

SOBRE LOS PERIODOS DE RETORNO DE LAS PRECIPITACIONES EXTRAORDINARIAS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

José Antonio Ruiz García y José Ángel Núñez Mora
Delegación de la AEMET en la Comunidad Valenciana

Introducción

Una característica sobresaliente de la climatología de la Comunidad Valenciana es la extrema intensidad que pueden alcanzar los episodios de lluvias torrenciales que la afectan con bastante frecuencia. De hecho oficialmente se considera que el record de precipitación diaria registrada en España, y el segundo valor más alto registrado en Europa¹, son los 817 mm recogidos el 3 de noviembre de 1987 en el pluviómetro de Oliva, una localidad situada en la costa sur de la provincia de Valencia. Desde 1950 la red de estaciones pluviométrica de la AEMET en dicha Comunidad ha registrado 21 episodios de precipitación con valores superiores a los 300 mm en un día en alguna estación, de los cuales ocho superaron los 400 mm y varios de ellos tuvieron consecuencias catastróficas, como la avenida del Turia en 1957 o la rotura de la presa Tous en 1982.

Dado el comportamiento caótico de la atmósfera, la cuantificación del riesgo de origen climático tiene una fuerte componente estadística o del cálculo de probabilidades, tal como ha venido asumiendo la legislación al definir situaciones y grados de riesgo mediante los periodos de retorno o de recurrencia. Las lluvias intensas pueden provocar avenidas e inundaciones que afectan gravemente a obras civiles y a la población, los periodos de retorno a considerar para la protección efectiva contra tales riesgos son obviamente muy altos, con frecuencia de 500, 1000 e incluso 10000 años². La magnitud de las lluvias asociadas con tales periodos de retorno es muy incierta dada la escasa longitud de las series pluviométricas disponibles y la amplificación que la estadística de extremos, por su carácter exponencial, imprime a los errores en los datos, por pequeños que estos sean.

La distribución utilizada tradicionalmente para el cálculo de periodos de retorno de precipitaciones máximas diarias es la distribución de Gumbel. Sin embargo desde hace tiempo existen en la literatura evidencias claras de que dicha distribución infravalora los valores de precipitación asociados a periodos de retorno altos.

De entre las numerosas distribuciones de extremos desarrolladas en la literatura, la alternativa obvia a la Gumbel es la distribución General de Valores Extremos GEV, utilizada oficialmente en varios servicios meteorológicos europeos y que incluye como caso particular la distribución de Gumbel. El inconveniente de la GEV es que, al tener tres parámetros libres, necesita de series de máximos anuales muy largas para su estimación. Otra opción es la SQRT-ETMAX, distribución desarrollada en 1987 por los ingenieros japoneses Etoh y Murota³ que depende sólo de dos parámetros y es seguramente la más sencilla de entre las que están basadas explícitamente en una modelización estadística de los máximos de precipitación. Esta función no es muy usada en la literatura, pero en España ha sido popularizada entre la comunidad hidrológica por un estudio realizado en 1999 por el Ministerio de Fomento⁴ para la confección de un mapa para el cálculo de las máximas precipitaciones diarias en la España Peninsular. Este mapa sirve de referencia para el dimensionado hidráulico de las obras de drenaje de las carreteras. Más recientemente la AEMET⁵ también la ha utilizado en un estudio sobre las precipitaciones máximas diarias para un conjunto de estaciones pluviométricas de España.

En este trabajo se examina la idoneidad de las distribuciones mencionadas arriba para el tratamiento estadístico de los datos empíricos de la red pluviométrica de la AEMET en la Comunidad Valenciana. Las distribuciones se pondrán a prueba relacionando sus parámetros con variables climatológicas, tales como el promedio anual de días de lluvia o la cantidad de precipitación media en exceso de un determinado umbral.

¹ El valor más alto son los 840 mm registrados el día 18 de Octubre de 1940 en el pluviómetro de La-Llau situado en los pirineos orientales franceses, cerca de la frontera española, fuente: <http://pluiesextremes.meteo.fr>

² El Reglamento del Dominio Público Hidráulico (BOE 16-1-2008 nº 14) define las zonas inundables como «las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de quinientos años». Los aliviaderos de las grandes presas, cuya rotura sería catastrófica, deben poder desaguar la llamada «avenida máxima» que en la práctica se asimila a la avenida de diez mil años de retorno.

³ *SQRT-EXPONENTIAL TYPE DISTRIBUTION OF MAXIMUM*. T. Etoh y A. Murota, Hydrologic frequency modeling: proceedings of the international symposium on flood frequency and risk analyses, 14-17 May 1986, Louisiana State, Baton rouge, USA, ed. D. Reidel (1987).

⁴ *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Serie Monografías*, Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento), 1999, Madrid.

⁵ *Estudio sobre precipitaciones máximas diarias y periodos de retorno para un conjunto de estaciones pluviométricas seleccionadas de España*. AEMET (Ministerio de Medio Ambiente), 2007, Madrid.

Episodios de precipitaciones extremas en la Comunidad Valenciana

Una de las características con las que intuitivamente se asocia el clima de la Comunidad Valenciana son las lluvias torrenciales de final de verano y del otoño, y un reto que tiene la ciencia es estimar la frecuencia y los periodos de retorno de esas lluvias torrenciales, para adaptar las infraestructuras a los efectos asociados a esos fenómenos atmosféricos extremos.

Aparte de las incertidumbres que surgen de las distintas técnicas estadísticas que más adelante comentaremos, existen otras incertidumbres y limitaciones que podríamos decir que son internas de las propias series de datos con las que se van a realizar los ajustes estadísticos.

Las primeras limitaciones son de tipo temporal; una relacionada con la escasa longitud de las series. En 2011 sólo existen 27 estaciones que estén operativas y que tengan un número de años con datos mayor o igual a 50. Para el caso del Mediterráneo disponer de series con un gran número de años resulta crítico para poder realizar los ajustes con garantías, sobre todo si tenemos en cuenta, como veremos más adelante, que existen muchos ejemplos en los que el valor más alto de la serie se separa notablemente de los demás, siendo quizás los casos más extremos de los analizados los registrados en Gandía y Oliva en noviembre de 1987 (figura 1 derecha), con 720 l/m² y 817 l/m² respectivamente. Los segundos registros más altos en estos observatorios son 305 l/m² en Gandía y 226 l/m² en Oliva.

Otro tipo de limitación temporal está relacionada con la hora de la toma de mediciones. Hay que tener en cuenta que la mayoría de las series utilizadas para los ajustes estadísticos son series de la red secundaria, y por tanto series que ofrecen un dato en el llamado día pluviométrico, entre las 07UTC de un día y las 07UTC del día siguiente. Esta rigidez en el horario de la toma de datos da a lugar a que en determinadas ocasiones los máximos en 24 horas queden repartidos entre 2 días pluviométricos. Por poner un ejemplo cercano, esto es lo que ocurrió en las inundaciones del 12 de octubre de 2007 en la comarca alicantina de la Marina Alta, donde se llegaron a registrar más de 400 l/m² en poco más de 12 horas entre las 00 horas UTC del día 12 y las 14 horas UTC del mismo día, pero en las series pluviométricas de las estaciones de la red secundaria, estos datos quedaron repartidos entre los días pluviométricos 11 y 12 (por ejemplo en Orba hay registrados 223.0 l/m² el día 11 y 211.8 l/m² el día 12).

En cuanto a las limitaciones de tipo espacial, la primera es la escasa densidad de series largas de datos. Esta escasa densidad se hace más aguda en zonas despobladas de montaña, lo que da lugar a que en aquellos episodios de lluvias torrenciales, como el que dio lugar a la rotura de la presa de Tous en 1982, o la riada del Turia en Valencia en 1957, no se tengan datos de aquellos lugares donde probablemente se han producido los máximos, que suelen estar situados en las zonas altas de las cadenas montañosas preitorales.

En este tipo de lluvias torrenciales suele existir una intensa circulación de componente este y el flujo en niveles bajos está bien marcado, con un máximo de viento en capas bajas, lo que hace que los sistemas nubosos penetren hacia el interior de la Comunidad. Los sistemas atmosféricos que dan lugar a estas lluvias torrenciales suelen ser provocados por un tren orográfico-convectivo regenerativo que se caracterizan por el paso sucesivo de distintas células por un mismo lugar debido a la interacción orográfica que provoca precipitaciones persistentes sobre una misma zona, que llegan acumular grandes cantidades de precipitación. Estos episodios de lluvias torrenciales climáticamente están caracterizados porque dejaron un volumen de precipitación⁶ superior a 2000 Hm³ y el área abarcada por la isoyeta de 100 l/m² fue muy grande, superior a 8000 km².

Para el caso de las lluvias torrenciales de octubre de 1982, episodio catastrófico que reunía las características citadas en el párrafo anterior, existen estimaciones en base al agua acumulada en un aljibe en Casas del Barón, que sitúan un máximo pluviométrico de alrededor de 1000 l/m² en la zona de la Muela de Cortes, donde no existía ningún pluviómetro en 1982 (figura 1 izquierda).

Sin embargo, existen otros episodios de lluvias de intensidad torrencial, con un bajo volumen total de precipitación y una dimensión espacial reducida en la que el área abarcada por la isoyeta de 100 l/m² es inferior a 500 km², como es el caso del 23 de septiembre de 2008 en Sueca o el de Alcalá de Xivert del 10 de noviembre de 2003.

Estos episodios son típicos del final del verano o de los primeros días del otoño, aunque se han llegado a observar hasta mitad de noviembre, y suelen surgir con configuraciones atmosféricas más sutiles, en las que la gran inestabilidad termodinámica es el elemento más relevante, y que da lugar a sistemas convectivos estáticos, relativamente pequeños, que permanecen durante un mismo lugar durante varias horas, lo que da lugar a inundaciones en una zona a veces de tamaño inferior al de una comarca.

⁶ Las lluvias intensas en la Comunidad Valenciana, Rafael Armengot, INM (2002).

Estos fenómenos presentan un gran interés desde el punto de vista estadístico, porque son registrados por muy pocos puntos de medida, al contrario de lo que pasa en los casos de gran extensión, y presentan una menor dependencia del relieve, siendo el factor geográfico más significativo la cercanía al mar.

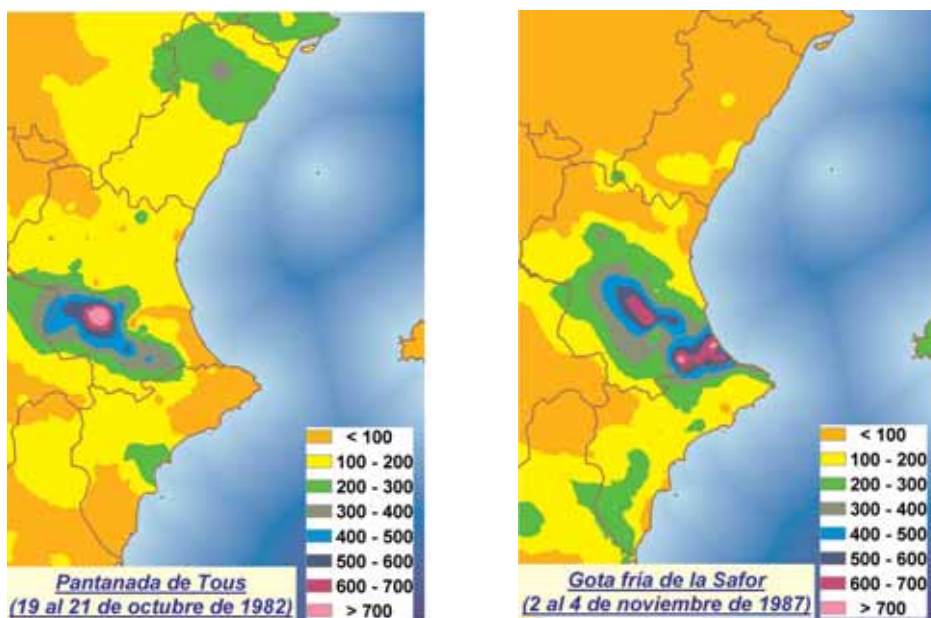


Figura 1: Los dos grandes episodios de precipitación del último cuarto del siglo XX en la Comunidad Valenciana. En ellos la lluvia máxima en 24 horas superó los 700 l/m².

Además de las incertidumbres de tipo espacial y temporal, hay que tener en cuenta que es precisamente en estas situaciones extremas cuando más difícil resulta efectuar mediciones correctas de la precipitación⁷. La red secundaria de AEMET está dotada de pluviómetros de tipo Hellmann, con capacidad de algo más de 200 l/m², por tanto, a no ser que el observador esté muy atento a vaciar el pluviómetro frecuentemente en medio de la lluvia torrencial, lo habitual es que el pluviómetro desborde y no se pueda tener constancia de la lluvia que realmente cayó. Ocurrió por ejemplo en las lluvias torrenciales de octubre de 2007 en la comarca de La Marina Alta en las que el pluviómetro de Calp se desbordó, o en el año 1987 con varios pluviómetros de la comarca de La Safor que también se desbordaron, aunque los colaboradores de Oliva y Gandía lograron vaciar varias veces el pluviómetro cuando estimaban que estaba a punto de desbordarse, logrando así medir las cantidades excepcionales recogidas en ese episodio.

Sería por tanto interesante dotar a las estaciones pluviométricas cuya situación geográfica es propicia para provocar lluvias superiores a 200 l/m² de pluviómetros de tipo tropical, aunque en situaciones extremas ni esta solución sería suficiente para medir la precipitación, ya que por ejemplo en el caso de las lluvias que dieron lugar a la pantanada de Tous, se dio la casualidad que en la estación de Bicorp «Barrancó Salado», existía un pluviómetro de tipo tropical, con capacidad de 632 l/m², pero este pluviómetro también se desbordó.

Los grandes episodios de lluvias como los representados en la figura 1 se han repetido con diversa frecuencia a lo largo de la historia, dejando abundante literatura más o menos detallada de los grandes daños que provocaron. Así, la denominada riada de San Carlos, del 4 y 5 de noviembre de 1864 que afectó a la ribera del Júcar, fue la más intensa en las comarcas ribereñas de este río desde al menos el año 1600, y similar en cuanto a caudal estimado y altura del agua alcanzada en Alzira y Carcaixent a la de 1982.

También fueron importantes la riada del Segura de los días 14 y 15 de octubre de 1872, que causó casi un millar de víctimas y enormes pérdidas materiales, y la del Turia de octubre de 1957, aunque hay decenas de otros episodios con consecuencias catastróficas, pero con una dimensión espacial menor, por haberse producido cerca de la costa (riada de Jávea en 1957, lluvias torrenciales en Alicante en 1997, etc.)

⁷ El temporal de octubre de 1982 en el marco de las lluvias torrenciales en la cuenca baja del Júcar. Pérez Cueva y Armengot, Cuadernos de Geografía. Universidad de Valencia (1983).

Análisis estadístico de las series de precipitaciones máximas en la CV.

La distribución de Gumbel es tradicionalmente una de las más usadas para el análisis de las series de extremos y en particular de precipitaciones máximas anuales. Existen varias razones para ello; entre otras podemos citar su simplicidad, el que tenga sólo dos parámetros libres lo que permite su estimación a partir de series anuales cortas, también el ser una de las tres distribuciones asintóticas de máximos clásicas e incluir en su dominio de atracción muchas de las funciones utilizadas para modelar las series diarias. Pero quizás la razón principal de su popularidad hay que buscarla en los viejos tiempos anteriores al uso generalizado de los ordenadores, y se debe a la disponibilidad comercial de «papeles de probabilidad de valores extremos» (en concreto de Gumbel) en los cuales se dibujaban a mano los datos observados, los cuales debían caer aproximadamente en una línea recta si provenían de la distribución postulada.

Estos papeles eran muy útiles para extrapolar los datos y estimar gráficamente las precipitaciones máximas esperadas para periodos de retorno mayores que la longitud de la serie. La aparición ocasional de un punto «atípico», muy alejado de la recta en la que se agrupan los demás, era (y es) una situación molesta para el análisis estadístico que frecuentemente se resolvía descartando el punto discrepante al considerarlo un error de observación o de transcripción. Pero, si esto último no es cierto, el valor atípico indica más bien que la población estadística (de la cual la serie es una muestra) tiene una cola más larga de lo supuesto a priori y descartarlo supondría una pérdida de información muy importante.

Aunque han pasado de moda los papeles de extremos como método de ajuste, sigue siendo indispensable la representación gráfica en el análisis de las series, el ojo (y la experiencia) es siempre el mejor instrumento para detectar posibles errores, idiosincrasias, valores atípicos, etc. en los datos. Es conveniente dibujar también los intervalos de confianza empíricos y un gráfico de la serie temporal para chequear posibles inhomogeneidades.

Como ejemplo, extremo pero ilustrativo, de esto que se viene diciendo véase en la figura 2 el caso de la serie de precipitaciones máximas anuales de Oliva. Sin considerar el valor de 817 mm, ciertamente extraordinario, registrado en 1987 los datos se ajustan bastante bien a una recta cuya extrapolación proporciona para dicho valor un periodo de retorno del orden de cuatro millones de años. Uno puede convencerse de ello, regla en mano, trazando una recta sobre los puntos y extrapolando hasta leer el valor de la variable reducida de Gumbel correspondiente al suceso atípico, este valor está en torno a 15, recordando que dicha variable reducida es $-\ln(-\ln(F))$, donde F es la distribución de probabilidad acumulada, se obtiene como periodo de retorno $T=1/(1-F)=3300000$ años aproximadamente (obsérvese la escala doble exponencial del eje horizontal superior del papel de Gumbel).

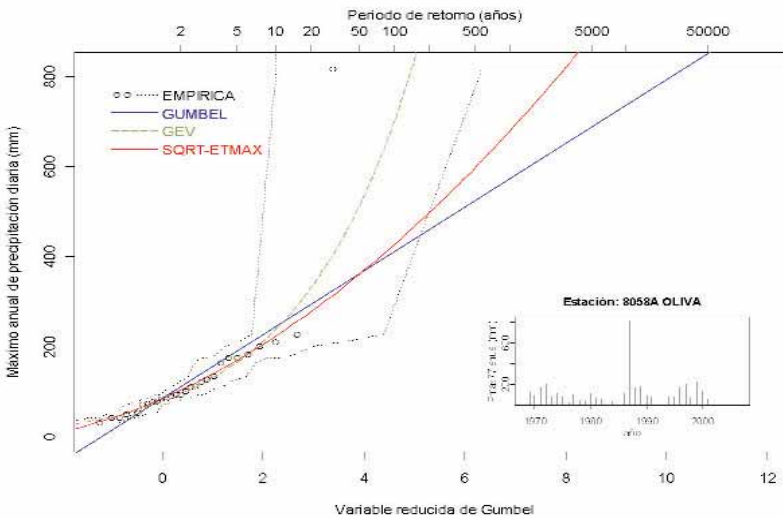


Figura 2 Gráfica de extremos de la serie de Oliva, los puntos indican el valor medio de la distribución empírica y las curvas negras punteadas los cuantiles 0.05 y 0.95 de dicha distribución; en azul el ajuste a los datos de una distribución de Gumbel, en rojo el ajuste a una distribución SQRT-ETMAX y en verde el ajuste a una distribución GEV. La figura insertada muestra la serie temporal correspondiente.

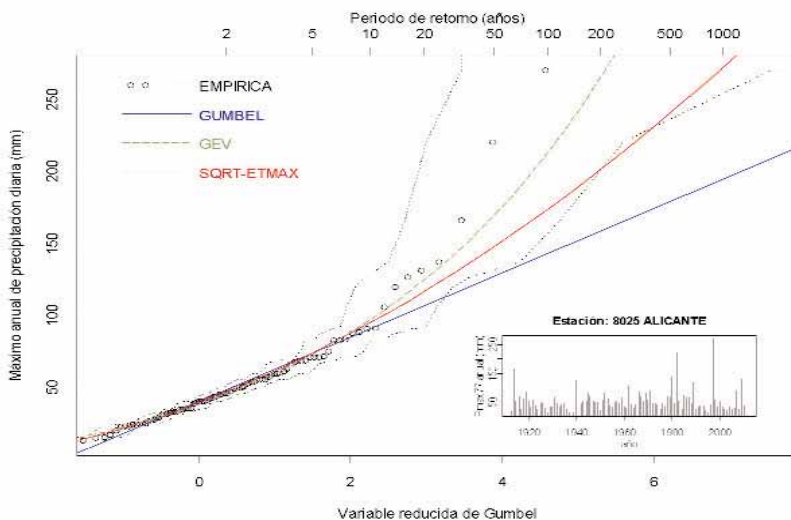


Figura 3 Gráfica de extremos de la serie de la estación 8025 Alicante-Ciudad Jardín (desde 1940) prolongada con la de la estación 8025A Alicante-Instituto (de 1913 a 1939).

Es decir que, si se da crédito a la Gumbel, este suceso se hubiese considerado prácticamente imposible. Si a pesar de todo se tiene en cuenta en el ajuste, dándole un peso menor que a los demás puntos (se ha utilizado para ello la aplicación recientemente desarrollada por la AEMET⁸) la recta de Gumbel ajustada queda ligeramente inclinada respecto al grupo de puntos «normales» (es la recta azul en la figura 2) y el valor de 817 mm corresponde a un periodo de retorno de 31200 años. Es decir, la introducción de este suceso reduce el periodo de retorno atribuido por la Gumbel en dos órdenes de magnitud.

El ajuste a los datos de Oliva de una distribución SQRT-ETMAX, por el método de máxima verosimilitud, atribuye a este suceso un periodo de retorno de 2900 años (es la curva en rojo de la figura 2), además eliminando dicho suceso de la serie se obtiene como periodo de retorno un valor cuarto veces el anterior (y no 100 veces superior como ocurría con la distribución de Gumbel). La figura 2 incluye también el ajuste a una distribución generalizada de extremos GEV obtenido por el método de los L-momentos⁹. Esta distribución tiene gran flexibilidad en su forma debido a sus tres parámetros libres, uno de ellos, el parámetro de forma k , controla si la curva en el gráfico de Gumbel es una recta (para $k=0$, i.e. es una Gumbel), cóncava ($k<0$, con una cota inferior) o convexa ($k>0$, con una cota superior). Al ajustar la GEV a la serie de Oliva sin el dato de 1987 se obtiene que k es aproximadamente cero, y por tanto se trata de una Gumbel, con un periodo de retorno de unos cinco millones de años, pero al introducir en la serie el valor extremo de 817 mm el ajuste de la GEV cambia enormemente y reduce el periodo de retorno a sólo 141 años.

Aproximadamente un 25% de las series de máximos anuales de precipitación de la Comunidad Valenciana muestran valores atípicos, estas series provienen de estaciones repartidas por todo el territorio de la Comunidad, aunque suelen agruparse en conjuntos de estaciones próximas al afectar generalmente las lluvias extremas a una extensión considerable. Muchas veces sólo el valor más alto de la serie se aleja claramente de los demás, los cuales se sitúan normalmente formando una recta al representarlos en el papel de Gumbel.

Sin embargo en las series más largas se pueden encontrar desviaciones significativas para datos no tan atípicos. Como ejemplo valga la figura 3 que muestra las precipitaciones máximas anuales en la ciudad de Alicante. En la figura los datos ya en el rango entre 100 y 150 mm se separan claramente de lo que sería una recta, pero además los tres registros mayores confirman definitivamente la discrepancia respecto a una distribución de Gumbel. Como en el caso de Oliva, el ajust-

⁸ Aplicación Periodos de Retorno, versión 1.0 AEMET, publicación interna (mayo 2010)

⁹ Para los temas que se tratan aquí una referencia excelente es el cap. 18 *Frequency Analysis of Extreme Events* del *Handbook of Hydrology*, D. Maidmen (coord.) McGraw-Hill (1993).

te que proporciona la SQRT-ETMAX es mucho más plausible que el de la Gumbel, aunque quizás está sobreestimando los periodos de retorno pues llega a superar el límite del cuantil 0.95 de la distribución empírica. La GEV proporciona los periodos de retorno menores para los sucesos extremos, por ejemplo para el valor más alto de la serie (270 mm) estima un periodo de recurrencia de 230 años, al retirar dicho valor de la serie el periodo estimado aumenta a 500 años. Obsérvese que en este caso las discrepancias en los valores de retorno entre las tres distribuciones ya son muy considerables para 100 años de periodo de retorno.

En todos los otros casos de series anuales de máximos de precipitación con valores atípicos en la Comunidad Valenciana se constata que los periodos de retorno estimados por la distribución de Gumbel para los valores atípicos son demasiado altos (generalmente de varias decenas de miles de años), además la inestabilidad de dicha estimación es extrema, frecuentemente el periodo de retorno varía en órdenes de magnitud cuando se retira de la serie el valor máximo. La mera existencia de tales valores atípicos es razón suficiente para rechazar la hipótesis de que las series de máximos anuales de precipitación provengan de una distribución de Gumbel en un clima como el de la Comunidad Valenciana. Es cierto que muchas series no muestran discrepancias significativas respecto a dicha distribución pero esto es esperable dado que los valores atípicos corresponden a periodos de recurrencia en general bastante mayores que 100 años y tienen pocas posibilidades de manifestarse en las series habitualmente cortas de la red pluviométrica en la Comunidad.

En definitiva se puede concluir que la distribución de Gumbel no es adecuada para el análisis estadístico de las precipitaciones máximas en la Comunidad Valenciana. Aunque en el pasado ha sido usada en muchas publicaciones, en general, con buen criterio, no se ha utilizado más allá de 100 años de periodo de retorno. Sin embargo al considerar series con valores atípicos el ajuste a los datos muchas veces sobreestima los valores de retorno para periodos de recurrencia pequeños con el objeto de dar valores razonables para periodos cercanos a los 100 años. Como ejemplo de este tipo de inexactitud la tabla siguiente recoge los valores publicados en el Atlas Climatológico de la Comunidad Valenciana para la ciudad de Alicante, comparados con los empíricos y los de las otras dos distribuciones (compárese también con la figura 3).

MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN DIARIA (mm) PARA LA CIUDAD DE ALICANTE								
PERIODO DE RETORNO (AÑOS)		2	5	10	20	30	50	100
DISTRIBUCIÓN	GUMBEL (*)	56.7	94.3	119.1	143	156.7	173.9	197
	GEV	45.4	72.9	96.6	124.5	143.4	170.2	213
	SQRT-ETMAX	46.8	73.8	94.6	116.6	130.2	148.1	174
	EMPÍRICO	46.0	70.9	90.5	131.8	-	-	-

(*) Publicado en el *Atlas Climático de la Comunidad Valenciana: (1961/1990)* A. J. Pérez Cueva (coord.)

La alternativa obvia a la función de Gumbel es, como se ha dicho, la distribución General de Valores Extremos GEV, que al fin y al cabo incluye a la Gumbel como caso particular (para un parámetro de forma $k=0$). Pero los tres parámetros de la GEV solo se pueden estimar en series de máximos anuales muy largas, en nuestra experiencia de al menos 50 años. Por otra parte resulta plausible que el valor de k debe variar suavemente con la localización geográfica, sin embargo no ocurre así en la práctica sino que es frecuente que la estimación de k cambie apreciablemente de una estación a otras vecinas. Esto se puede atribuir a la escasez de estadística, lo cual implica importantes fluctuaciones en los datos, o a la mediocre calidad de estos últimos. Por ello es indispensable, para la utilización de la GEV, realizar un promediado de los valores de k obtenidos de las series de estaciones próximas con objeto de determinar con mejor precisión los valores de k apropiados para cada región de la Comunidad. Tiene más sentido físico realizar esa regionalización del parámetro k por medio de las series de precipitación diaria y no, como se ha hecho habitualmente, con las series de máximos anuales.

La ventaja de la distribución SQRT-ETMAX frente a la GEV es que, al tener sólo dos parámetros libres, se puede utilizar con series de máximos anuales cortas y no es necesario, en principio, recurrir a ninguna regionalización. Sin embargo queda por demostrar si las aproximaciones implícitas en esta distribución están de acuerdo con los datos de las series diarias de precipitación en la Comunidad Valenciana.

La expresión de la SQRT-ETMAX, $F(x)=\exp[-\lambda(1+\sqrt{\beta\chi})\exp(-\sqrt{\beta\chi})]$ revela claramente su origen en la relación general que existe entre la serie de máximos anuales y la serie de precipitaciones diaria. Esta relación es $F(x)=\exp[-\lambda(1-H(x))]$ donde $F(x)$ es la distribución de probabilidad acumulada

de los máximos anuales. El parámetro λ es el promedio del número anual de episodios (días consecutivos) de lluvia que superan un umbral x_u y $H(x)$ es la probabilidad condicional que en un episodio, una vez superado x_u , no se supere x . En este caso de la SQRT-ETMAX el umbral es nulo, $x_u=0$, mientras que $H(x) = 1 - (1 + \sqrt{\beta x}) \exp(-\sqrt{\beta x})$. Por tanto, la hipótesis esencial de esta distribución es que, para x grandes, $H(x)$ varía como la exponencial de una raíz cuadrada de x y sus autores prolongaron esta función exponencial hasta $x=0$. Según esta hipótesis, $H(x)$ depende solo de un parámetro de escala β . Por ello la forma de la distribución es fija en el papel de Gumbel, siempre es una curva cóncava que no se puede llevar a una recta, aunque en un rango limitado de x se parece más a una recta cuanto menor es β . Este parámetro de escala β está obviamente relacionado con el valor medio de x , de hecho integrando obtenemos $\beta=6/\langle x \rangle$, lo cual le dota de significado físico pues $\langle x \rangle$ es el valor medio de la precipitación en los días de lluvia. Como es lógico el coeficiente de variación es constante $Cv=1.53$.

La expresión habitual de la GEV también se puede escribir en forma idéntica a la relación general citada arriba, entonces identificando se obtiene $H(x) = 1 - [1 - kx/a]^{1/k}$ (es la distribución generalizada de Pareto). En este caso $a=(1+k)\langle x \rangle$ y el coeficiente de variación no es constante, pero depende solo del parámetro de forma k , pues $Cv=1/\sqrt{1+2k}$.

Para un umbral nulo, $x_u=0$, las expresiones anteriores no ajustan correctamente los datos de las series de precipitación diaria de las estaciones de la Comunidad Valenciana, salvo para valores de H mayores que aproximadamente 0.8. Esto significa que los parámetros λ y β , en el caso de la SQRT-ETMAX o de los parámetros λ , α y k en el caso de la GEV, no se ajustan a las propiedades de las series diarias, son unos parámetros estadísticos «efectivos», sin relación directa con la climatología, cuyos valores deben deducirse de la serie anual de máximos y no de la serie de precipitación diaria.

Es necesario utilizar un umbral x_u no nulo para examinar la adecuación de las fórmulas anteriores a las series diarias de la Comunidad Valenciana y relacionarlas con cantidades con significado climatológico o físico. Estas fórmulas siguen valiendo cuando x_u no es cero, simplemente x debe interpretarse como la precipitación diaria en exceso de x_u (es decir $x-x_u$), l sigue siendo el número promedio de episodios que anualmente superan x_u , el valor medio $\langle x \rangle = 6/\beta$ o $\langle x \rangle = \alpha/(1+k)$, según la distribución que consideremos, es el valor medio de la serie de precipitaciones en exceso de x_u (a esta serie se la suele denominar en la literatura «serie de duración parcial» al contener solo la estadística de los episodios que superan un umbral). En el presente trabajo se ha realizado un estudio preliminar cuyos resultados, bastante prometedores, se comentan a continuación.

Un umbral de $x_u=30$ mm parece suficiente para separar los días de lluvia potencialmente extrema de aquellos, mas frecuentes, de precipitación normal. Con un umbral tan alto el número de episodios (días consecutivos) que superan el umbral es solo ligeramente inferior al número de días correspondiente, por ello en este estudio preliminar no se ha hecho distinción entre ambos casos. Para la distribución GEV los datos experimentales de las series de duración parcial de una selección de pluviómetros de la Comunidad están en perfecto acuerdo con las expresiones correspondientes de $H(x)$ en todo el rango de la distribución empírica. El valor del parámetro de forma a utilizar para ello resulta ser básicamente constante en toda la Comunidad e igual a $k=-0.180.03$, se ha regionalizado k considerando zonas bastante amplias (el norte y sur de cada provincia) por tanto no se pueden descartar variaciones fuera de este rango en regiones más pequeñas. Por el contrario, para la SQRT-ETMAX sigue habiendo discrepancias para valores $H < 0.8$ aunque menores que cuando se utiliza un umbral x_u nulo. Además para esta distribución los datos empíricos sugieren que la relación teórica $\beta=6/\langle x \rangle$ debe sustituirse por una relación «efectiva» $\beta=b/\langle x \rangle$ tomando la constante b un valor $b=7.50.5$ en el territorio de la Comunidad. Puesto que los datos experimentales solo proporcionan información para valores de H del orden de 0.999 o menores, las discrepancias anteriores plantean dudas sobre si la extrapolación a valores mayores de H proporcionada por la SQRT-ETMAX es correcta.

Otra dato a favor de la GEV frente a la SQRT-ETMAX es el valor del coeficiente de variación deducido de las series de duración parcial empíricas. Esta cantidad no muestra una estructura geográfica clara, es básicamente constante en toda la Comunidad Valenciana, y tiene un valor medio $\langle Cv \rangle = 1.28$ con una pequeña dispersión pues la desviación estándar es solo 0.05. Este valor empírico está en desacuerdo con el valor teórico dado por la SQRT-ETMAX, que es 1.53, pero en acuerdo con un valor constante del parámetro de forma k de la GEV igual a $k=(Cv^2 - 1)/2 = -0.19$ que está lógicamente en el rango de k mencionado anteriormente determinado a partir del ajuste de las series de duración parcial.

Todo esto apoya la idea de que la distribución GEV con un valor de k regionalizado es la opción más adecuada para sustituir a la Gumbel en el análisis de los periodos de recurrencia de las precipitaciones máximas. Esta función tiene además la ventaja de ser mucho más utilizada en la comunidad internacional dedicada a la climatología, incluso para el análisis de las predicciones de modelos de cambio climático¹⁰. Por el contrario la SQRT-ETMAX es poco conocida, es demasiado rígida

¹⁰ Véase por ejemplo el interesante artículo *Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models*. Ch. Frei y otros. Journal of Geophysical Research, vol 111, D06105, (2006).

en su forma y proporciona estimaciones de periodos de retorno en general demasiado altas, aunque mucho más cercanas a la realidad que la distribución de Gumbel.

En la figura 4 se muestran los mapas del número de días promedio que al año superan el umbral de 30mm y del valor medio de la precipitación en exceso de esos 30mm. Puede observarse una estructura geográfica muy marcada que está de acuerdo con el conocimiento previo que se tiene de la distribución geográfica de las precipitaciones extremas en la Comunidad Valenciana. Los valores de $\langle x \rangle$ y de λ en los mapas de la figura 4 controlan el periodo de retorno correspondiente.

Para periodos de retorno T mayores que 10 años la relación con la serie de duración parcial es esencialmente $T=1/\lambda(1-H(x))$, el sentido de esta ecuación está claro pues $\lambda(1-H(x))$ es la frecuencia promedio de llegada de los episodios que superan el umbral x . Por ejemplo para la ciudad de Alicante los mapas indican $\lambda = 2$ días y $\langle x \rangle = 20$ mm, por tanto para una precipitación máxima anual de 270 mm sustituyendo en las fórmulas anteriores $x=270-30=240$ mm y $k=-0.18$ se obtiene $H = 1-[1-(k/(1+k))(x/\langle x \rangle)]^{1/k} = 0.99923$ y el periodo de retorno $T=1/2(1-0.99923)=649$ años. Este valor es bastante razonable como se puede observar en la figura 3, es inferior al atribuido por el ajuste de la SQRT-ETMAX a la serie de máximos anuales y parece más correcto que aquel al no acercarse tanto al cuantil 0.95 de la distribución empírica, además es superior al periodo estimado por la GEV sin regionalización del parámetro k , que puede estar dando demasiado peso a los dos valores más altos de la serie los cuales son ciertamente excepcionales.

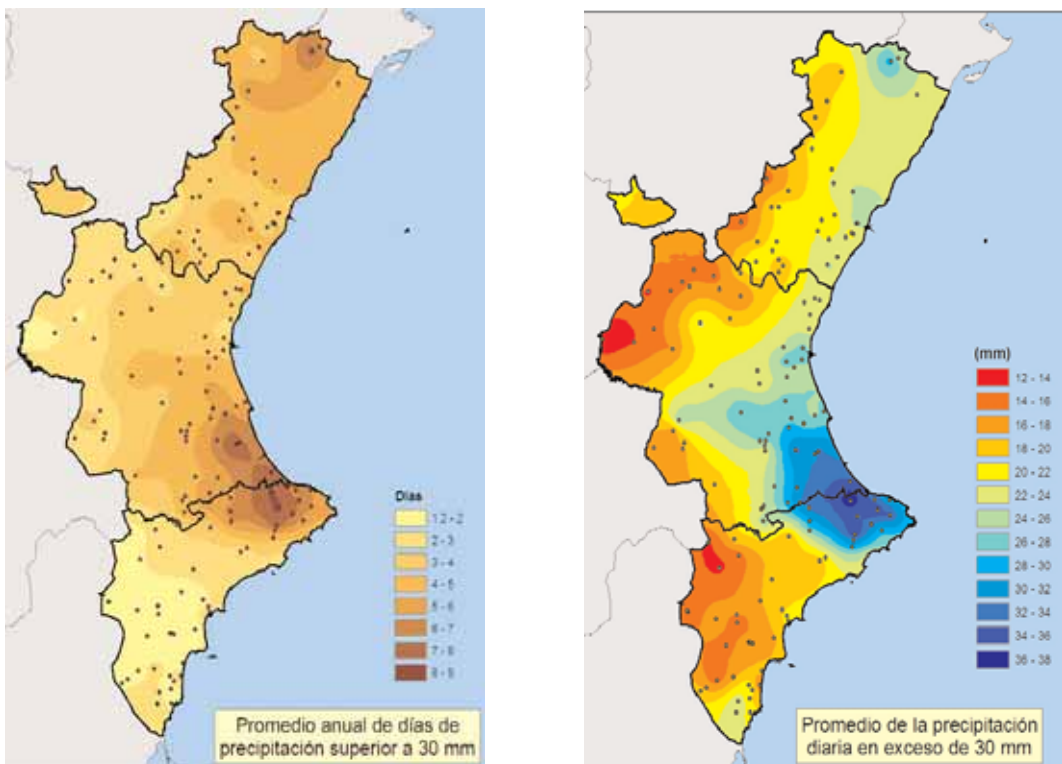


Figura 4 Número promedio de días al año que superan una precipitación de 30 mm (izquierda) y precipitación media diaria en exceso de los 30 mm (derecha) en la Comunidad Valenciana. Los puntos sitúan las estaciones utilizadas para confeccionar los mapas.

El ejemplo anterior muestra los beneficios de la regionalización de k , es plausible que la incorporación de información geográfica en la distribución teórica debe mejorar las estimaciones de los periodos de retorno más grandes. Por otra parte hay que tener en cuenta que el valor de $\langle x \rangle$ influye mucho al periodo de retorno y la estimación de este valor a partir de los datos, salvo en las series con más estadística, puede tener un error de aproximadamente un 10%. Para el caso de Alicante una media de $\langle x \rangle = 22$ mm reduce el periodo de retorno de 270 mm hasta 445 años según la GEV regionalizada. Esto da una idea del grado de incertidumbre en la estimación de periodos de retorno muy altos.

De todo lo dicho, observando los mapas de la figura 4, se comprende que los valores tan altos de $\langle x \rangle$ y de λ alcanzados en la zona costera del sur de la provincia de Valencia y el norte de la de Alicante reduzcan en esta región los periodos de retorno de los valores extremos de precipitación en uno o dos órdenes de magnitud respecto al resto de la Comunidad Valenciana. Los casos más extraordinarios en cantidad absoluta de precipitación diaria, como los 817 mm registrados en Oliva, sólo es probable que se den en esta zona. Aún así estos registros extraordinarios deben tener periodos de retorno bastante altos, en el caso de Oliva, sustituyendo $x=817-30=787\text{mm}$, $\lambda=8$ días/año y $\langle x \rangle=35\text{mm}$, en la GEV regionalizada se obtiene $H=0.99995$ y un periodo de retorno de $T=2500$ años. Esta cifra está afectada de incertidumbres en el rango de unos mil años debidas a la indeterminación del valor de $\langle x \rangle$ y λ , a esto hay que añadir posibles errores en el valor de k regionalizado para la zona costera en donde se sitúa Oliva, que podrían reducir este periodo de retorno quizás hasta valores cercanos a los 1000 años o incluso menores.

No es de extrañar que se hayan registrado estos sucesos con periodos de retorno milenarios pues la base de datos de la red pluviométrica de la AEMET en la Comunidad Valenciana contiene aproximadamente 15000 años de observaciones diarias repartidos entre las 708 estaciones que han estado o están abiertas en la Comunidad. Obviamente no todos los sucesos milenarios corresponden a una cantidad extraordinaria de precipitación absoluta, en sitios donde llueve poco, como el sur de la provincia de Alicante, precipitaciones diarias en el rango de 200 a 400 mm tienen periodos de recurrencia cercanos o superiores a los 1000 años.

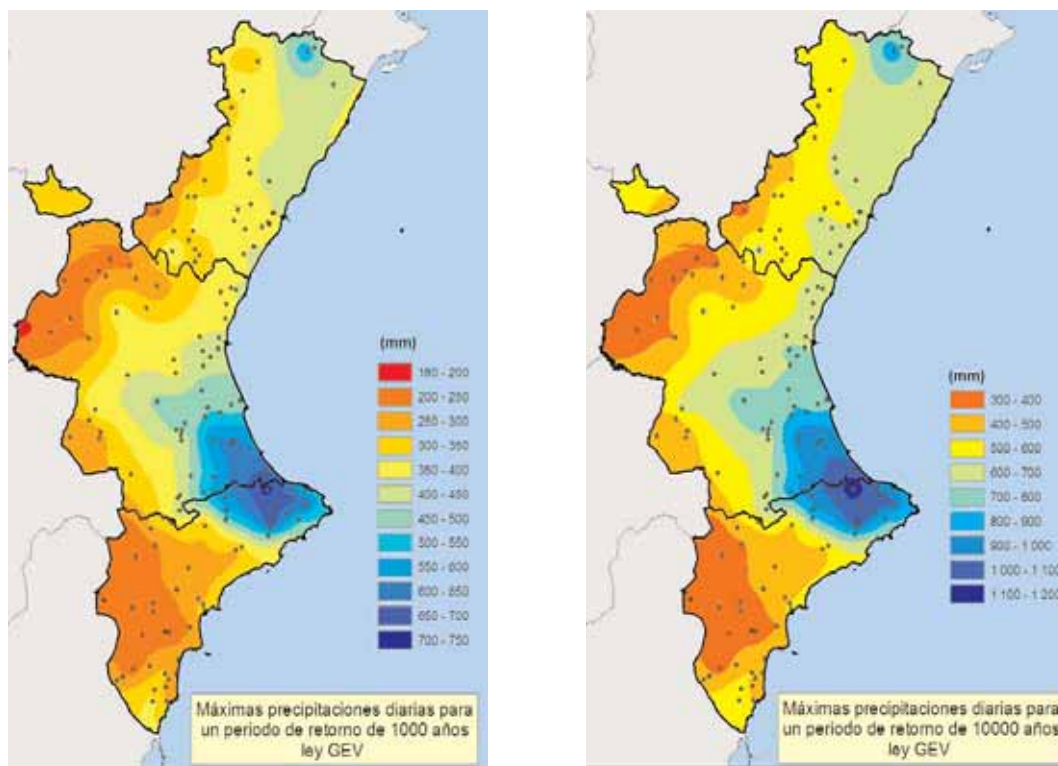


Figura 5 Máximas precipitaciones esperadas en un día para un periodo de retorno de 1000 años (izquierda) y de 10000 años (derecha) según la ley GEV con parámetro de forma constante $k=-0.18$.

Por último la figura 5 muestra los mapas de precipitaciones máximas en la Comunidad Valenciana para periodos de retorno de 1000 y 10000 años calculados mediante la distribución GEV con parámetro $k=-0.18$ fijo y los valores de λ y $\langle x \rangle$ dados en la figura 4. Obsérvese que el valor de $\langle x \rangle$, es decir la precipitación media en exceso de 30 mm, es el que controla básicamente la precipitación máxima esperada. Con todas las reservas pertinentes a un estudio previo como este, y a falta de un trabajo más detallado, es razonable pensar que los mapas anteriores se acercan a las cantidades reales de precipitación diaria que pueden producirse en casos extraordinarios en la Comunidad Valenciana.