado por Témez este factor corrector β queda comprendido en el coeficiente de escorrentía C , cuya formulación ha sido obtenida experimentalmente por calibración del método en numerosas estaciones de aforo españolas, de este modo el posible error en la estimación del coeficiente β queda compensado por la propia formulación; esto implica que su extrapolación a otras metodologías de diseño hidrológico resulta inadecuada.

Las características de la cuenca objeto de estudio nos aseguran la idoneidad del Método Racional Modificado, por lo que los resultados obtenidos se pueden emplear para la calibración del modelo pseudo-distribuido basado en la convolución de la tormenta de diseño con HU que emplea como modelo de producción el del SCS. De este modo se modifica el valor del umbral de escorrentía P_0 obtenido mediante la superposición de los mapas correspondientes a cada una de las variables de las que depende tabularmente, mediante el empleo de la herramienta ArcGis (correspondiente a condiciones medias de humedad) hasta forzar a que el pico del hidrograma resultante de la convolución coincida con el obtenido aplicando la metodología de Témez.

A partir de las premisas expuestas se ha realizado un proceso iterativo en el que se modifica en primer lugar el valor del coeficiente β a partir del cual se obtiene el valor del umbral de escorrentía corregido y el número de curva asociado a éste (existe una relación biunívoca entre ambos parámetros), ambos inputs requeridos para la simulación en el HEC-HMS. El proceso de iteración finaliza con la obtención de un hidrograma de crecida en la Fábrica (punto de desagüe de la cuenca analizada) cuyo pico se aproxime en la medida de lo posible al obtenido con el método de Témez Modificado.

El incremento del coeficiente corrector es comparativamente inferior en periodos de retorno elevados, es decir, los valores que adopta el coeficiente corrector tienden a una asíntota horizontal a medida que aumenta el periodo de retorno. Partiendo de estos

resultados, se ha pretendido caracterizar dicha corrección con un único parámetro de modo que la diferencia entre los resultados obtenidos en HEC-HMS y los de Témez para periodos de retorno elevados sea mínima.

A.2.4.7.2. Aplicación a la cuenca del Bergantes

A continuación se presentan los componentes principales del sistema para la cuenca drenante por el Bergantes hasta la Fábrica Giner introducidos en el software HEC-HMS.

Modelo de cuenca

Mediante esta herramienta se introducen en el modelo todos los elementos y sus parámetros asociados para definir el sistema hidrológico: subcuencas, tramos de propagación, fuentes y sumideros. A continuación se muestra el esquema conceptual pseudo-distribuido importado directamente desde el *ArcGis* al *HEC-HMS*.

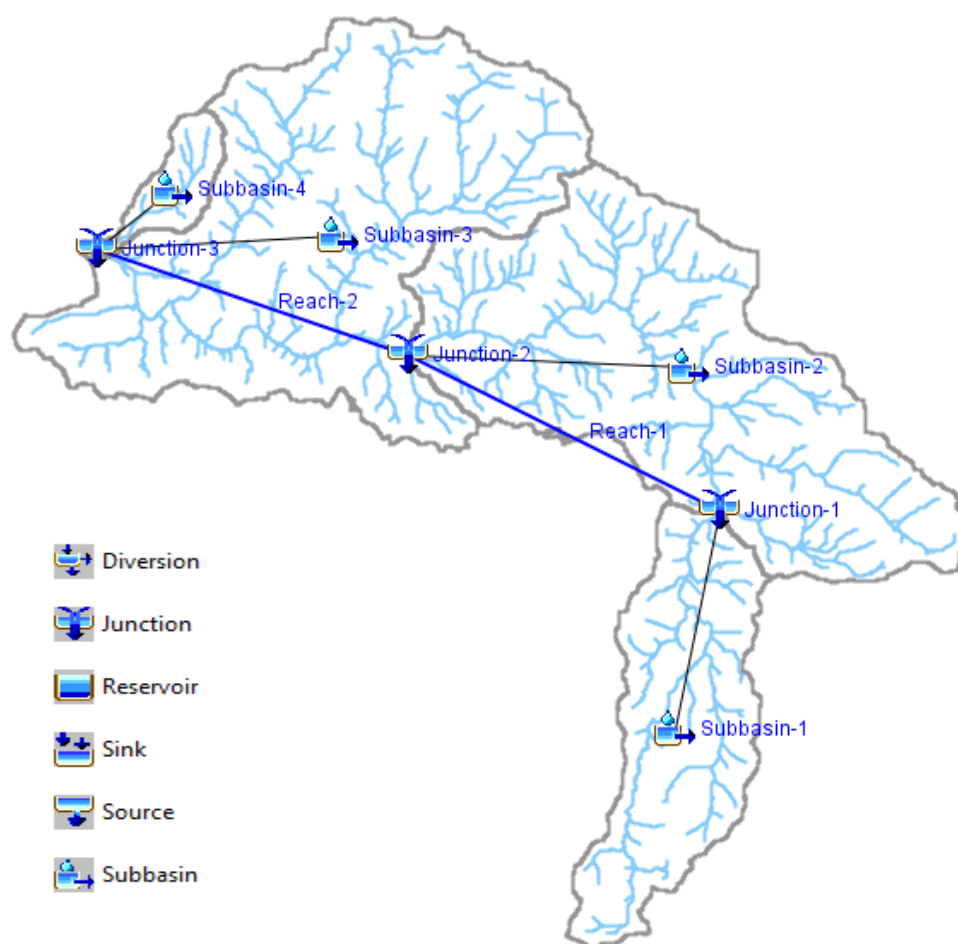


Figura A.2.10. Esquema pseudo-distribuido

Modelo meteorológico

Es la herramienta mediante la que se implementa el análisis de los datos meteorológicos. Haciendo uso de la componente de precipitación se introducen las tormentas de diseño asociadas a los distintos periodos de retorno previamente construidas por el método de bloques alternos, especificando el hietograma a introducir y la duración del episodio de tormenta.

En el caso de nuestra cuenca de estudio, dada su reducida extensión, se implementa simultáneamente la misma tormenta en las cuatro subcuencas.

Parámetros de control de la simulación

Mediante esta herramienta se introducen los parámetros temporales para la simulación:

- Fecha y hora de inicio de la simulación
- Fecha y hora del final de la simulación
- Lapso de tiempo computacional

Los componentes básicos de la modelación mediante HEC-HMS son:

- Modelo de producción: los modelos que se ofrecen son variados, en este estudio se ha optado por el Modelo del SCS.
- Modelo de transformación lluvia-escorrentía: entre las distintas opciones expuestas anteriormente se ha utilizado el Hidrogramas Unitarios del SCS.
- Flujo Base: el programa permite considerar el flujo base del cauce, esta posibilidad no ha sido empleada.
- Modelo de Propagación en cauces: el escogido ha sido el modelo Muskingum, cuyos fundamentos teóricos se han expuesto previamente.

A.2.4.8 CONCLUSIÓN

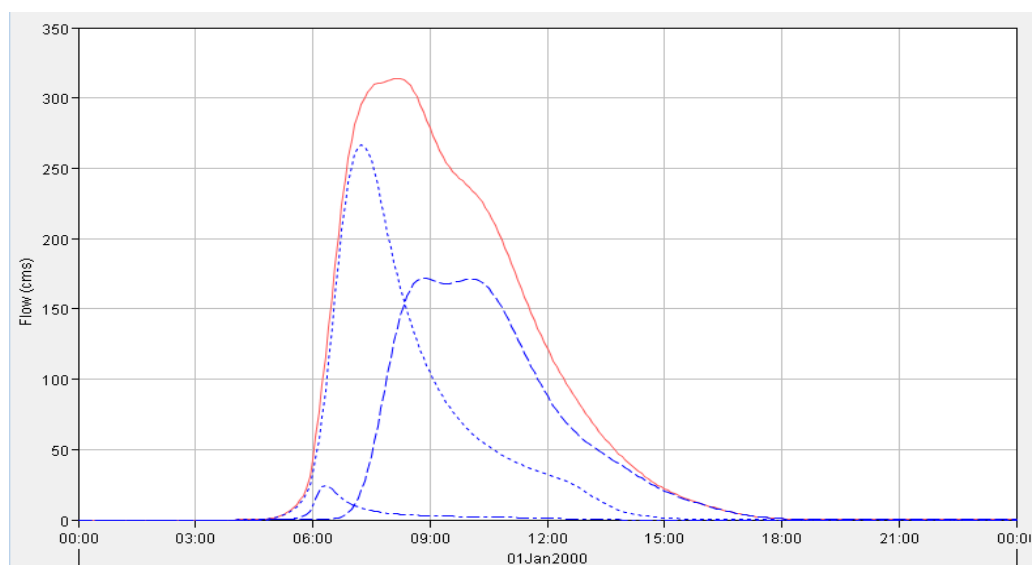
Las dimensiones de la cuenca del río Bergantes, su carácter rural y la ausencia de barreras transversales a lo largo del cauce capaces de actuar como elementos laminadores trascendentales, permiten el empleo de un modelo lluvia-escorrentía agregado como el de Método Racional modificado por Témez, especialmente recomendable para cuencas de estas características por tratarse de un método calibrado.

Sin embargo, para obtener una mayor información sobre el comportamiento del sistema hidrológico ante episodios de avenidas y de este modo plantear las actuaciones idóneas para solucionar la problemática de inundaciones existente en el entorno arquitectónico de la Fábrica Giner, se ha recurrido a la modelación pseudo-distribuida calibrada a partir de los caudales punta obtenidos con el modelo agregado de la cuenca.

La obtención de los hidrogramas se ha realizado con el programa *HEC-HMS* desarrollado por el Army Corps of Engineers de los EE.UU, empleando para ello el proceso iterativo mencionado hasta la convergencia de los caudales pico de los hidrogramas de crecida en la Fábrica (punto de desagüe de la cuenca analizada) con los obtenidos anteriormente por el método de Témez Modificado.

Calibrado el modelo, se obtienen los hidrogramas de avenida necesarios para el estudio hidráulico en el que se analizan los dos escenarios más desfavorables, el primero en el que el caudal pico circula por el cauce del río Bergantes, y un segundo escenario en el que circula por el afluente Margen Derecha.

A continuación a modo de ilustración se presenta el hidrogramas para periodo de retorno $T = 200$ años en las proximidades de la Fábrica Giner.



Gráfica 5.2. Hidrograma para periodo de retorno $T = 200$ años

Del análisis de los resultados se puede concluir que la aportación de la subcuenca SC4 (afluente margen derecha) no influye prácticamente en el hidrograma del Bergantes en el entorno de la Fábrica, por lo que el caudal pico en el Escenario 1 viene definido básicamente por la aportación del cauce principal.

APÉNDICES

Anejo II

APÉNDICE II.1

SERIE DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA MENSUAL DE LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE MORELLA

Precipitaciones máximas acumuladas (décimas de mm) del pluviómetro de Morella

Los datos de lluvia que se muestran han sido obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Descripción	Pluviómetro de Morella	Coordenadas UTM	Huso	X	Y	Z
Código	AEMET 9562		30	746116	4499818	992.2
Comunidad autónoma	Comunidad Valenciana	Municipio	Morella			
Provincia	Castellón	Río	Bergantes			

Tabla AII.1 Estación pluviométrica de Morella

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1916	1	62	18
1916	2	62	8
1916	3	392	31
1916	4	196	1
1916	5	403	29
1916	6	7	25
1916	7	136	21
1916	8	0	
1916	9	148	26
1916	10	115	22
1916	11	730	29
1916	12	115	27
1917	1	66	15
1917	2	209	5
1917	3	33	14
1917	4	302	5
1917	5	111	17
1917	6	293	27
1917	7	158	2
1917	8	980	24
1917	9	85	11
1917	10	49	2
1917	11	570	29
1917	12	405	20
1918	1	153	28
1918	2	-3	14
1918	3	311	5

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1918	4	337	13
1918	5	248	12
1918	6	162	5
1918	7	62	13
1918	8	647	26
1918	9	82	20
1918	10	580	22
1918	11	470	10
1918	12	19	8
1919	1	273	22
1919	2	149	11
1919	3	63	13
1919	5	358	10
1919	6	333	1
1919	7	200	29
1919	8	0	
1919	9	510	26
1919	10	420	1
1919	11	200	30
1919	12	27	16
1920	1	39	5
1920	2	1010	19
1920	3	112	7
1920	4	152	6
1920	5	320	17
1920	6	270	16
1920	7	300	26
1920	10	252	24
1920	11	121	27
1920	12	430	14
1921	2	420	24
1921	3	210	30
1921	4	230	9
1921	5	400	16
1921	6	142	7
1921	7	122	4
1921	8	146	22
1921	9	200	8
1921	10	864	9
1921	11	160	27
1921	12	58	3
1922	1	140	27
1922	2	175	5
1922	3	215	22
1922	4	227	28
1922	5	85	14
1922	6	578	17
1922	7	55	11
1922	8	20	1
1922	9	190	10

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1922	10	1500	15
1922	11	100	4
1922	12	106	20
1923	1	100	7
1923	2	70	21
1923	3	195	20
1923	4	190	7
1923	5	320	24
1923	6	60	3
1923	7	111	18
1923	8	23	28
1923	9	320	11
1923	10	295	13
1923	11	280	1
1923	12	7	10
1924	1	190	23
1924	2	400	19
1924	3	175	29
1924	4	63	7
1924	5	52	20
1924	6	61	3
1924	7	19	19
1924	8	60	29
1924	9	50	15
1924	10	740	18
1924	11	100	26
1924	12	120	1
1925	1	20	23
1925	2	120	19
1925	3	100	25
1925	4	105	12
1925	5	425	18
1925	6	470	18
1925	7	95	18
1925	8	95	18
1925	9	130	8
1925	10	283	28
1925	11	240	20
1925	12	93	8
1926	1	100	13
1926	2	150	9
1926	3	80	20
1926	4	460	15
1926	5	208	13
1926	6	50	2
1926	7	420	4
1926	8	115	31
1926	9	55	3
1926	10	200	7
1926	11	420	16

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1926	12	290	26
1927	1	28	18
1927	2	400	9
1927	3	146	4
1927	4	37	30
1927	5	455	5
1927	6	1070	17
1927	7	100	17
1927	8	34	4
1927	9	278	3
1927	10	1000	16
1927	11	245	21
1927	12	95	7
1929	3	284	3
1929	4	55	30
1929	5	350	20
1929	6	650	11
1929	7	3	20
1929	8	240	7
1929	9	219	12
1929	10	167	21
1929	11	311	6
1929	12	53	8
1930	1	340	6
1930	2	122	8
1930	3	104	1
1930	4	116	27
1930	5	585	28
1930	6	113	7
1930	7	120	23
1930	8	278	7
1930	9	410	10
1930	10	190	18
1930	11	290	28
1931	1	10	5
1931	2	100	3
1931	3	150	25
1931	4	90	21
1931	5	100	18
1931	6	90	30
1931	9	120	30
1931	10	350	11
1931	11	65	7
1931	12	178	10
1932	2	100	12
1932	3	500	17
1932	4	90	23
1932	5	280	16
1932	7	770	20
1932	8	230	26

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1932	9	160	8
1932	10	170	5
1932	11	430	9
1932	12	800	16
1933	1	34	27
1933	2	350	12
1933	3	109	11
1933	4	430	15
1933	5	452	21
1933	6	560	4
1933	7	195	2
1933	8	120	25
1933	12	180	2
1934	1	120	6
1934	2	100	27
1934	3	0	
1934	4	300	7
1934	5	350	26
1934	6	100	16
1934	8	300	20
1934	9	280	25
1934	10	65	2
1934	11	820	2
1934	12	360	29
1935	2	400	16
1935	3	330	3
1935	4	90	22
1935	5	850	5
1935	7	0	
1935	8	100	9
1935	9	190	11
1935	10	22	3
1935	11	50	10
1935	12	60	21
1936	1	135	26
1936	2	205	14
1936	3	130	3
1936	4	85	10
1936	5	775	17
1936	6	420	14
1943	9	746	15
1943	10	149	5
1943	11	49	4
1943	12	340	14
1944	1	0	
1944	2	142	23
1944	3	41	3
1944	4	91	8
1944	5	328	14
1944	6	245	19

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1944	7	60	8
1944	8	121	22
1944	9	226	12
1944	10	108	4
1944	11	33	26
1944	12	183	20
1945	1	180	14
1945	2	74	16
1945	3	70	25
1945	4	80	30
1945	5	224	28
1945	6	520	16
1945	7	152	5
1945	8	162	29
1945	9	12	22
1945	10	55	30
1945	11	1822	18
1945	12	72	25
1946	1	162	16
1946	2	22	28
1946	3	172	28
1946	4	436	18
1946	5	420	11
1946	6	124	22
1946	7	6	25
1946	8	127	24
1946	9	115	17
1946	10	442	26
1946	11	225	11
1946	12	115	18
1947	1	228	24
1947	2	140	24
1947	3	360	26
1947	4	240	22
1947	5	690	13
1947	6	185	12
1947	7	320	14
1947	8	215	17
1947	9	250	4
1947	10	322	12
1947	11	150	30
1947	12	15	4
1948	1	30	16
1948	2	428	26
1948	3	164	28
1948	4	235	20
1948	5	174	25
1948	6	110	16
1948	7	160	30
1948	8	148	17

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1948	9	390	24
1948	10	122	22
1948	11	21	3
1948	12	800	23
1949	1	78	29
1949	2	805	16
1949	3	455	25
1949	4	87	28
1949	5	331	28
1949	6	60	22
1949	7	276	24
1949	8	222	28
1949	9	440	28
1949	10	160	5
1949	11	150	20
1949	12	340	13
1950	1	130	21
1950	2	45	27
1950	3	290	27
1950	4	178	18
1950	5	805	12
1950	6	180	12
1950	7	120	22
1950	8	461	10
1950	9	42	11
1950	10	530	16
1950	11	57	30
1951	5	113	18
1951	9	500	13
1951	10	370	21
1951	11	180	20
1951	12	330	22
1952	2	50	14
1952	3	90	12
1952	4	110	12
1952	5	125	9
1952	6	800	2
1952	7	190	21
1952	8	580	1
1952	9	65	7
1952	10	160	14
1952	11	15	19
1952	12	110	3
1953	2	30	12
1953	4	80	3
1953	5	170	3
1953	6	175	7
1953	8	50	13
1953	9	440	27
1953	10	570	15

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1953	11	25	19
1953	12	450	6
1954	1	50	29
1954	3	260	13
1954	4	135	29
1954	5	550	13
1954	6	170	3
1954	8	-3	21
1954	10	13	19
1954	11	50	7
1954	12	405	1
1955	1	100	30
1955	2	105	2
1955	3	130	10
1955	4	-3	18
1955	5	230	2
1955	6	185	3
1955	7	400	18
1955	8	401	18
1955	9	315	6
1955	10	87	17
1955	11	147	30
1955	12	180	2
1956	5	365	22
1957	7	216	14
1957	8	460	7
1957	9	485	1
1957	10	1156	14
1957	11	215	8
1957	12	130	26
1958	1	145	28
1958	2	6	10
1958	3	86	30
1958	4	200	14
1958	5	115	13
1958	6	120	18
1958	7	100	6
1958	8	121	30
1958	9	34	16
1958	10	205	8
1958	11	475	18
1958	12	425	22
1959	1	77	11
1959	2	410	25
1959	3	201	9
1959	4	36	5
1959	5	546	7
1959	6	405	5
1959	7	310	19
1959	8	123	31

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1959	9	647	21
1959	10	102	8
1959	11	616	21
1959	12	80	12
1960	1	100	10
1960	2	203	8
1960	3	130	25
1960	4	25	22
1960	5	642	17
1960	6	276	6
1960	7	450	1
1960	8	50	9
1960	9	143	2
1960	10	500	28
1960	11	17	11
1960	12	300	16
1961	1	230	19
1961	2	6	19
1961	3	60	20
1961	4	90	21
1961	5	92	23
1961	6	80	16
1961	7	30	19
1961	8	260	2
1961	9	350	3
1961	10	200	16
1961	11	480	28
1961	12	20	18
1962	1	567	18
1962	2	100	24
1962	3	63	8
1962	4	350	28
1962	5	195	13
1962	6	288	30
1962	7	8	1
1962	8	200	8
1962	9	351	19
1962	10	650	16
1962	11	180	7
1962	12	5	12
1963	1	65	17
1963	2	33	27
1963	3	67	12
1963	4	120	10
1963	5	180	28
1963	6	335	1
1963	7	260	27
1963	8	100	27
1963	9	300	12
1963	10	12	29

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1963	11	76	25
1963	12	222	29
1964	1	14	12
1964	2	120	14
1964	3	60	29
1964	4	61	1
1964	5	210	22
1964	6	100	21
1964	7	191	6
1964	8	359	12
1964	9	246	29
1964	10	64	11
1964	11	70	5
1964	12	805	17
1965	1	167	18
1965	2	58	25
1965	3	40	17
1965	4	92	6
1965	5	254	18
1965	6	200	2
1965	8	96	16
1965	9	79	29
1965	10	1996	6
1965	11	156	4
1965	12	157	16
1966	1	93	20
1966	2	23	22
1966	3	60	4
1966	4	343	27
1966	5	233	30
1966	6	134	13
1966	7	20	27
1966	8	33	21
1966	9	168	15
1966	10	294	8
1966	11	262	8
1966	12	20	6
1967	1	155	21
1967	2	67	16
1967	3	103	9
1967	4	94	12
1967	5	36	15
1967	6	130	30
1967	7	45	28
1967	8	255	24
1967	9	150	2
1967	10	1800	23
1967	11	270	21
1967	12	0	
1968	1	20	10

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1968	2	120	23
1968	3	600	7
1968	4	80	2
1968	5	180	19
1968	6	285	17
1968	7	160	31
1968	8	505	7
1968	9	47	16
1968	10	51	15
1968	11	314	28
1968	12	460	7
1969	1	114	30
1969	2	105	3
1969	3	186	3
1969	4	442	4
1969	5	246	2
1969	6	175	22
1969	7	100	26
1969	8	100	10
1969	9	234	12
1969	10	893	5
1969	11	230	25
1969	12	280	26
1970	1	190	1
1970	2	15	14
1970	3	42	7
1970	4	80	7
1970	5	135	3
1970	6	308	12
1970	7	60	11
1970	8	17	20
1970	9	44	8
1970	10	650	10
1970	11	90	7
1970	12	593	9
1971	1	180	17
1971	2	82	9
1971	3	442	20
1971	4	177	23
1971	5	210	20
1971	6	92	2
1971	7	213	21
1971	8	360	29
1971	9	280	20
1971	10	185	7
1971	11	380	8
1971	12	780	4
1972	1	150	9
1972	2	275	24
1972	3	330	15

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1972	4	70	22
1972	5	200	30
1979	2	45	11
1979	3	80	7
1979	4	275	14
1979	5	105	31
1979	6	375	1
1979	7	96	5
1979	8	40	15
1979	9	82	19
1979	10	575	26
1979	11	38	13
1979	12	76	30
1980	1	145	14
1980	2	120	26
1980	3	40	13
1980	4	91	13
1980	5	281	12
1980	6	103	12
1980	7	27	16
1980	8	212	25
1980	9	174	27
1980	10	51	16
1980	11	282	5
1980	12	63	19
1981	1	86	12
1981	2	341	10
1981	3	105	30
1981	4	760	22
1981	5	252	21
1981	6	487	26
1981	7	91	17
1981	8	152	22
1981	9	40	22
1981	10	70	19
1981	11	0	
1981	12	35	21
1982	1	432	16
1982	2	405	15
1982	3	306	26
1982	4	213	16
1982	5	258	30
1982	6	187	10
1982	7	465	17
1982	8	134	27
1982	9	68	13
1982	10	900	20
1982	11	240	25
1982	12	35	21
1983	1	0	

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1983	2	63	15
1983	3	65	24
1983	4	94	25
1983	5	60	21
1983	6	311	19
1983	7	46	3
1983	8	295	9
1983	9	0	
1983	10	41	30
1983	11	915	6
1983	12	20	15
1984	1	12	6
1984	2	78	28
1984	3	220	21
1984	4	126	1
1984	5	345	14
1984	6	56	10
1984	7	27	5
1984	8	137	13
1984	9	203	29
1984	10	125	26
1984	11	303	13
1984	12	65	8
1985	1	32	5
1985	2	183	21
1985	3	83	19
1985	4	128	25
1985	5	326	27
1985	6	297	16
1985	7	110	3
1985	8	20	14
1985	9	492	26
1985	10	200	25
1985	11	90	15
1985	12	110	8
1986	1	90	30
1986	2	57	14
1986	3	423	13
1986	4	120	6
1986	5	180	28
1986	6	45	29
1986	7	180	25
1986	8	460	10
1986	9	175	18
1986	10	655	1
1986	11	185	15
1986	12	115	13
1987	1	245	22
1987	2	350	25
1987	3	60	10

AÑO	MES	Pmáx (décimas de mm)	Día Pmáx Día del mes en que se produce la Pmax
1987	4	28	8
1987	5	180	14
1987	6	193	6
1987	7	295	23
1987	8	170	7
1987	9	135	21
1987	10	100	4
1987	11	215	7
1987	12	145	3
1988	1	448	17
1988	2	8	21
1988	3	65	4
1988	4	405	2
1988	5	245	13
1988	6	540	26
1988	7	5	3
1988	8	5	16
1988	9	78	30
1988	10	295	17
1988	11	540	11
1988	12	25	1
1989	1	130	6
1989	2	290	7
1989	3	690	30
1989	4	195	25
1989	5	380	25
1989	6	67	19
1989	7	65	1
1989	8	450	5
1989	9	350	7
1989	10	330	18
1989	11	690	15
1989	12	500	26
1990	1	120	3
1990	2	9	20
1990	3	35	8
1990	4	65	1
1990	5	90	21
1990	6	330	13
1990	7	77	28
1990	8	380	29
1990	9	280	8
1990	10	390	7
1990	11	50	7
1990	12	40	18
1991	1	340	25
1991	2	685	2
1991	3	542	23
1991	4	244	16
1991	5	130	9

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1991	6	177	16
1991	7	203	28
1991	8	105	26
1991	9	200	11
1991	10	82	25
1991	11	560	29
1991	12	400	3
1992	1	200	23
1992	2	120	19
1992	3	65	26
1992	4	360	4
1992	5	380	2
1992	6	295	15
1992	7	20	21
1992	8	180	1
1992	9	300	26
1992	10	180	12
1992	11	40	1
1992	12	420	25
1993	1	190	31
1993	2	610	4
1993	3	230	21
1993	4	100	24
1993	5	170	13
1993	6	135	30
1993	7	46	1
1993	8	290	5
1993	9	290	23
1993	10	330	27
1993	11	192	4
1993	12	38	25
1994	1	21	8
1994	2	130	4
1994	3	38	26
1994	4	89	16
1994	5	204	13
1994	6	37	25
1994	7	27	31
1994	8	170	31
1994	9	388	22
1994	10	460	9
1994	11	155	28
1994	12	32	7
1995	1	48	5
1995	2	6	17
1995	3	78	10
1995	4	215	24
1995	5	185	25
1995	6	85	28
1995	7	25	10

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1995	8	255	20
1995	9	367	18
1995	10	275	14
1995	11	105	18
1995	12	285	15
1996	1	355	9
1996	2	140	26
1996	3	80	30
1996	4	85	7
1996	5	115	11
1996	6	92	2
1996	7	110	26
1996	8	480	18
1996	9	340	4
1996	10	55	14
1996	11	192	16
1996	12	520	7
1997	1	160	6
1997	2	20	2
1997	3	10	25
1997	4	195	25
1997	5	110	24
1997	6	360	17
1997	7	100	9
1997	8	325	10
1997	9	190	14
1997	10	157	27
1997	11	85	2
1997	12	205	4
1998	1	156	28
1998	2	36	1
1998	3	23	11
1998	4	373	26
1998	5	175	27
1998	6	35	6
1998	7	1	1
1998	8	195	30
1998	9	90	22
1998	10	321	5
1998	11	14	25
1998	12	247	3
1999	1	215	22
1999	2	20	28
1999	3	230	14
1999	4	198	28
1999	5	145	16
1999	6	190	12
1999	7	295	31
1999	8	100	30
1999	9	390	6

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
1999	10	100	12
1999	11	251	11
1999	12	22	19
2000	1	502	14
2000	2	2	11
2000	3	57	30
2000	4	133	27
2000	5	185	10
2000	6	710	9
2000	7	102	17
2000	8	40	30
2000	9	283	17
2000	10	2338	22
2000	11	68	5
2000	12	335	22
2001	1	80	12
2001	2	155	15
2001	3	135	7
2001	4	105	29
2001	5	185	1
2001	6	35	9
2001	7	770	9
2001	8	48	16
2001	9	470	3
2001	10	150	9
2001	11	415	15
2001	12	45	18
2002	1	155	3
2002	2	78	5
2002	3	225	28
2002	4	393	11
2002	5	625	7
2002	6	171	4
2002	7	180	19
2002	8	107	7
2002	9	230	7
2002	10	95	2
2002	11	110	6
2002	12	185	19
2003	1	93	9
2003	2	404	25
2003	3	260	27
2003	4	579	15
2003	5	790	6
2003	6	88	5
2003	7	827	5
2003	8	215	31
2003	9	284	29
2003	10	297	15
2003	11	128	10

AÑO	MES	P _{máx} (décimas de mm)	Día P _{máx} Día del mes en que se produce la P _{max}
2003	12	107	4
2004	1	35	23
2004	2	140	25
2004	3	713	29
2004	4	275	15
2004	5	237	12
2004	6	82	18
2004	7	53	23
2004	8	155	2
2004	9	128	1
2004	10	152	27
2004	11	36	28
2004	12	136	12
2005	1	5	18
2005	2	155	7
2005	3	169	22
2005	4	47	14
2005	5	229	22
2005	6	317	12
2005	7	167	25
2005	8	211	1
2005	9	193	25
2005	10	192	13
2005	11	552	9
2005	12	48	27
2006	1	359	7
2006	2	528	26
2006	3	39	20
2006	4	79	7
2006	5	60	13
2006	6	112	8
2006	7	210	5
2006	8	14	17
2006	9	255	12
2006	10	80	20
2006	11	189	7
2006	12	107	5
2007	1	176	25
2007	2	142	8

Tabla Ap I.2

APÉNDICE II.2

OBTENCIÓN DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

OBTENCIÓN DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

- Grupo de suelo

Grupo hidrológico del suelo	Potencial de escorrentía	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos típicos
A	Escaso	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas
B	Moderado	Moderada	Texturas medias
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables

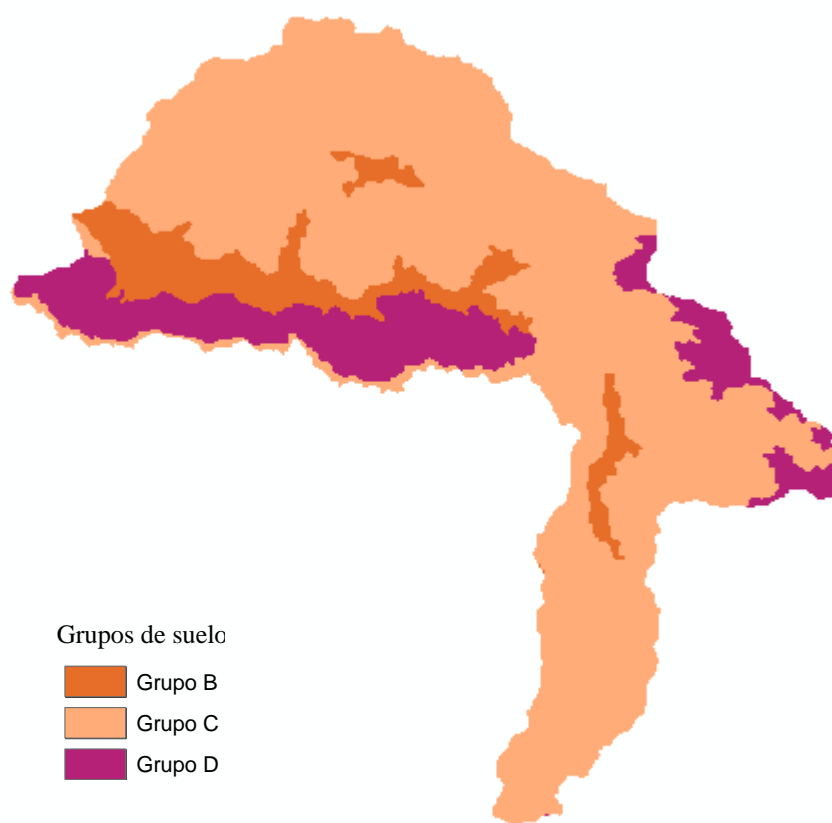


Figura Ap II.1. Mapa de tipo y usos del suelo

- **Grado de desarrollo de la cubierta vegetal**

Cubierta	
1	Núcleo urbano, residencial, industrial, equipamientos y uso terciario
2	Regadío: huerta, cereal, arrozal y otros aprovechamientos agrícolas
3	Secano: herbáceas tipo I
4	Secano: frutales
5	BOSQUE DENSO con dominancia de FRONDOSAS
7	BOSQUE CLARO y/o Matorral Denso
9	(Matorral claro y/o) Pastos de zonas semiáridas sin arbolado y otra vegetación
10	Secano: herbáceas tipo II

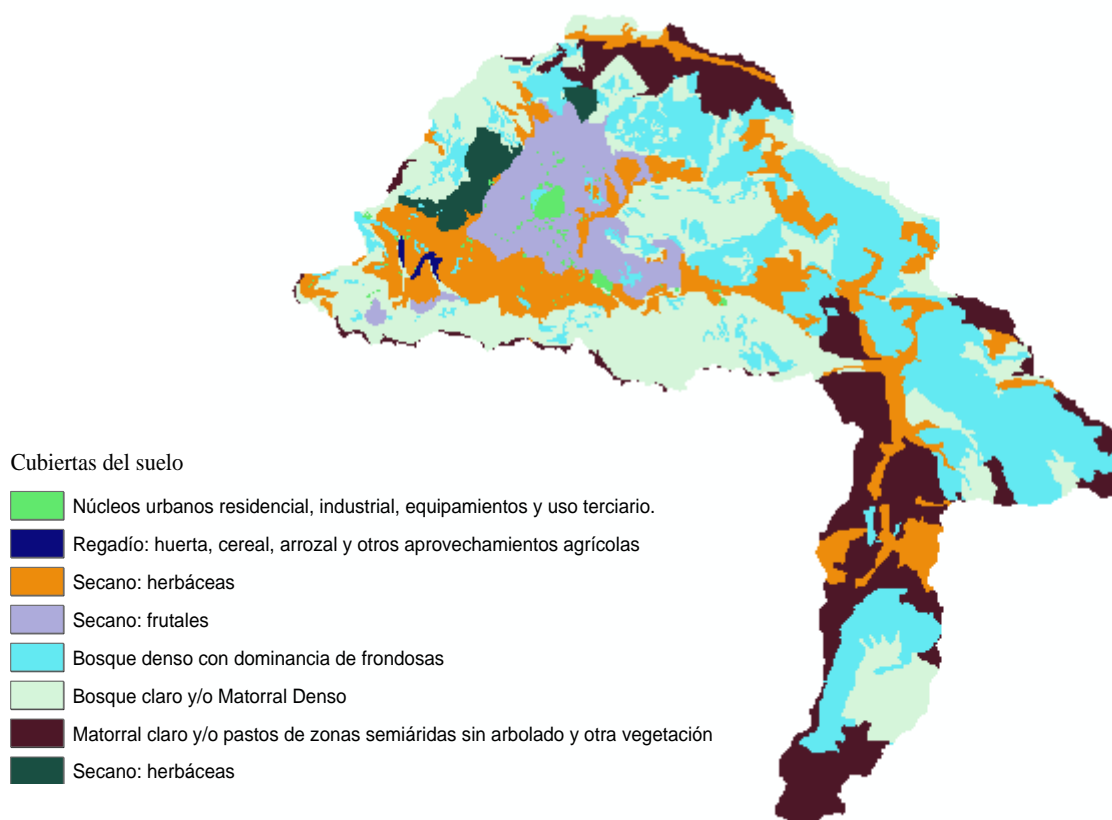


Figura Ap II.2 Cubiertas del suelo.

- **Pendiente del terreno**

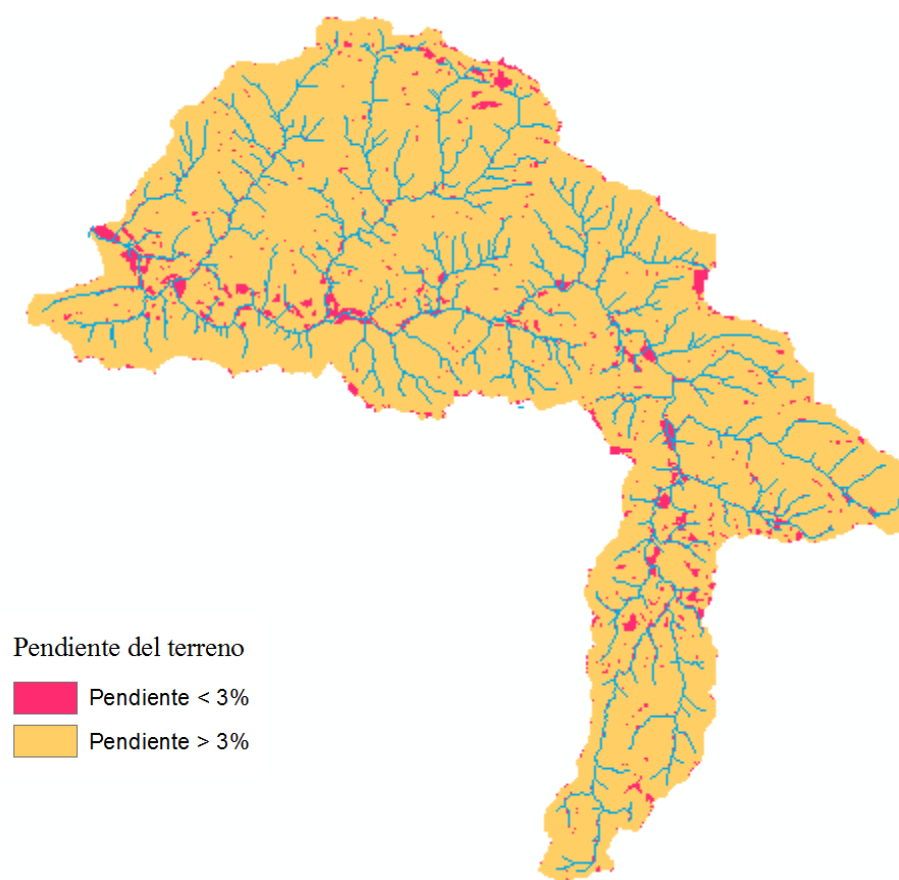


Figura.Ap II.3 Clasificación de la pendiente del terreno

- **Umbral de escorrentía P_0**

Se obtiene el umbral de escorrentía de la cuenca drenante del río Bergantes mediante la superposición de los mapas anteriores, y una posterior reclasificación a partir de la tabla siguiente:

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE %	CARACT. HIDROLOG.	GRUPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	< 3	R/N	20	14	11	8
Cultivo en hilera	≥ 3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	< 3	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	≥ 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	< 3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R/N	47	25	16	13
Praderas		Pobre	24	14	8	6
	≥ 3	Media	53	23	14	9
		Buena		33	18	13
		Muy buena		41	22	15
		Pobre	58	25	12	7
	< 3	Media		35	17	10
		Buena			22	14
		Muy buena			25	16
		Pobre	62	26	15	10
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥ 3	Media		34	19	14
		Buena		42	22	15
		Pobre		34	19	14
	< 3	Media		42	22	15
		Buena		50	25	16
		Muy clara	40	17	8	5
Masas forestales (bosque, monte bajo, etc.)		Clara	60	24	14	10
		Media		34	22	16
		Espesa		47	31	23
		Muy espesa		65	43	33
	≥ 3					
Rocas permeables	< 3					
Rocas impermeables	≥ 3					
	< 3					
Firmes granulares sin pavimento						
Adoquinados						
Pavimentos bituminosos u hormigón						

Valores obtenidos del umbral de esorrentía para la cuenca del Bergantes:

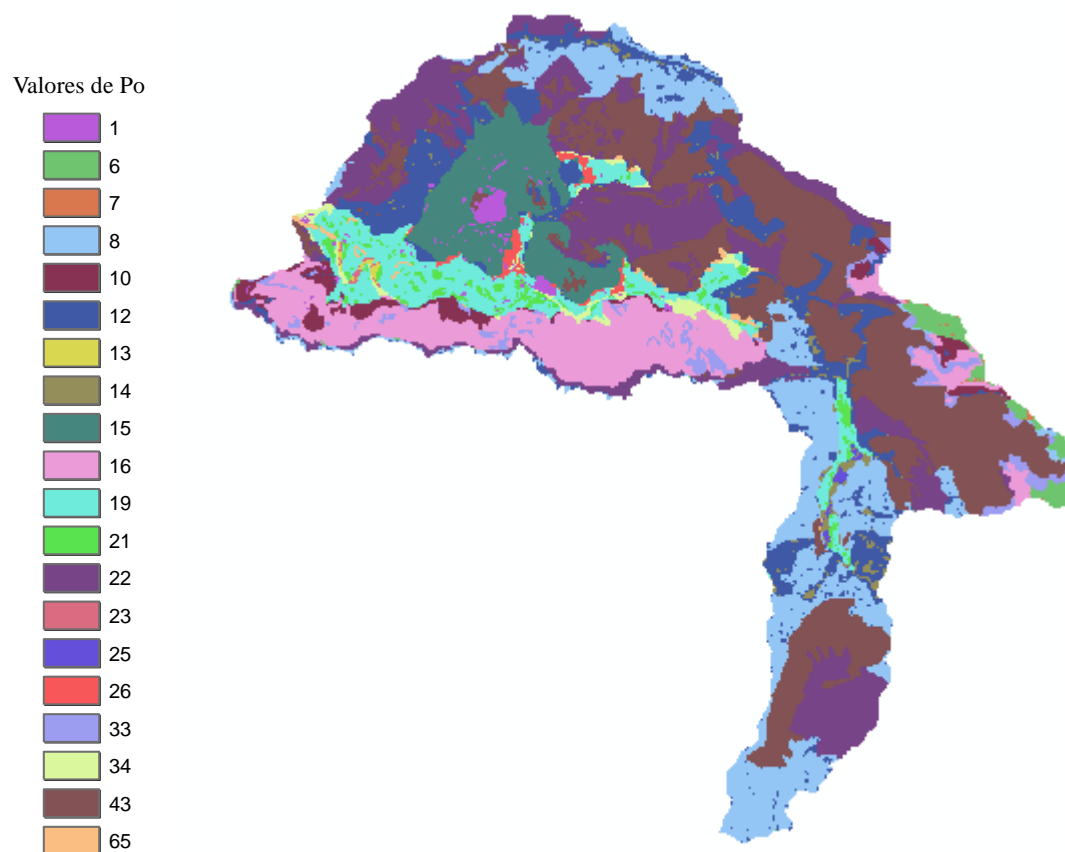


Figura Ap II.4 Valores del umbral de esorrentía Po

APÉNDICE II.3

TORMENTAS DE DISEÑO

TORMENTAS DE DISEÑO. HIETOGRAMAS

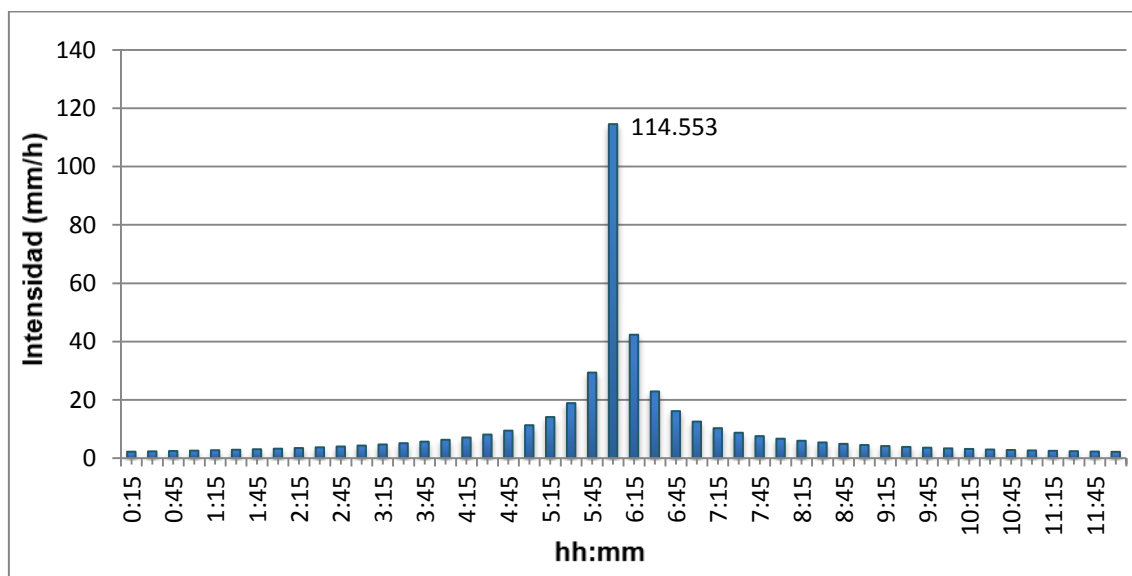
En este Anejo se presentan las Tormentas de diseño propuestas para periodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años.

Las tormentas de proyecto tienen una duración de 12 horas y se han discretizado en intervalos quinceminutales.

Han sido obtenidas mediante la formulación de Témez por el método de bloques alternos, cuya metodología está descrita en el Anejo V. Estudio Hidrológico, en concreto en el Capítulo 4. Modelo pseudo-distribuido, apartado 4.4 Tormentas de Diseño.

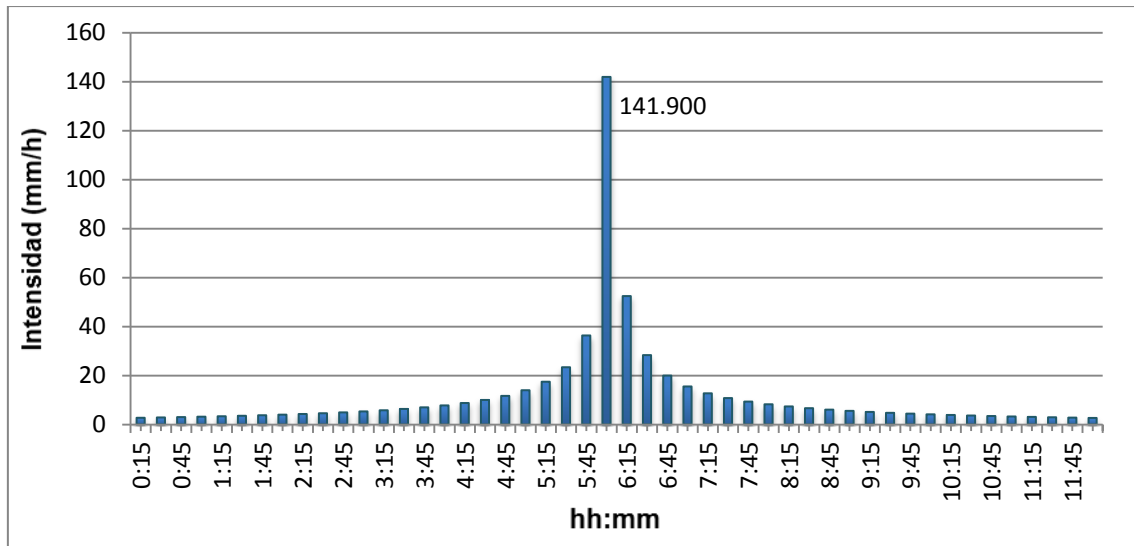
1. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 25 AÑOS

T (años)	Pd _{ESTACIÓN} (mm)	ACUENCA (km ²)	Coef. reducción areal (K _A)	Pd _{CORREGIDA} (mm)	Factor de torrencialidad (I _I /I _d)
25	145.73	54.02	0.8845	128.89	11



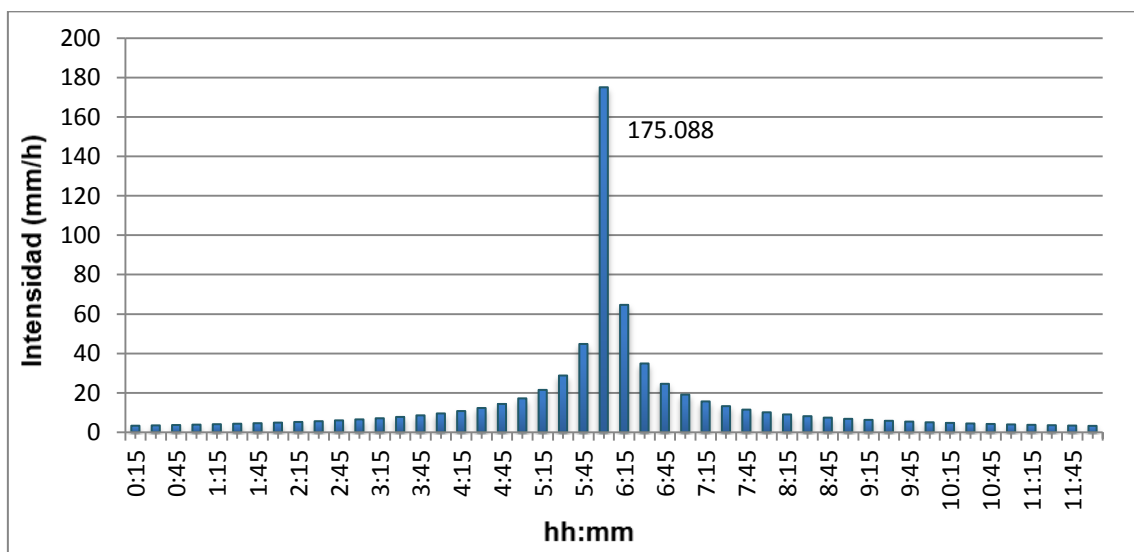
2. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 50 AÑOS

T (años)	Pd _{ESTACIÓN} (mm)	A _{CUENCA} (km ²)	Coef. reducción areal (K _A)	Pd _{CORREGIDA} (mm)	Factor de torrencialidad (I _I /I _d)
50	180.52	54.02	0.8845	159.67	11



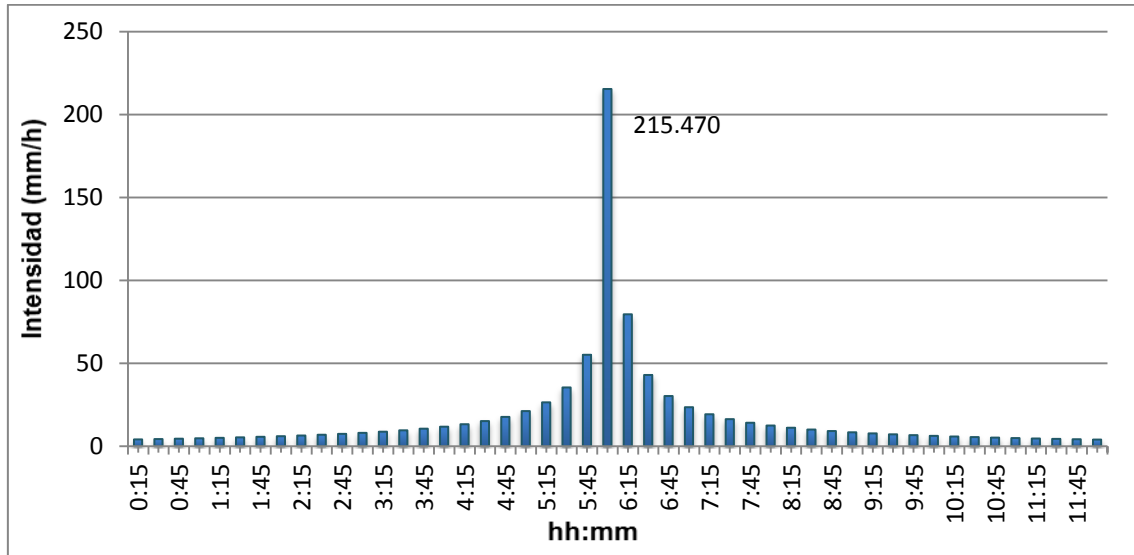
3. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 100 AÑOS

T (años)	Pd _{ESTACIÓN} (mm)	A _{CUENCA} (km ²)	Coef. reducción areal (K _A)	Pd _{CORREGIDA} (mm)	Factor de torrencialidad (I _I /I _d)
100	22.74	54.02	0.8845	197.01	11



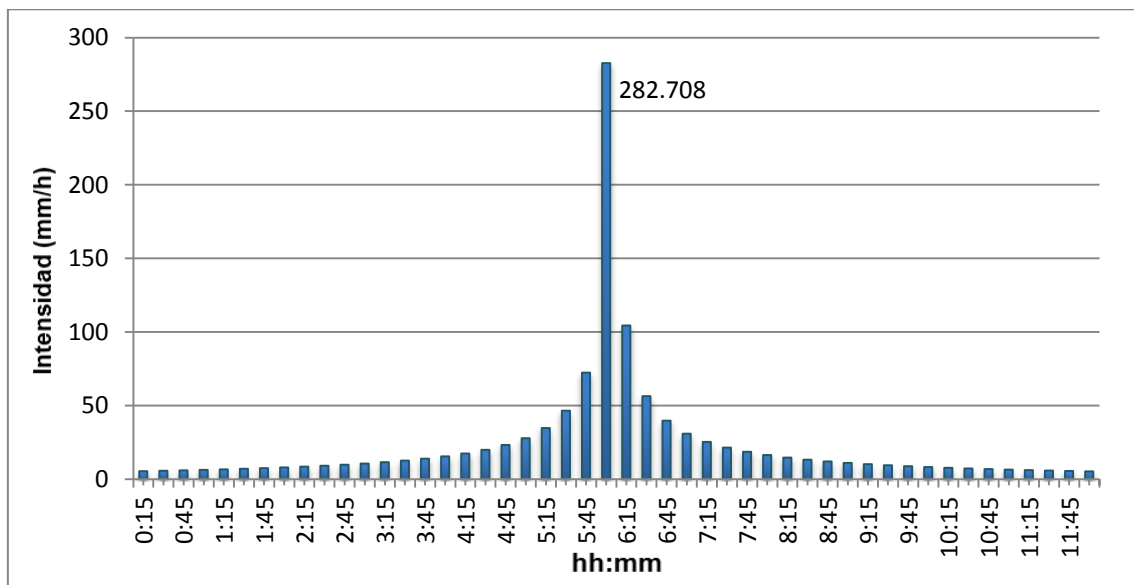
4. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 200 AÑOS

T (años)	Pd _{ESTACIÓN} (mm)	A _{CUENCA} (km ²)	Coef. reducción areal (K _A)	Pd _{CORREGIDA} (mm)	Factor de torrencialidad (I _I /I _d)
200	274.11	54.02	0.8845	242.45	11



5. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 500 AÑOS

T (años)	Pd _{ESTACIÓN} (mm)	A _{CUENCA} (km ²)	Coef. reducción areal (K _A)	Pd _{CORREGIDA} (mm)	Factor de torrencialidad (I _I /I _d)
500	359.65	54.02	0.8845	318.11	11



A continuación se adjuntan las tablas de datos a partir de los cuales se han construido los hietogramas de cada uno de los periodos de retorno que se han mostrado anteriormente:

1. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 25 AÑOS

k	$k \cdot \Delta t$ (horas)	Intensidad I_t (mm/h)	Intensidad b_k (mm/h)	Intensidad b_k ordenado (mm/h)	Pd acum. (mm)
1	0.25	114.55	114.55	2.179	0.545
2	0.50	78.43	42.30	2.288	0.572
3	0.75	62.06	29.32	2.408	0.602
4	1.00	52.25	22.84	2.538	0.634
5	1.25	45.57	18.84	2.681	0.670
6	1.50	40.66	16.09	2.839	0.710
7	1.75	36.86	14.07	3.014	0.753
8	2.00	33.81	12.50	3.209	0.802
9	2.25	31.31	11.26	3.428	0.857
10	2.50	29.20	10.24	3.675	0.919
11	2.75	27.40	9.40	3.956	0.989
12	3.00	25.84	8.68	4.279	1.070
13	3.25	24.47	8.06	4.654	1.163
14	3.50	23.26	7.52	5.094	1.273
15	3.75	22.18	7.05	5.619	1.405
16	4.00	21.21	6.63	6.257	1.564
17	4.25	20.33	6.26	7.048	1.762
18	4.50	19.53	5.92	8.058	2.015
19	4.75	18.80	5.62	9.396	2.349
20	5.00	18.12	5.34	11.261	2.815
21	5.25	17.50	5.09	14.066	3.516
22	5.50	16.93	4.86	18.843	4.711
23	5.75	16.40	4.65	29.318	7.330
24	6.00	15.90	4.46	114.553	28.638
25	6.25	15.43	4.28	42.301	10.575
26	6.50	15.00	4.11	22.841	5.710
27	6.75	14.59	3.96	16.091	4.023
28	7.00	14.20	3.81	12.505	3.126
29	7.25	13.84	3.67	10.244	2.561
30	7.50	13.50	3.55	8.677	2.169
31	7.75	13.17	3.43	7.520	1.880
32	8.00	12.87	3.32	6.630	1.657
33	8.25	12.57	3.21	5.922	1.480
34	8.50	12.29	3.11	5.344	1.336
35	8.75	12.03	3.01	4.864	1.216
36	9.00	11.78	2.92	4.459	1.115
37	9.25	11.53	2.84	4.111	1.028
38	9.50	11.30	2.76	3.811	0.953
39	9.75	11.08	2.68	3.547	0.887
40	10.00	10.87	2.61	3.315	0.829
41	10.25	10.67	2.54	3.109	0.777
42	10.50	10.47	2.47	2.924	0.731
43	10.75	10.28	2.41	2.758	0.690
44	11.00	10.10	2.35	2.608	0.652
45	11.25	9.93	2.29	2.471	0.618
46	11.50	9.76	2.23	2.347	0.587
47	11.75	9.60	2.18	2.233	0.558
48	12.00	9.45	2.13	2.128	0.532

2. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 50 AÑOS

k	$k \cdot \Delta t$ (horas)	Intensidad I_t (mm/h)	Intensidad b_k (mm/h)	Intensidad b_k ordenado (mm/h)	Pd acum. (mm)
1	0.25	141.90	141.90	2.699	0.675
2	0.50	97.15	52.40	2.835	0.709
3	0.75	76.87	36.32	2.982	0.746
4	1.00	64.73	28.29	3.144	0.786
5	1.25	56.45	23.34	3.321	0.830
6	1.50	50.36	19.93	3.517	0.879
7	1.75	45.66	17.42	3.734	0.933
8	2.00	41.89	15.49	3.975	0.994
9	2.25	38.78	13.95	4.246	1.062
10	2.50	36.17	12.69	4.552	1.138
11	2.75	33.94	11.64	4.900	1.225
12	3.00	32.01	10.75	5.300	1.325
13	3.25	30.32	9.98	5.764	1.441
14	3.50	28.82	9.32	6.310	1.577
15	3.75	27.48	8.73	6.961	1.740
16	4.00	26.27	8.21	7.750	1.938
17	4.25	25.18	7.75	8.731	2.183
18	4.50	24.19	7.34	9.982	2.495
19	4.75	23.28	6.96	11.639	2.910
20	5.00	22.45	6.62	13.949	3.487
21	5.25	21.68	6.31	17.423	4.356
22	5.50	20.97	6.03	23.341	5.835
23	5.75	20.31	5.76	36.317	9.079
24	6.00	19.69	5.52	141.900	35.475
25	6.25	19.12	5.30	52.399	13.100
26	6.50	18.58	5.09	28.294	7.074
27	6.75	18.07	4.90	19.932	4.983
28	7.00	17.60	4.72	15.490	3.873
29	7.25	17.15	4.55	12.690	3.172
30	7.50	16.72	4.39	10.748	2.687
31	7.75	16.32	4.25	9.316	2.329
32	8.00	15.94	4.11	8.213	2.053
33	8.25	15.57	3.98	7.335	1.834
34	8.50	15.23	3.85	6.620	1.655
35	8.75	14.90	3.73	6.026	1.506
36	9.00	14.59	3.62	5.523	1.381
37	9.25	14.29	3.52	5.093	1.273
38	9.50	14.00	3.42	4.720	1.180
39	9.75	13.73	3.32	4.394	1.099
40	10.00	13.47	3.23	4.107	1.027
41	10.25	13.21	3.14	3.851	0.963
42	10.50	12.97	3.06	3.622	0.906
43	10.75	12.74	2.98	3.417	0.854
44	11.00	12.52	2.91	3.230	0.808
45	11.25	12.30	2.83	3.061	0.765
46	11.50	12.09	2.77	2.907	0.727
47	11.75	11.89	2.70	2.766	0.691
48	12.00	11.70	2.64	2.636	0.659

3. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 100 AÑOS

k	$k \cdot \Delta t$ (horas)	Intensidad I_t (mm/h)	Intensidad b_k (mm/h)	Intensidad b_k ordenado (mm/h)	Pd acum. (mm)
1	0.25	175.09	175.09	3.331	0.833
2	0.50	119.87	64.65	3.498	0.874
3	0.75	94.85	44.81	3.680	0.920
4	1.00	79.87	34.91	3.879	0.970
5	1.25	69.65	28.80	4.098	1.024
6	1.50	62.14	24.59	4.339	1.085
7	1.75	56.34	21.50	4.607	1.152
8	2.00	51.68	19.11	4.905	1.226
9	2.25	47.85	17.21	5.239	1.310
10	2.50	44.63	15.66	5.617	1.404
11	2.75	41.88	14.36	6.046	1.512
12	3.00	39.50	13.26	6.540	1.635
13	3.25	37.41	12.32	7.113	1.778
14	3.50	35.56	11.49	7.786	1.946
15	3.75	33.90	10.77	8.589	2.147
16	4.00	32.42	10.13	9.563	2.391
17	4.25	31.07	9.56	10.773	2.693
18	4.50	29.85	9.05	12.317	3.079
19	4.75	28.73	8.59	14.361	3.590
20	5.00	27.70	8.17	17.212	4.303
21	5.25	26.75	7.79	21.499	5.375
22	5.50	25.88	7.44	28.800	7.200
23	5.75	25.06	7.11	44.811	11.203
24	6.00	24.30	6.82	175.088	43.772
25	6.25	23.59	6.54	64.655	16.164
26	6.50	22.92	6.28	34.912	8.728
27	6.75	22.30	6.05	24.594	6.149
28	7.00	21.71	5.82	19.113	4.778
29	7.25	21.16	5.62	15.658	3.914
30	7.50	20.63	5.42	13.262	3.315
31	7.75	20.13	5.24	11.495	2.874
32	8.00	19.66	5.07	10.133	2.533
33	8.25	19.22	4.90	9.051	2.263
34	8.50	18.79	4.75	8.169	2.042
35	8.75	18.39	4.61	7.435	1.859
36	9.00	18.00	4.47	6.815	1.704
37	9.25	17.63	4.34	6.284	1.571
38	9.50	17.28	4.22	5.824	1.456
39	9.75	16.94	4.10	5.422	1.355
40	10.00	16.62	3.99	5.067	1.267
41	10.25	16.30	3.88	4.752	1.188
42	10.50	16.01	3.78	4.469	1.117
43	10.75	15.72	3.68	4.216	1.054
44	11.00	15.44	3.59	3.986	0.996
45	11.25	15.18	3.50	3.777	0.944
46	11.50	14.92	3.41	3.587	0.897
47	11.75	14.68	3.33	3.412	0.853
48	12.00	14.44	3.25	3.252	0.813

4. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 200 AÑOS

k	$k \cdot \Delta t$ (horas)	Intensidad I_t (mm/h)	Intensidad b_k (mm/h)	Intensidad b_k ordenado (mm/h)	Pd acum. (mm)
1	0.25	215.47	215.47	4.099	1.025
2	0.50	147.52	79.57	4.304	1.076
3	0.75	116.73	55.15	4.529	1.132
4	1.00	98.29	42.96	4.774	1.193
5	1.25	85.72	35.44	5.043	1.261
6	1.50	76.48	30.27	5.340	1.335
7	1.75	69.33	26.46	5.669	1.417
8	2.00	63.60	23.52	6.036	1.509
9	2.25	58.89	21.18	6.447	1.612
10	2.50	54.93	19.27	6.912	1.728
11	2.75	51.54	17.67	7.441	1.860
12	3.00	48.61	16.32	8.048	2.012
13	3.25	46.03	15.16	8.753	2.188
14	3.50	43.76	14.15	9.581	2.395
15	3.75	41.72	13.26	10.569	2.642
16	4.00	39.89	12.47	11.769	2.942
17	4.25	38.24	11.77	13.257	3.314
18	4.50	36.73	11.14	15.157	3.789
19	4.75	35.36	10.57	17.674	4.418
20	5.00	34.09	10.05	21.182	5.295
21	5.25	32.92	9.58	26.457	6.614
22	5.50	31.84	9.15	35.443	8.861
23	5.75	30.84	8.75	55.146	13.787
24	6.00	29.90	8.39	215.470	53.867
25	6.25	29.03	8.05	79.566	19.892
26	6.50	28.21	7.73	42.964	10.741
27	6.75	27.44	7.44	30.266	7.567
28	7.00	26.72	7.17	23.521	5.880
29	7.25	26.03	6.91	19.269	4.817
30	7.50	25.39	6.67	16.320	4.080
31	7.75	24.78	6.45	14.146	3.536
32	8.00	24.20	6.24	12.471	3.118
33	8.25	23.65	6.04	11.139	2.785
34	8.50	23.12	5.85	10.053	2.513
35	8.75	22.63	5.67	9.150	2.287
36	9.00	22.15	5.50	8.387	2.097
37	9.25	21.70	5.34	7.734	1.933
38	9.50	21.26	5.19	7.168	1.792
39	9.75	20.85	5.04	6.672	1.668
40	10.00	20.45	4.91	6.236	1.559
41	10.25	20.07	4.77	5.848	1.462
42	10.50	19.70	4.65	5.500	1.375
43	10.75	19.35	4.53	5.188	1.297
44	11.00	19.01	4.41	4.905	1.226
45	11.25	18.68	4.30	4.648	1.162
46	11.50	18.36	4.20	4.414	1.104
47	11.75	18.06	4.10	4.199	1.050
48	12.00	17.77	4.00	4.002	1.000

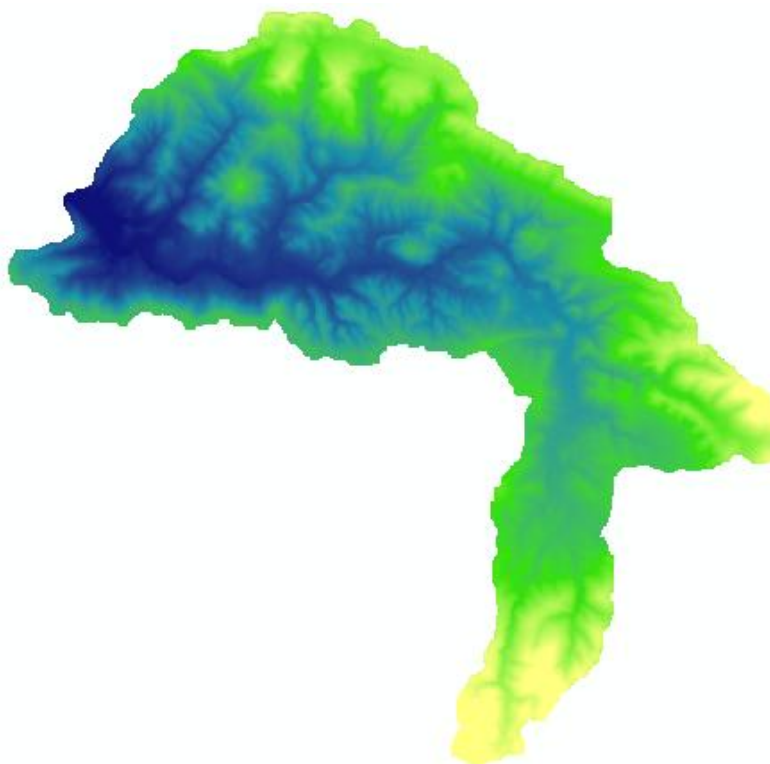
5. TORMENTA DE DISEÑO PARA T = 500 AÑOS

k	$k \cdot \Delta t$ (horas)	Intensidad I_t (mm/h)	Intensidad b_k (mm/h)	Intensidad b_k ordenado (mm/h)	Pd acum. (mm)
1	0.25	282.71	282.71	5.378	1.344
2	0.50	193.55	104.39	5.648	1.412
3	0.75	153.15	72.35	5.942	1.485
4	1.00	128.96	56.37	6.264	1.566
5	1.25	112.47	46.50	6.617	1.654
6	1.50	100.34	39.71	7.006	1.752
7	1.75	90.96	34.71	7.438	1.860
8	2.00	83.45	30.86	7.920	1.980
9	2.25	77.27	27.79	8.459	2.115
10	2.50	72.07	25.28	9.069	2.267
11	2.75	67.63	23.19	9.763	2.441
12	3.00	63.77	21.41	10.560	2.640
13	3.25	60.40	19.89	11.484	2.871
14	3.50	57.41	18.56	12.571	3.143
15	3.75	54.74	17.39	13.868	3.467
16	4.00	52.34	16.36	15.441	3.860
17	4.25	50.17	15.44	17.394	4.349
18	4.50	48.20	14.61	19.887	4.972
19	4.75	46.39	13.87	23.189	5.797
20	5.00	44.73	13.19	27.792	6.948
21	5.25	43.20	12.57	34.713	8.678
22	5.50	41.78	12.01	46.503	11.626
23	5.75	40.46	11.48	72.355	18.089
24	6.00	39.24	11.00	282.708	70.677
25	6.25	38.09	10.56	104.395	26.099
26	6.50	37.01	10.15	56.371	14.093
27	6.75	36.01	9.76	39.711	9.928
28	7.00	35.06	9.40	30.861	7.715
29	7.25	34.16	9.07	25.282	6.321
30	7.50	33.31	8.75	21.413	5.353
31	7.75	32.51	8.46	18.560	4.640
32	8.00	31.75	8.18	16.362	4.091
33	8.25	31.03	7.92	14.614	3.654
34	8.50	30.34	7.67	13.190	3.297
35	8.75	29.69	7.44	12.005	3.001
36	9.00	29.06	7.22	11.004	2.751
37	9.25	28.47	7.01	10.147	2.537
38	9.50	27.90	6.81	9.404	2.351
39	9.75	27.35	6.62	8.755	2.189
40	10.00	26.83	6.44	8.182	2.045
41	10.25	26.33	6.26	7.672	1.918
42	10.50	25.84	6.10	7.217	1.804
43	10.75	25.38	5.94	6.807	1.702
44	11.00	24.94	5.79	6.436	1.609
45	11.25	24.51	5.65	6.099	1.525
46	11.50	24.10	5.51	5.792	1.448
47	11.75	23.70	5.38	5.510	1.377
48	12.00	23.31	5.25	5.251	1.313

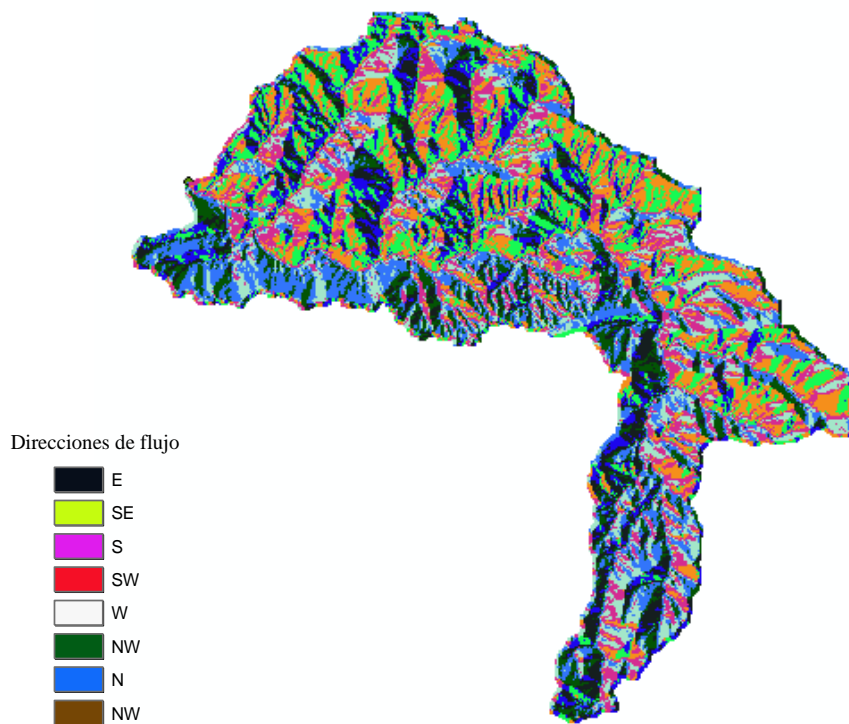
APÉNDICE II.4

PROCEDIMIENTO ILUSTRATIVO DE OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS Y MODELO PSEUDO-DISTRIBUIDO DE LA CUENCA

PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS



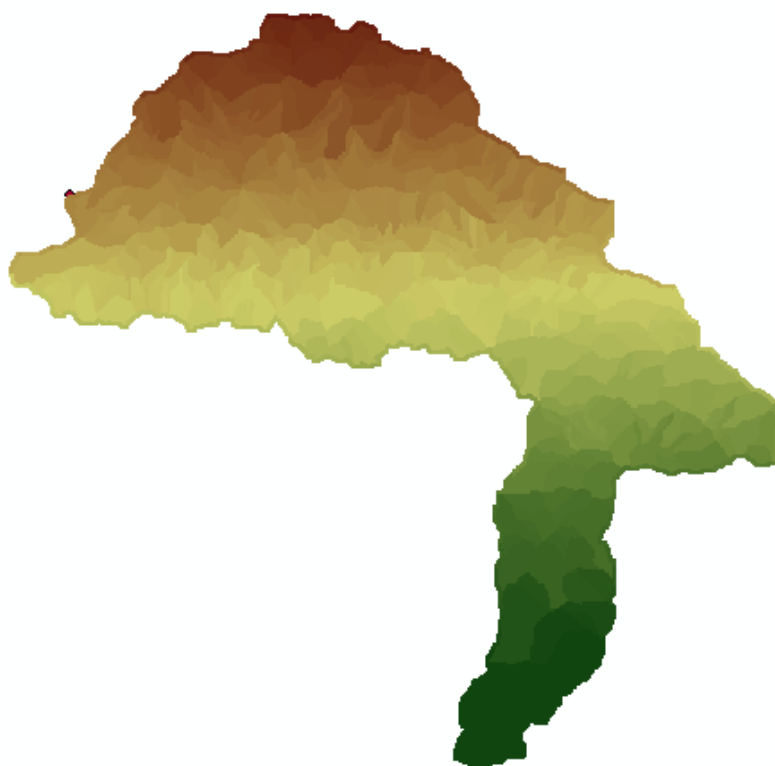
Modelo de Elevación Digital hidrológico



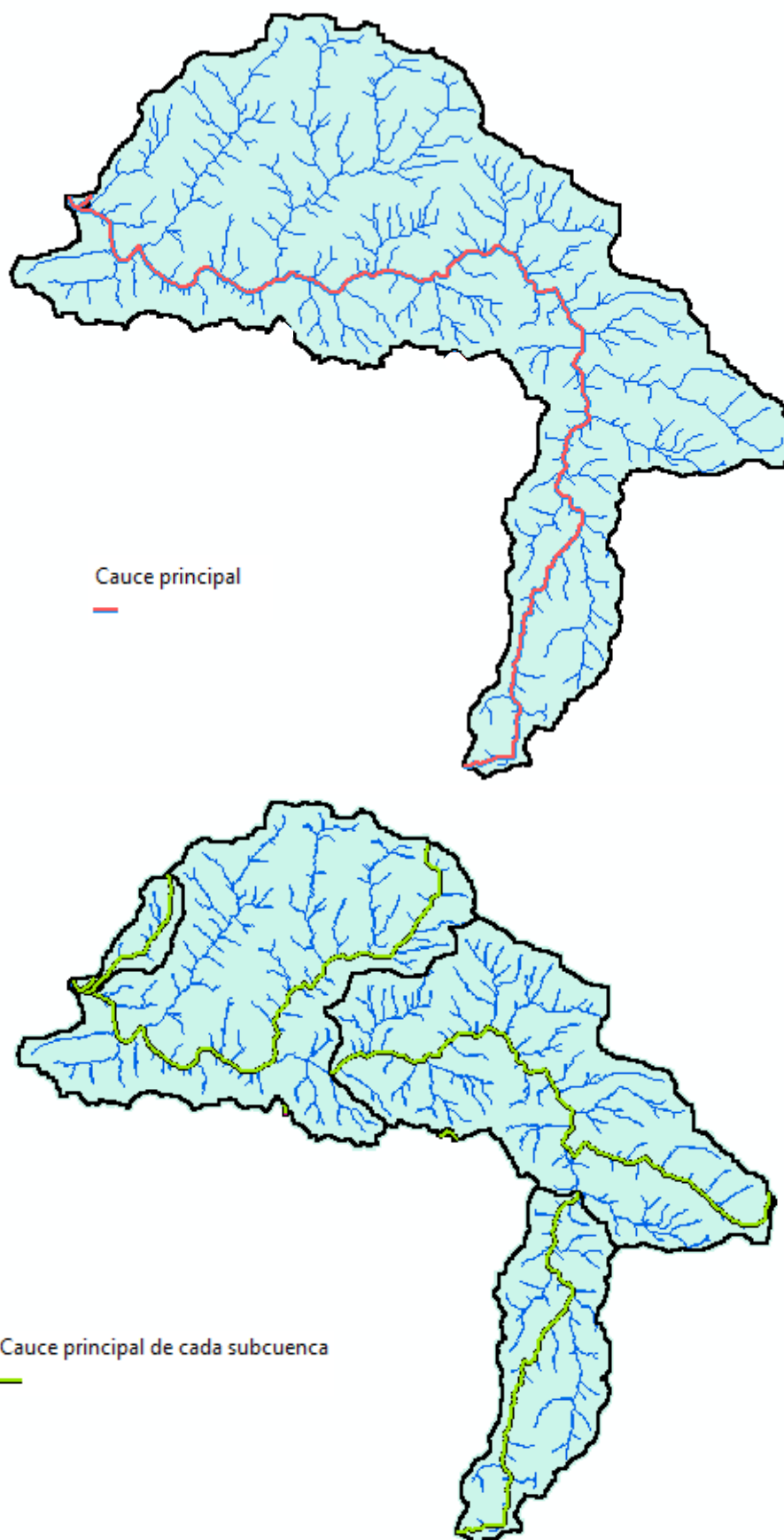
Direcciones de flujo



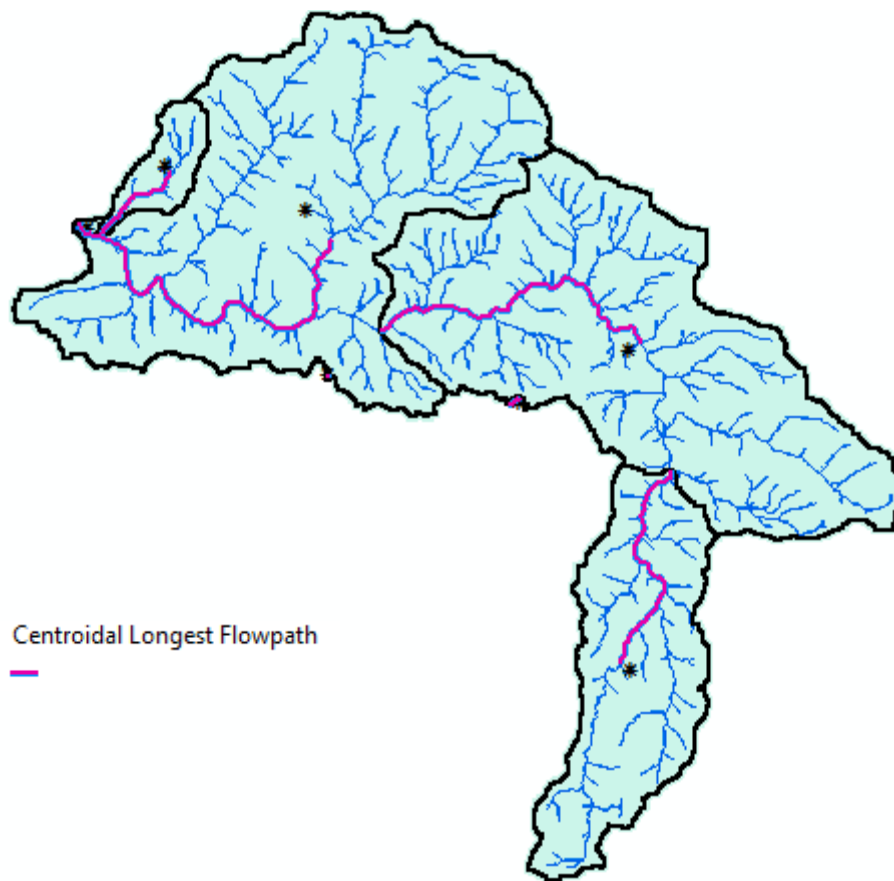
Acumulación de flujo



Disgregación en subcuencas



Cauces principales de la cuenca y las subcuencas



Cauce del centroide de la subcuenca al punto de desagüe