
CARACTERÍSTICAS DE LA PRECIPITACIÓN EXTREMA EN ALGUNAS LOCALIDADES DE VENEZUELA

ARACELIS HERNÁNDEZ, LELYS GUENNI
y BRUNO SANSÓ

RESUMEN

Un potencial cambio climático podría también traer cambios en las características extremas de la mayoría de las variables climáticas, particularmente en la lluvia. Modelar el comportamiento de la lluvia extrema es importante debido al impacto que ésta tiene sobre los desastres naturales en zonas altamente vulnerables. En este sentido y en el marco de la teoría clásica de valores extremos, se propone el modelo de Valores Extremos Generalizados (GEV) para estudiar el comportamiento de los eventos extremos de lluvia en Venezuela. Se usó el método Bayesiano para estimar los parámetros del modelo y hacer inferencia predictiva del modelo GEV. Los métodos Markov Chain Monte Carlo (MCMC) fueron usados para obtener muestras a partir de las distribuciones a posterior de los

parámetros del modelo. Los resultados numéricos son presentados para seis localidades en Venezuela que representan diferentes tipos de mesoclimas: La Mariposa (Estado Miranda), San Francisco de Macanao (Estado Nueva Esparta), Villa El Rosario (Estado Zulia), Machiques (Estado Zulia), Carora (Estado Lara), y San Carlos de Río Negro (Estado Amazonas). Las simulaciones de la distribución predictiva sugieren que los modelos Gumbel y Fréchet son los más apropiados para representar los máximos anuales de la mayor parte de las localizaciones estudiadas; sin embargo, en las localizaciones con condiciones extremas dentro de mesoclimas áridos o muy húmedos, el modelo Weibull es el más apropiado para representar los máximos anuales de lluvia.

El modelaje de la lluvia ha sido un tema de mucho interés y de amplio desarrollo en los últimos años, por la importancia que este tema tiene en la resolución de problemas en el campo de la hidrología, la climatología, la agricultura, la ecología y, más recientemente, en estudios relacionados con la evaluación de los riesgos a eventos extremos. El desarrollo en los últimos años de diferentes técnicas de modelaje ha permitido incrementar el grado de complejidad en los modelos de lluvia, permitiendo una mejor captura de toda la dinámica física que gobierna a este fenómeno natural (Bar-

dossy y Plate, 1992; Sansó y Guenni, 1999a, b; 2000).

Actualmente hay un gran interés en determinar las consecuencias que tiene el cambio climático global y el efecto invernal sobre muchas variables que se relacionan con el clima, con la agricultura, la hidrología, etc., por nombrar las más importantes. Surge la necesidad de desarrollar modelos de lluvia que permitan no sólo comprender la estructura probabilística que sigue un fenómeno físico sometido a fuertes cambios, sino también poder modelar el comportamiento y predecir la ocurrencia e intensidad de eventos extremos de lluvia bajo

condiciones más dinámicas, acorde con el escenario de cambio climático global y poder medir el impacto en zonas que puedan ser altamente vulnerables.

En este contexto se puede incluir la teoría de valores extremos, definiéndola como el área de la estadística dedicada a desarrollar modelos y técnicas que permitan estimar el comportamiento de eventos inusuales o raros (Coles, 2001). Estos eventos raros son los que pertenecen a la cola de la distribución y están alejados del centro (media, mediana).

Sin embargo, no hay una definición formal de eventos extremos. En muchos casos, los eventos

PALABRAS CLAVE / Distribución Generalizada de Extremos / Métodos Bayesianos / Métodos Markov Chain Monte Carlo / Teoría Clásica de Valores Extremos /

Recibido: 09/03/2010. Modificado: 10/02/2011. Aceptado: 17/02/2011.

Aracelis Hernández. Doctora en Ingeniería, Universidad Simón Bolívar (USB), Venezuela. Profesora, Universidad de Carabobo, Venezuela. Dirección: Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias y Tecnología, y Centro de Análisis, Modelado y Tratamiento de Datos (CAMYTD), Universidad de Carabobo, Venezuela. e-mail: arhernan@uc.edu.ve

Lelys Guenni. Ph.D. en Ciencias Ambientales, Griffith University, Australia. Profesora, USB, Venezuela. e-mail: lbravo@cesma.usb.ve

Bruno Sansó. PhD en Matemáticas, Universidad Central de Venezuela, Venezuela. Profesor, University of California, Santa Cruz, EEUU. e-mail: bruno@ams.ucsc.edu

extremos se pueden definir como aquellos eventos que exceden en magnitud algún umbral, pero también se pueden definir como el máximo o mínimo de una variable sobre un cierto periodo.

Un tema interesante y necesario en el marco del modelaje de la lluvia es determinar la distribución que siguen sus eventos extremos por el impacto de los desastres que estos pueden causar sobre determinadas zonas de interés, además de permitir la evaluación de las amenazas y riesgos implícitos. En particular, en la teoría clásica de valores extremos se desarrolla toda una metodología que permite determinar qué distribución límite alcanza un conjunto de máximos o mínimos como eventos extremos de un proceso (Fisher y Tippett, 1928; Gnedenko, 1943; Gumbel, 1958; Galambos, 1978). Si

$$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (1)$$

donde X_1, X_2, \dots, X_n son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, entonces el rango completo de distribuciones límites que se alcanzan para estos máximos, está especificado por el teorema de los Tipos de Extremos (Gnedenko, 1943) que establece sólo la existencia de tres posibles distribuciones límites: Fréchet, Weibull y Gumbel.

Sin embargo, estas tres distribuciones se pueden unificar en una sola, conocida como la distribución generalizada de extremos (GEV) (Von Mises, 1954; Jenkinson, 1955). Esta distribución tiene la forma

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (2)$$

definida sobre el conjunto

$$\left\{ z: 1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma} \right) > 0 \right\}$$

donde los parámetros satisfacen las condiciones: $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ y $-\infty < \xi < \infty$. El parámetro μ es el parámetro de localización, σ es el parámetro de escala, y ξ es el parámetro de forma, el cual determina el comportamiento de la cola de la distribución que siguen los datos X_i .

Otra característica importante de la distribución generalizada de extremos es la estimación de los cuantiles extremos que se pueden obtener invirtiendo la Ec. 2:

$$|x| = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi} \right] & \text{para } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\} & \text{para } \xi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde $G(z_p)=1-p$; y z_p se llama el nivel de retorno asociado con el periodo de

retorno $1/p$. Para un grado razonable de exactitud, se espera que el nivel z_p sea excedido en promedio cada $1/p$ años; y más precisamente, z_p es excedido por el máximo anual en cualquier año con probabilidad p .

En este contexto, el propósito del presente estudio es la caracterización de los eventos extremos de lluvia en Venezuela utilizando la teoría de valores extremos. La intención es determinar la distribución límite que alcanzan los máximos anuales de lluvia registrados para seis estaciones meteorológicas localizadas en distintos estados del país y con mesoclimas diferentes, mediante el ajuste del modelo GEV empleando el método Bayesiano, y explicar los resultados en el contexto climatológico de acuerdo a las características geográficas de cada zona.

Por otra parte, si bien la idea de intentar una caracterización de los eventos extremos de lluvia en Venezuela necesita del análisis de los máximos anuales para más localidades geográficas, los resultados obtenidos para las seis estaciones meteorológicas estudiadas servirán de preámbulo a trabajos futuros en el intento de caracterizar los eventos extremos de lluvia para cada mesoclima existente.

Posteriormente se hace una introducción a la teoría clásica de valores extremos presentando el modelo GEV y una breve referencia a la metodología Bayesiana empleada en el ajuste de este modelo. Luego se muestra y se analiza los resultados obtenidos al ajustar el modelo GEV, bajo los métodos Bayesianos, a los registros de máximos anuales de lluvia para las seis localidades geográficas escogidas en diferentes mesoclimas de Venezuela. Finalmente, se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros como continuación a esta investigación.

Distribución Generalizada de Extremos

Las distribuciones límites de valores extremos surgen formalmente como distribuciones límites para el máximo o el mínimo de una secuencia de variables aleatorias.

Si $M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ donde X_1, X_2, \dots, X_n son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, entonces el rango completo de posibles distribuciones límites para el máximo reescalado está dado por el teorema de los Tipos de Extremos.

Teorema 1 (Gnedenko, 1943)

Si existen secuencias $\{a_n > 0\}$ y $\{b_n\}$, tales que

$$P \left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq z \right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} G(z)$$

para alguna distribución no degenerada G , entonces G pertenece solo a una de estas tres distribuciones:

$$G_1(z) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{z-b}{a} \right) \right] \right\} \quad -\infty < z < \infty \quad (4)$$

$$G_2(z) = \begin{cases} 0 & z \leq b \\ \exp \left\{ - \left(\frac{z-b}{a} \right)^\alpha \right\} & z > b, \alpha > 0, \alpha > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$G_3(z; \alpha) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[- \left(\frac{z-b}{a} \right)^\alpha \right] \right\} & z < b, \alpha > 0, \alpha > 0 \\ 1 & z \geq b \end{cases} \quad (6)$$

Por el contrario, cada una de estas distribuciones puede aparecer como límite de la distribución de

$$M_n^* = \frac{M_n - b_n}{a_n}$$

y en particular, esto sucede cuando G es la función de distribución de X .

El teorema 1 implica que M_n se puede estabilizar escogiendo secuencias adecuadas, $\{a_n\}$ y $\{b_n\}$, de tal manera que la variable normalizada, M_n^* , alcance como distribución límite una de las tres posibles distribuciones para valores extremos; lo interesante de este resultado es que estas tres distribuciones límites son las únicas posibles distribuciones para M_n^* sin importar cual función de distribución parental F tenga la población, de aquí la analogía con el teorema central del límite. Estas tres distribuciones son conocidas como las distribuciones Gumbel, Fréchet y Weibull, respectivamente. Sin embargo, estas tres distribuciones se pueden combinar en una sola conocida como la distribución generalizada de valores extremos (GEV) (Von Mises, 1954; Jenkinson, 1955) como se mencionó anteriormente. Esta distribución tiene la forma

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (7)$$

definida sobre el conjunto

$$\left\{ z: 1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma} \right) > 0 \right\}$$

El parámetro ξ está relacionado con el comportamiento de la cola de la

distribución parental, y así se encuentra que

si $\xi > 0$, la cola de la distribución parental tiene un comportamiento del tipo Fréchet, con $\alpha = 1/\xi$;

si $\xi < 0$, la cola de la distribución parental tiene un comportamiento del tipo Weibull, con $\alpha = -1/\xi$;

si $\xi \rightarrow 0$, la cola de la distribución parental tiene un comportamiento del tipo Gumbel, con parámetros de localización y escala arbitrarios.

El ajuste de este modelo a un conjunto de máximos anuales de lluvia usando la metodología Bayesiana, conduce a calcular la distribución a posterior de los parámetros del modelo GEV usando el teorema de Bayes (Coles y Tawn, 1996):

$$\pi(\theta | y) = \frac{\pi(\theta) f(y; \theta)}{\int \pi(\theta) f(y; \theta) d\theta} \quad (8)$$

considerando la función de verosimilitud y especificando una densidad a priori, $\pi(\theta)$, para los parámetros que son tratados en este contexto como variables aleatorias. La escogencia de esta densidad a priori depende de la información inicial que tengan los expertos acerca de θ .

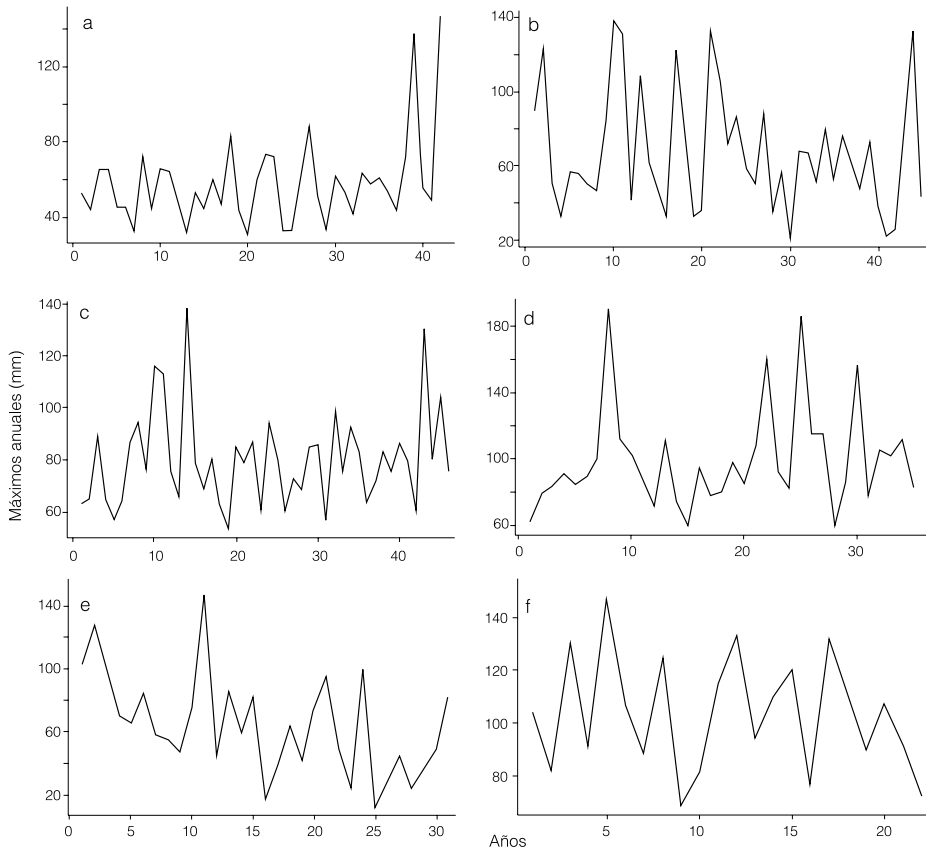


Figura 1. Máximos anuales de La Mariposa, Dtto. Capital (a); San Francisco de Macanao, Edo. Nueva Esparta (b); Villa El Rosario, Edo. Zulia (c); Machiques, Edo. Zulia (d); Carora, Edo. Lara (e); y San Carlos de Río Negro, Edo. Amazonas (f).

TABLA I
DESCRIPCIÓN DE LAS SEIS ESTACIONES
METEOROLÓGICAS

Código	Localización geográfica	Años disponibles
0563	La Mariposa - Caracas (Dtto. Capital)	1949-1996
0795	San Francisco de Macanao (Nueva Esparta)	1949-1997
1071	Villa del Rosario (Zulia)	1943-1995
1092	Machiques (Zulia)	1957-1996
1187	Carora (Lara)	1967-1997
9401	San Carlos de Río Negro (Amazonas)	1973-1994

El principal obstáculo para evaluar la Ec. 8 es la necesidad de calcular numéricamente las integrales involucradas; sin embargo, este inconveniente se resuelve con el uso de los métodos Markov Chains Monte Carlo (MCMC) (Roberts, 1996). La idea de tales métodos es simular una cadena de Markov para θ , digamos $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(m)}$, cuya distribución estacionaria tienda aproximadamente a la Ec. 8, y utilizar, por ejemplo, la media de los valores simulados para estimar la media a posterior. Hay varios algoritmos específicos para implementar los métodos MCMC, pero los más importantes son el muestreador de Gibbs y el algoritmo de Metropolis-Hasting (Roberts, 1996). En la práctica se suele

usar una combinación de ambos y estos métodos han ido incrementando su uso en espacios paramétricos con una alta dimensión.

Otro aspecto muy importante en la teoría de valores extremos es hacer inferencia predictiva: predecir una observación z dados los datos observados. En el contexto de los

métodos Bayesianos, si z denota una observación a futuro con función de densidad $f(z|\theta)$, y $\pi(\theta|y)$ denota la distribución a posterior de θ dados los datos observados Y , entonces

$$f(z|y) = \int_{\Theta} f(z|\theta) \pi(\theta|y) d\theta \quad (9)$$

es la densidad predictiva de z dado los datos, y se emplea para realizar inferencia predictiva en este contexto.

Ajuste del Modelo GEV

Máximos anuales

Los datos correspondientes a los máximos anuales de lluvia pertenecientes a seis estaciones meteorológicas se indican en la Tabla I, donde los registros de lluvia vienen expresados en mm.

La Figura 1(a-f) muestran estos máximos anuales por cada localidad, y en general parecen tener un comportamiento estacional; sin embargo, para las estaciones de La Mariposa (0563), Machiques (1092) y aun para Villa El Rosario (1071) existen algunos pocos máximos que se alejan marcadamente del conjunto total. Es probable que esta característica ocurra porque estas estaciones están localizadas en zonas sujetas a un importante efecto orográfico que puede influir en la ocurrencia de máximos de lluvia muy extremos. En cambio, el comportamiento de los máximos parece más uniforme en cuanto a magnitud para la estación de San Francisco en Nueva Esparta (0795), donde no se aprecia la presencia de máximos anuales separados marcadamente del conjunto total; además, esta estación, al igual que la estación de Carora (1187), están ubicadas en una región que se caracteriza por tener un alto déficit hídrico como consecuencia de las altas evaporaciones que superan las precipitaciones. En estas zonas no nacen ríos y la vegetación es xerófila.

Por el contrario, para la estación San Carlos de Río Negro (9401) los máximos anuales parecen más bien estacionales, a consecuencia de las lluvias

constantes que caen durante todo el año en esta zona como consecuencia de una vegetación de selva nublada y de la alta actividad convectiva presente en esta ubicación geográfica.

Ajuste usando la metodología Bayesiana

El ajuste del modelo GEV, dado por la Ec. 7, a los máximos anuales de cada una de las seis estaciones meteorológicas, se llevó a cabo usando la metodología Bayesiana. En este caso, si Z_1, Z_2, \dots, Z_n representan los máximos anuales para una localidad específica, entonces la función de verosimilitud para el modelo GEV en la Ec. 7 está dada por la expresión

$$g(z_1, \dots, z_n | \xi, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma^n} \prod_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi - 1} \times \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) = \frac{1}{\sigma^n} \exp \left(\left(-\frac{1}{\xi} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right) \right) \times \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (10)$$

Bajo la óptica Bayesiana, si $p(\mu)$, $p(\sigma)$ y $p(\xi)$ representan las probabilidades *a priori* para cada uno de los parámetros del modelo, y si se supone independencia entre esta información *a priori*, entonces la distribución conjunta a posterior de los parámetros queda establecida como

$$p(\mu, \sigma, \xi | z_1, \dots, z_n) \propto g(z_1, \dots, z_n | \mu, \sigma, \xi) p(\mu, \sigma, \xi) = g(z_1, \dots, z_n | \mu, \sigma, \xi) p(\mu) p(\sigma) p(\xi) \quad (11)$$

donde g es la función de verosimilitud como en la Ec. 10.

Luego, las distribuciones posteriores condicionales para cada uno de los parámetros del modelo GEV calculadas a partir de la Ec. 11, vienen dadas por las ecuaciones

$$p(\mu | z_1, \dots, z_n, \sigma, \xi) \propto \exp \left(\left(-\frac{1}{\xi} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right) \right) \times \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (12)$$

$$p(\sigma | z_1, \dots, z_n, \mu, \xi) \propto \sigma^{\frac{n}{\xi} - 1} \exp \left(\left(-\frac{1}{\xi} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \log \left(\xi(z_i - \mu) + \sigma \right) \right) \times \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (13)$$

$$p(\xi | z_1, \dots, z_n, \mu, \sigma) \propto \exp \left(\left(-\frac{1}{\xi} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right) \right) \times \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (14)$$

Para simular las muestras de cada uno de los parámetros a partir de estas distribuciones condicionales a posterior, se usó el algoritmo de Metropolis-Hasting. En cada iteración MCMC este algoritmo simula un valor de cada uno de los parámetros μ , σ y ξ , respectivamente. Este proceso se repitió hasta obtener un total de 20000 muestras de valores simulados para cada uno de los parámetros del modelo de la Ec. 7.

La Figura 2(a-f) muestran las densidades a posterior para las cadenas simuladas de cada uno de los parámetros en cada localidad. En estas densidades a posterior se observa una estabilización casi simétrica alrededor de la media a posterior debido a la convergencia obtenida en las respectivas trazas simuladas.

En la Tabla II se presenta un resumen de los estadísticos obtenidos para las cadenas simuladas de cada parámetro, por localidad geográfica. El valor observado de la media a posterior para el parámetro de forma ξ indica que para las localidades de Villa El Rosario (c) y Machiques (d), ubicadas en los niveles inferiores de la Serranía de Perijá, y para La Mariposa (a), localizada en la cordillera centro-norte, los máximos anuales tienden a seguir mejor el comportamiento de una distribución Fréchet. Para la estación de San Francisco (b), en las tierras altas de Nueva Esparta, región insular de Venezuela, se encontró que los máximos anuales siguen el comportamiento de un modelo Gumbel. Por el contrario, para la estación Carora ubicada en la depresión Carora-Barquisimeto y para la estación San Carlos de Río Negro (f), localizada al sur del país, los máximos anuales se modelan mejor con una distribución Weibull.

Para realizar la validación de los modelos ajustados y la respectiva inferencia predictiva, muy apropiada en el análisis de los valores extremos de lluvia, se usó la predictiva del modelo ajustado GEV en el contexto de la metodología Bayesiana. Para cada localidad se simuló treinta veces los respectivos máximos anuales haciendo uso de la predictiva del correspondiente modelo GEV ajustado. La

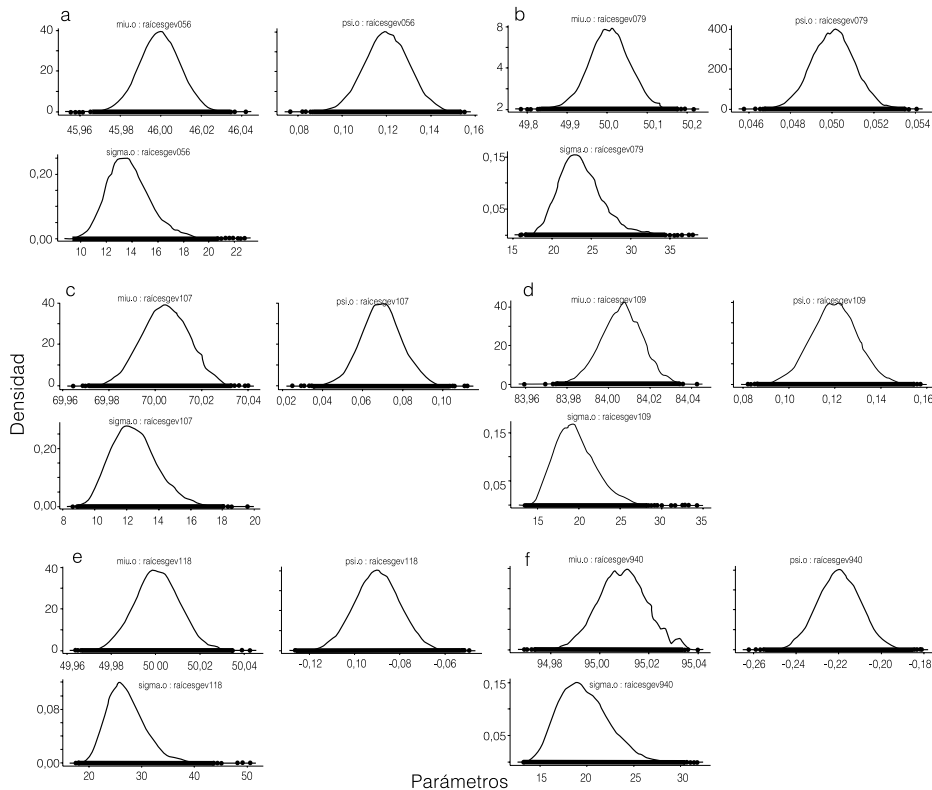


Figura 2. Densidad a posterior para La Mariposa (a), San Francisco (b), Villa El Rosario (c), Machiques (d), Carora (e), y San Carlos de Río Negro (f).

TABLA II
RESUMEN DE LOS ESTADÍSTICOS PARA LAS
CADENAS SIMULADAS DE LAS SEIS ESTACIONES

Parámetro	μ	σ	ξ	Parámetro	μ	σ	ξ
a Media	45,9994	13,7843	0,1203	b Media	50,0048	23,6145	0,0500
SD	0,0101	1,6983	0,0099	SD	0,0504	2,7	0,0010
ECM	0,00007	0,0579	0,00006	ECM	0,0003	0,0584	0,000006
0,025	45,9794	10,9307	0,1011	0,025	49,9060	19,0243	0,0480
0,5	45,9994	13,6235	0,1202	0,5	50,0046	23,3556	0,05
0,975	46,0190	17,6196	0,1401	0,975	50,1044	29,6939	0,0519
c Media	70,001	12,4802	0,0695	d Media	84,0068	19,5659	0,12
SD	0,0099	1,4510	0,0099	SD	0,0098	2,4722	0,0099
ECM	0,0001	0,0298	0,00006	ECM	0,0001	0,0547	0,00007
0,025	69,9844	10,0138	0,0499	0,025	83,9869	15,5560	0,1002
0,5	70,0041	12,3668	0,0695	0,5	84,0069	19,2922	0,1201
0,975	70,0234	15,6816	0,0892	0,975	84,0262	25,2201	0,1396
e Media	50,0	27,0476	-0,0899	f Media	95,0090	19,6754	-0,2197
SD	0,01	3,6441	0,0099	SD	0,009	2,6838	0,01
ECM	0,0007	0,0833	0,0006	ECM	0,0001	0,0949	0,00007
0,025	49,9807	21,1662	-0,1096	0,025	94,9898	15,2801	-0,2394
0,5	50,0002	26,6182	-0,09	0,5	95,0091	19,4004	-0,2197
0,975	50,0201	35,4376	-0,0704	0,975	95,0289	25,5696	-0,2001

Estaciones: La Mariposa, Dtto. Capital (a); San Francisco de Macanao, Edo. Nueva Esparta (b); Villa El Rosario, Edo. Zulia (c); Machiques, Edo. Zulia (d); Carora, Edo. Lara (e); y San Carlos de Río Negro, Edo. Amazonas (f).
Parámetros: de localización (μ), de escala (σ), y de forma (ξ), el cual determina el comportamiento de la cola de la distribución que siguen los datos.

Figura 3(a-f) muestran los percentiles $q_{0,025}$, $q_{0,5}$ y $q_{0,975}$ para los máximos anuales simulados para cada localidad, y se añadieron los máximos anuales reales. En general, se observa que la mayor parte de los máximos anuales reales caen dentro de las bandas de confianza y alrededor de la línea que representa la mediana para cada localidad, observando que el modelo Fréchet, que es de cola pesada a la derecha, parece el más adecuado para simular el comportamiento de los máximos anuales de La Mariposa (a), Villa El Rosario (c) y Machiques (d), donde es clara la ocurrencia de pocos valores muy extremos para estas zonas, en las que factores tales como la altitud modifican las condiciones climáticas. Por otra parte, el modelo Gumbel, que también es un modelo de cola pesada aunque menos pronunciada que el modelo Fréchet, parece el más apropiado para simular los máximos anua-

les de San Francisco en Nueva Esparta (b) donde ocurren pocos valores extremos que están fuera pero muy cercano del límite superior de la banda de confianza; y finalmente, el modelo Weibull, que es una distribución con cola derecha truncada, resulta el más adecuado para las localidades de Carora (e) y San Carlos de Río Negro (f), donde

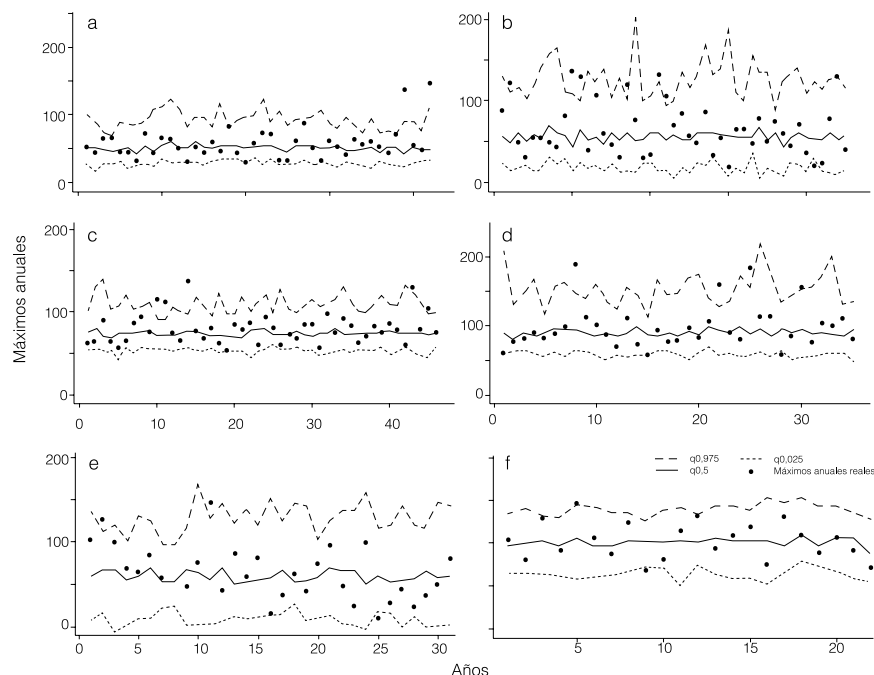


Figura 3. Percentiles para los máximos anuales acumulados en La Mariposa (a), San Francisco (b), Villa El Rosario (c), Machiques (d), Carora (e), y San Carlos de Río Negro (f).

los máximos anuales tienen comportamientos más estacionales y uniformes, lo que indica que no hay grandes valores extremos y, en consecuencia, la distribución de los mismos debe ser truncada a la derecha.

Utilizando la media a posterior obtenida para cada parámetro y sus respectivos percentiles, que se indican en el resumen por cada localidad (Tabla II), se calcularon los periodos de retorno con sus bandas de confianza. La Figura 4 (a-f) muestra en escala logarítmica estos periodos de retorno vs los niveles de retorno.

Para La Mariposa, ubicada en la región de la cordillera centro-norte, se espera que máximos anuales entre 40 y los 80mm ocurran una vez al año aproximadamente; mientras que valores más extremos cercanos a 140mm tienen un periodo de retorno de ~50 años. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que las bandas de confianza son amplias alrededor de aquellos niveles de retorno que se consideran de riesgo para la zona, y estas bandas de confianza pueden variar considerablemente su ancho, producto de la dinámica de las condiciones climáticas.

Para San Francisco de Macanao, en la región insular de Venezuela, máximos anuales >100mm pueden ocurrir una vez en un periodo de 10-50 años en promedio debido al ancho de la banda de confianza para estos niveles extremos de lluvia. Para Machiques y Villa El Rosario, localizadas en el pie de monte de la Serranía de Perijá, al occidente de Venezuela, se espera que para periodos de retorno entre 1 y 10 años ocurran al menos una vez máximos anuales entre 100 y 150mm en el caso de Machiques, y entre 75 y 100mm para Villa El Rosario.

Para la localidad de Carora, ubicada en la depresión Barquisimeto-Carora al occidente del país, niveles de retorno muy extremos, que pueden oscilar entre 80 y 130mm, pueden ocurrir en promedio una vez cada 10 años aproximadamente. Por el contrario, San Carlos de Río Negro ubicada en la zona amazónica al sur de Vene-

zuela, se destaca por un alto nivel pluviométrico durante todo el año y se espera que máximos anuales de ~100mm ocurran una vez anualmente, mientras que para un periodo de retorno de 5 años es fácil determinar que los niveles de retorno pueden pasar de 120mm.

Conclusiones

Teniendo en cuenta la limitante del número de estaciones meteorológicas analizadas, es posible establecer algunas conclusiones orientadas hacia una clasificación en el comportamiento de los eventos extremos de lluvia en Venezuela, de acuerdo a la distribución límite que estos siguen.

Para las localidades de Machiques y Villa El Rosario ubicadas en la falda de la Serranía de Perijá, y para La Mariposa localizada en la cordillera centro-norte, los máximos anuales tienden a seguir mejor el comportamiento de una distribución Fréchet. En cambio para San Francisco, localizada en las tierras altas de Nueva Esparta en la región insular de Venezuela, se encontró que los máximos anuales siguen un modelo Gumbel. Por el contrario, para Carora ubicada en la depresión Carora-Barquisimeto y para la estación San Carlos de Río Negro, al sur del país, los máximos anuales se modelan con una distribución Weibull.

Analizando estos resultados con las pocas estaciones disponibles en este estudio, se puede adelantar alguna caracterización sobre el comportamiento de los eventos extremos de lluvia en los diferentes mesoclimas de Venezuela. Los modelos Fréchet y Gumbel parecen ser los modelos más adecuados para los máximos anuales en la mayor parte del país. Al no disponer de más estaciones resulta imposible detallar geográficamente donde esto ocurre; sin embargo, se piensa que para aquellas localidades ubicadas en zonas montañosas o cercanas a ellas, donde el clima tiende a ser templado intertropical, el modelo Fréchet parece seguir mejor el comportamiento de los respectivos máximos anuales, dado que factores climáticos tales como la altitud u

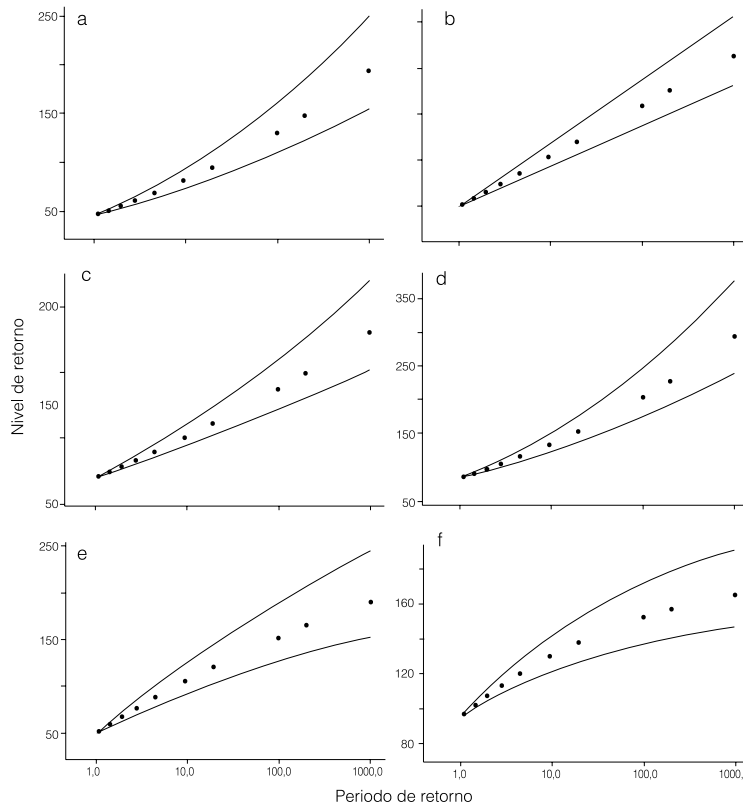


Figura 4. Periodos de retorno vs niveles de retorno para La Mariposa (a), San Francisco (b), Villa El Rosario (c), Machiques (d), Carora (e), y San Carlos de Río Negro (f).

otros que dependen de las características de la localidad, inciden en la ocurrencia de algunos pocos máximos anuales con valores muy extremos que son muy bien modelados por esta distribución, porque es una distribución de cola muy pesada a la derecha. Para zonas más bajas, quizás bajo la influencia del llamado clima de sabana según la clasificación de Koeppen, los máximos anuales parecen modelarse mejor con una distribución Gumbel, hecho atribuido a que los factores geográficos y climáticos de estas zonas marcan un periodo de lluvia cuyos máximos anuales no poseen valores marcadamente pronunciados, y en consecuencia la distribución de los mismos tiene cola pesada a la derecha pero no tan pronunciada como en el modelo Fréchet.

Para aquellas zonas del país donde las condiciones climáticas son más extremas, excesivamente áridas o extremadamente húmedas, el modelo Weibull parece modelar mejor el comportamiento de los eventos extremos de lluvia. Las zonas áridas en Venezuela incluyen la depresión Barquisimeto-Carora y parte de la franja costera que va desde la península de la Guajira hasta la península de Paria, así como la región insular; estas zonas se

caracterizan por un clima tropical estepario semiárido; mientras que las zonas extremadamente húmedas, donde el clima predominante es el clima de selva tropical, están ubicadas al sur de Venezuela, donde a consecuencia de la latitud, la intensidad de la insolación durante todo el año provoca lluvias constantes. En ambos casos, los extremos de lluvias son bastante estables y no se presentan máximos anuales muy extremos, lo que hace que sus densidades estimadas tengan un comportamiento aproximadamente simétrico con colas cortas, que es una propiedad del modelo Weibull.

Esta caracterización del comportamiento de la función de distribución de los extremos de lluvias para los diferentes mesoclimas de Venezuela coincide con los resultados indicados en la Primera Comunicación Nacional sobre Cambios Climáticos (MARN, 2005) en la ocurrencia de

lluvias extremas en Venezuela, donde señalan que los valores extremos para zonas de lluvias muy altas o muy bajas tienden a ser más parecidos entre sí, y esto se corresponde con el modelo Weibull para las densidades estimadas de los valores extremos de zonas muy áridas o extremadamente húmedas, como se concluye en el presente estudio. De igual manera, para las zonas con clima de sabana el documento citado señala que hay una marcada estacionalidad en los valores extremos de lluvia, lo cual coincide con el comportamiento de un modelo Gumbel, modelo que parece caracterizar mejor a los eventos extremos de lluvias para estas zonas, como se concluye en este trabajo.

Se recomienda, en el marco de las investigaciones sobre riesgo y vulnerabilidad, la elaboración de un mapa de eventos extremos de lluvia que involucre la clasificación de cada región según el modelo que mejor coincide con el comportamiento de estos eventos extremos para cada mesoclima presente en Venezuela. En este sentido, sería de gran utilidad el planteamiento de un modelo GEV dinámico bajo la metodología Bayesiana, donde los parámetros del modelo GEV varíen con el tiempo (Huerta and Sansó, 2005) permitiendo describir

posibles cambios en las tendencias y/o estacionalidad como una consecuencia preocupante del cambio climático global.

REFERENCIAS

- Bardossy A, Plate EJ (1992) Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resour. Res.* 28: 1247-1259.
- Coles SG, Tawn JA (1996) A Bayesian analysis of extreme rainfall data. *Appl. Stat.* 45: 463-478.
- Coles SG (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer. Londres, RU. pp. 45-53.
- Fisher RA, Tippett LH (1928) On the estimation of the frequency distributions of the largest or smallest member of the a sample. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 24: 180-190.
- Galambos J (1978) *The Asymptotic Theory of Extreme Order Statistics*. 1ª ed. Wiley. Nueva York, EEUU.
- Gnedenko BV (1943) Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire. *Ann. Math.* 44: 423-453.
- Gumbel EJ (1958) *Statistics of Extremes*. Columbia University Press. Nueva York, EEUU.
- Huerta G, Sansó B (2005) Time-varying models for extreme values. *Environmental and Ecological Statistics* 14: 285-289.
- Jenkinson AF (1955) The frequency distribution of the annual maximum (a minimum) values of meteorological events. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 81: 158-172.
- MARN (2005) *Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela*. Cap. 4. Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanografía del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Caracas, Venezuela. pp. 62-63.
- Roberts GO (1996) Markov chain concepts related to sampling algorithms. En *Markov Chain Monte Carlo in Practice*. Chapman-Hall. Boca Raton, FL, EEUU. pp. 45-54.
- Sansó B, Guenni L (1999a) A stochastic model for tropical rainfall at a single location. *J. Hydrol.* 214: 64-73.
- Sansó B, Guenni L (1999b) Venezuelan rainfall data analysis using a Bayesian space-time model. *Appl. Stat. J. Roy. Stat. Soc.* 48: 345-362.
- Sansó B, Guenni L (2000) A non-stationary multi-site model for rainfall. *J. Am. Stat. Assoc.* 95: 1089-1100.
- Von Mises R (1936) La distribution de la plus grande de n valeurs. Reimpreso en *Selected Papers Vol. II*. American Mathematical Society, Providence, RI, EEUU. 1954, pp. 271-294.

EXTREME RAINFALL CHARACTERISTICS AT SOME LOCATIONS IN VENEZUELA

Aracelis Hernández, Lelys Guenni and Bruno Sansó

SUMMARY

A potential climate change might also bring changes in the extreme characteristics of most climatic variables, particularly on rainfall. Modeling extreme rainfall behavior is important due to the impact of natural hazards on highly vulnerable zones. In this regard, and within the framework of the classical extreme theory, the Generalized Extreme Value (GEV) model is proposed for the study of the behavior of extreme rainfall events in Venezuela. A Bayesian approach was used to estimate model parameters and to make predictive inference of the GEV model. Markov Chain Monte Carlo (MCMC) methods were used to get samples from the posterior distributions of the GEV model pa-

rameters. Numerical results are presented for six locations in Venezuela representing different mesoclimate types: La Mariposa (Miranda State); San Francisco de Macanao (Nueva Esparta State); Villa El Rosario (Zulia State); Machiques (Zulia State); Carora (Lara State); and San Carlos de Río Negro (Amazonas State). Simulations from the predictive distribution suggest that the Fréchet and Gumbel models are more appropriate to represent the annual maxima in most of the study locations; however, in locations with extreme conditions within arid or highly humid mesoclimates, the Weibull model is more appropriate to represent annual rainfall maxima.

CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO EXTREMA EM ALGUMAS LOCALIDADES DE VENEZUELA

Aracelis Hernández, Lelys Guenni e Bruno Sansó

RESUMO

Uma potencial mudança climática poderia também trazer mudanças nas características extremas da maioria das variáveis climáticas, particularmente na chuva. Modelar o comportamento da chuva extrema é importante devido ao impacto que esta tem sobre os desastres naturais em zonas altamente vulneráveis. Neste sentido e no marco da teoria clássica de valores extremos, é proposto o modelo de Valores Extremos Generalizados (GEV) para estudar o comportamento dos eventos extremos de chuva na Venezuela. O método Bayesiano foi usado para estimar os parâmetros do modelo e fazer inferência preditiva do modelo GEV. Os métodos Markov Chain Monte Carlo (MCMC) foram usados para obter amostras a partir das distribuições a posterior dos parâmetros do modelo. Os resultados numéricos

são apresentados para seis localidades na Venezuela que representam diferentes tipos de mesoclimas: La Mariposa (Estado Miranda), San Francisco de Macanao (Estado Nueva Esparta), Villa El Rosario (Estado Zulia), Machiques (Estado Zulia), Carora (Estado Lara), e San Carlos de Río Negro (Estado Amazonas). As simulações da distribuição preditiva sugerem que os modelos Gumbel e Fréchet são os mais apropriados para representar os máximos anuais da maior parte das localizações estudadas; no entanto, nas localizações com condições extremas dentro de mesoclimas áridos ou muito úmidos, o modelo Weibull é o mais apropriado para representar os máximos anuais de chuva.