

## ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD SÍSMICA MÁXIMA MEDIANTE LA TEORÍA DE VALORES EXTREMOS

### Analysis of the Maximum Seismic Intensity Through the Theory of Extreme Values

Jonathan Alfonso Pérez

Universidad de Santander, Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agropecuarias.

Email: [yhperez2@gmail.com](mailto:yhperez2@gmail.com)

(Recibido mayo 12 de 2022 y aceptado junio 12 de 2022)

#### Resumen

El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento sísmico de la región pacífica de Colombia. Para el desarrollo del estudio se incluyó magnitudes sísmicas locales de los departamentos de Chocó, Valle del Cauca, Cauca y Nariño entre los años 1993 y 2018. En este sentido, y mediante el uso de la teoría de valores extremos, se analizaron las magnitudes máximas en los eventos sísmicos ocurridos para obtener, así, modelos que describen el comportamiento de las observaciones por medio del método de bloques máximos y excedencias del umbral, que permiten asociar las magnitudes máximas de cada uno de los departamentos a un tipo de distribución como lo son: Gumbel, Weibull o Frechet, a partir de Distribución de Valores Generalizada o Beta, Exponencial o Pareto con uso de la Distribución de Pareto Generalizada. Los resultados obtenidos muestran niveles de retorno 5.08, 6.03, 6.88 y 7.24 para los periodos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años, respectivamente, para el departamento de Chocó mediante el método de bloque máximo (Gumbel). De igual forma, a través del método de excedencias de umbral (Exponencial), se estima que, en 100 años, pueden ocurrir terremotos en Chocó de magnitud igual o mayor a 7.2 en la escala de Richter.

**Palabras claves:** *teoría valores extremos, distribución valores extremos generaliza, distribución de pareto generalizada, magnitud, nivel de retorno.*

#### Abstract

The objective of this study was to analyze the seismic behavior of the Pacific Region of Colombia. For the development of the study, local seismic magnitudes of the departments of Chocó, Valle del Cauca, Cauca, and Nariño were included between the years 1993 and 2018. In this sense, and through the extreme value theory, the maximum magnitudes in the seismic events that occurred were analyzed to obtain models that describe the behavior of the observations by using the method of maximum blocks and threshold exceedances, which allows the magnitudes to be associated of each of the departments to a type of distribution such as: Gumbel, Weibull or Frechet, from the Widespread Distribution of Values or Beta, Exponential or Pareto with use of the Generalized Pareto Distribution. The results obtained show return levels of 5.08, 6.03, 6.88 and 7.24 for the return periods of 2, 10, 50 and 100 years, respectively, for the department of Chocó using the maximum block method (Gumbel). Likewise, using the method of threshold exceedances (Exponential), it is estimated that, in 100 years, earthquakes of magnitude equal to or greater than 7.2 on the Richter scale may occur in Chocó.

**Keywords:** *extreme values theory, widespread extreme values distribution, widespread pareto distribution, magnitude, return level.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La amenaza o peligro es un evento físico potencialmente perjudicial, un fenómeno natural y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental [1]. En general, se considera como amenaza la probabilidad de ocurrencia de todo evento que afecte a seres humanos. Asimismo, la amenaza sísmica es un fenómeno físico asociado a un sismo, tal como el movimiento fuerte del terreno o falla de este, que tiene el potencial de producir una pérdida [2].

La actividad sísmica del Pacífico colombiano es ciertamente alta. Algunos eventos han superado los 8,1 grados en la escala de Richter como el ocurrido el 12 de diciembre de 1979 con epicentro en el pacífico, que afectó las costas de Nariño y Cauca, con un registro de 450 fallecimientos, más de 1000 heridos y grandes pérdidas materiales. En 1983 un sismo considerado de moderada magnitud 5.5 en la escala de Richter dejó alrededor 300 muertos y más de 10 mil damnificados en la ciudad de Popayán. La historia se repite cada tanto y no hay certeza de predecirlos.

A la fecha, muchos de los modelos que evalúan la amenaza en la ocurrencia de eventos sísmicos emplean métodos probabilísticos paramétricos basados en leyes estadísticas, obtenidos a partir de la información contenida en un catálogo de sismos [3]. Este es el caso del Proceso de Poisson homogéneo, caracterizado, entre otras cosas, por su falta de memoria, lo que implica que la ocurrencia de sismos en el pasado no afecta la ocurrencia futura [4]. Así mismo, el método línea fuente planteado por Cornell, apoyado en la adopción de un modelo de zonas sismogenéticas y el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia, a saber, la formulación clásica del modelo Gutenberg-Richter (GR) [5].

Al considerar que los métodos probabilísticos paramétricos se basan en la información de los catálogos sísmicos. “no son completos para todos los terremotos contenidos en él, ya que no contiene todos los terremotos pequeños

e intermedios ocurridos en épocas antiguas. Para evitar este problema, se ha aplicado a la evaluación de la peligrosidad la teoría de valores extremos desarrollada por Gumbel en 1954” [6].

Por tal razón se plantea analizar el comportamiento sísmico de la región pacífica de Colombia entre los años 1993-2018, mediante la teoría de valores extremos, debido a que se centra en los eventos sísmicos de gran magnitud, siendo estos los que pueden hacer daño. De igual forma, identificar las zonas de mayor amenaza sísmica en la región pacífica, basado en los niveles de retorno estimados a partir de los métodos de bloque máximo y umbral de la teoría de valores extremos.

## 2. METODOLOGÍA

Los datos se obtuvieron del catálogo de sismicidad publicado en la Red Sismológica Nacional de Colombia, compuesto por los movimientos telúricos desde el 1 de junio 1993 al 28 de febrero del 2018, el cual cuenta con 175.327 sismos de diferentes magnitudes. Entre ellos, la región Pacífica cuenta con 19.761 lo que la ubica como la segunda región con mayor sismicidad, distribuidos de la siguiente manera: Chocó 7680, Valle del Cauca 6749, Nariño 3432 y Cauca 1900.

En el estudio se propone utilizar alguna de las familias que engloban Distribución Generalizada de Valores Extremos (DEVG), como Gumbel, Weibull o Frechet, así como las distribuciones Exponencial, Pareto o Beta relacionadas con la Distribución Generalizada de Pareto (GPD), a partir de la estimación del parámetro forma y luego modelar los eventos sísmicos en cada uno de los departamentos de la región pacífica mediante la distribución de probabilidad para el valor máximo de los eventos en bloques de un año y observaciones mayores a un umbral.

En el primer caso, se manejó bloques de un año y los datos que se utilizaran son las magnitudes locales máximas en cada uno de los departamentos: 26 por cada uno para un total de 104 registros en la región Pacífica. Ya en el segundo caso, se utilizó el umbral óptimo para cada uno

de los departamentos a partir del total de eventos en la región la pacífica.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Inicialmente, se ajustaron los 26 datos a la DEVG y se estiman los valores que maximizan la función de máxima verosimilitud del vector de parámetros  $(\mu, \sigma, \xi)$  de la DEVG para cada uno de los departamentos de la región pacífica:

**Tabla 1.** Valores que Maximizan la Función de Máxima Verosimilitud DEVG

Departamento	$\mu$	$\sigma$	$\xi$
<b>Chocó</b>	4.865	0.483	0.106
<b>Valle del Cauca</b>	4.484	0.548	-0.056
<b>Nariño</b>	4.463	0.485	-0.035
<b>Cauca</b>	3.925	0.726	-0.042

Con lo anterior, se evidencia que mediante la estimación de máxima verosimilitud el valor de localización ( $\mu$ ) es mayor en el departamento de Chocó, indicando sismicidad alta en comparación con Cauca, Nariño y Valle del Cauca respectivamente. De igual manera, la distribución de las observaciones para Cauca es más amplia con respecto a los demás departamentos, ya que el valor del parámetro escala ( $\sigma$ ) estimado es el mayor.

Finalmente, el valor del parámetro de forma ( $\xi$ ) hace referencia al comportamiento de las magnitudes sísmicas; se evidencio que el estimado para Chocó fue  $\xi=0.1064365$ , el cual es mayor a 0, lo que indica que los datos pertenecen al modelo de Frechet. Por otro lado, los departamentos restantes se ajustan al modelo de Weibull, ya que su valor del parámetro forma es negativo. Sin embargo, mediante la estimación de máxima verosimilitud e intervalos de confianza basado en verosimilitud perfil el valor para el parámetro forma es cercano a 0, lo cual indica que el modelo de Gumbel resulta adecuado, para ello se realizó una prueba de hipótesis.

En la Tabla 2 se muestra la estimación de los niveles de retorno para periodos de retorno de 20,10,50 y 100 años

y los intervalos de confianza con un nivel de significancia del 0.05.

**Tabla 2.** Niveles de Retorno para Modelo Gumbel

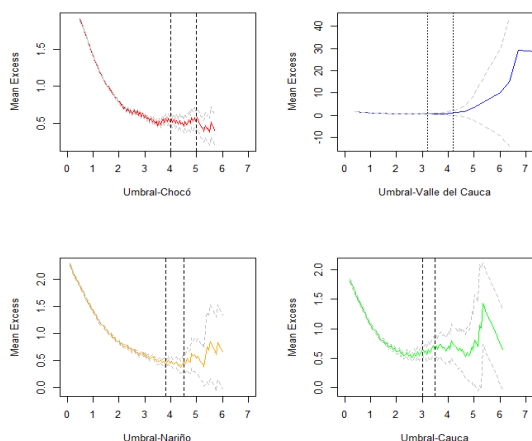
	2 años	10 años	50 años	100 años
<b>Chocó</b>	5.08 (4.86- 5.31)	6.03 (5.57- 6.5)	6.88 (6.16- 7.59)	7.24 (6.41- 8.06)
<b>Valle del Cauca</b>	4.67 (4.42- 4.9)	5.68 (5.2- 6.16)	6.57 (5.84- 7.3)	6.95 (6.11- 7.78)
<b>Nariño</b>	4.63 (4.41- 4.85)	5.54 (5.12- 5.96)	6.34 (5.7- 6.97)	6.67 (5.95- 7.4)
<b>Cauca</b>	4.17 (3.85- 4.49)	5.52 (4.88- 6.16)	6.7 (5.73- 7.67)	7.2 (6.1- 8.3)

El departamento de Chocó, como se ve, tiene mayor amenaza sísmica en los periodos de retorno planteados. Entre ellos, un evento próximo, estimado en 2 años, con una magnitud sísmica igual o mayor a 5.08, con un nivel de confianza del 95%, de magnitud entre 4.86 y 5.31.

Como ejemplo a dicha estimación, el Sistema Geológico Colombiano reportó la ocurrencia de eventos sísmicos, que corresponden al intervalo estimado mediante la distribución de Gumbel, entre ellos el ocurrido en el municipio de Jurado el 24 de mayo del 2019 de magnitud 5; de igual manera, en Riosucio en el año 2020 ocurrió un sismo de magnitud local 5 y, finalmente, este mismo municipio fue el epicentro del sismo ocurrido el 2 de abril del 2021 de magnitud 5.1.

De igual forma, en el departamento del Valle del Cauca ocurrió un evento sísmico en el municipio de Versalles de magnitud local de 6.1 el 23 de marzo del 2019, y el 27 de enero del 2021 en la Victoria se presentó un sismo de 5.1. En el departamento del Cauca ocurrió un sismo en el municipio de Morales el 24 de mayo del 2020 de magnitud 4.2, esta se ubica en el intervalo estimado para dicho departamento, sin embargo, en Nariño no se reflejó un reporte para ese periodo de retorno.

En contraste se utiliza el método de excedencias, este enfoque comparado con el método de bloques anteriormente aplicado se centra en analizar los valores que están por encima de un valor umbral, el cual debe seleccionarse de manera rigurosa, ya que una mala elección implica alta varianza y sesgo en la inferencia de los datos. Por ende, mediante la gráfica de vida residual media se determina el umbral óptimo observando el punto donde la función deja de ser constante.

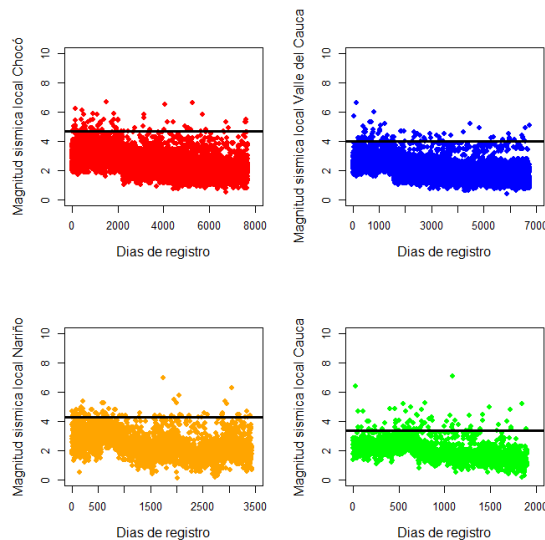


**Figura 1.** Excesos medios para cada uno de los Departamentos de la Región Pacífica

La Figura 1 sugiere un umbral óptimo alrededor de [4,5] para el departamento de Chocó, ya que en este intervalo la función toma un cambio diferente. En el Valle del Cauca, en cambio, la función empieza a perder su tendencia lineal en el intervalo [3,2,4,2]. Para el departamento de Nariño, alrededor de [3,8 ,4,5] el gráfico empieza a tener un cambio notorio, y, finalmente, en Cauca alrededor del intervalo [3 ,3,5] se puede encontrar el umbral. Para confirmar estos valores se pueden utilizar los gráficos de los estimados en función del umbral.

Los intervalos planteados para cada uno de los departamentos en la función de excesos y los valores estimados del parámetro forma. Los umbrales óptimos elegidos entre el intervalo dado son 4.7, 4, 4,3 y 3.4 para los departamentos Chocó, Valle del Cauca, Nariño y Cauca respectivamente.

Ahora, se determinan las excedencias a partir del umbral seleccionado para cada uno de los departamentos.



**Figura 2.** Dispersión de Magnitudes Sísmicas y Umbral Correspondiente

Al tener en cuenta la Figura 2, con este método se deben ajustar 65, 71, 66 y 67 excedencias para los departamentos de Chocó, Valle del Cauca, Nariño y Cauca, respectivamente.

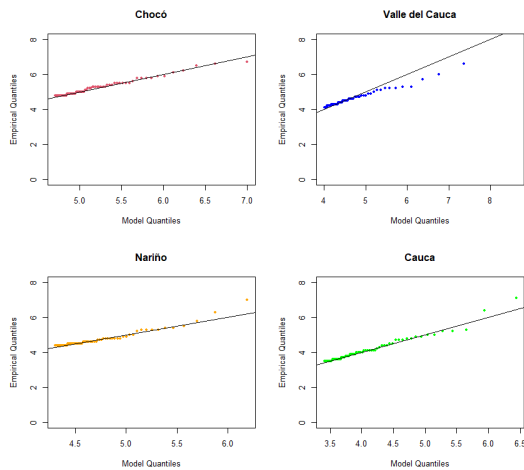
Además, se ajustan las excedencias para cada departamento a partir el umbral seleccionado y se estiman los valores que maximizan la función de máxima verosimilitud del vector de parámetros ( $\sigma$ ,  $\xi$ ) de la GPD para cada uno de los departamentos de la región pacífica.

En la Tabla 3 se observa que, el parámetro forma, estimado para Chocó y Cauca son negativos, esto indica que los datos pertenecen al modelo Beta, asimismo, en los departamentos restantes los valores de ( $\xi$ ) son positivos. Según lo anterior se infiere que, el modelo adecuado para las observaciones es Pareto. Sin embargo, en los cuatro departamentos ( $\mu$ ) es cercano a cero, por tal razón, se propone que un modelo exponencial puede ser adecuado para los datos.

**Tabla 3.** Valores que Maximizan la Función de Máxima Verosimilitud GPD

Departamento	$\sigma$	$\xi$
Chocó	0.663	-0.203
Valle del Cauca	0.488	0.333
Nariño	0.433	0.037
Cauca	0.755	-0.048

Se realizó prueba de hipótesis para modelos anidados, ya que el valor de  $\xi$  es cercano a 0, por tanto, para los departamentos de Chocó, Nariño y Cauca existe evidencia estadística que indica que los datos de cada uno de ellos se ajustan mejor al modelo exponencial y Valle del Cauca a una GPD.

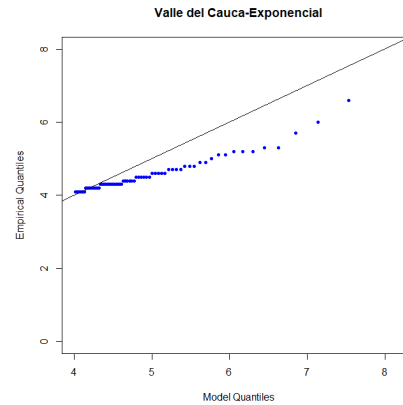


**Figura 3.** Gráficos Cuantil-cuantil para el Modelo Exponencial-GPD

La Figura 3 corrobora gráficamente el buen ajuste de los departamentos al modelo exponencial y GPD y expone que los datos en el Valle del Cauca son los más alejados a la línea. Esto sucede, no obstante, para pocos valores a partir de magnitudes de 5, además, se realizó prueba de hipótesis y significancia, donde era adecuado este modelo.

Dicho lo anterior, en la Figura 4 se confirma, claramente, que las observaciones para Valle de del Cauca no se ajustan correctamente a un modelo Exponencial.

**Figura 4.** Gráficos Cuantil-cuantil para el Modelo Exponencial-Valle del Cauca



En la Tabla 4 se muestra la estimación de los niveles de retorno para periodos de retorno 20,10,50 y 100 años, y los intervalos de confianza con un nivel de significancia del 0.05.

**Tabla 4.** Niveles de Retorno para Modelo Exponencial-GPD

	2 años	10 años	50 años	100 años
<b>Chocó</b>	5,70 (5,46-5,94)	6,58 (6,13-7,04)	7,47 (6,8-8,14)	7,85 (7,08-8,61)
<b>Nariño</b>	5,49 (5,20-5,78)	6,21 (5,75-6,67)	6,94 (6,30-7,57)	7,25 (6,54-7,96)
<b>Cauca</b>	5,74 (5,18-6,30)	6,9 (6,06-7,74)	8,06 (6,95-9,18)	8,56 (7,33-9,8)
<b>Valle del Cauca</b>	5,43 (4,96-5,89)	7,48 (5,85-9,1)	10,98 (6,22-15,74)	13,17 (5,94-20,4)

El departamento del Valle del Cauca, como se refleja, presenta sesgo en la estimación en el nivel de retorno a partir de los 10 años, pues magnitudes locales de 10 en adelante nunca se han registrado y son consideradas como destrucción total, dicho problema es evidenciado en el ajuste de valores mayores a 5 como se mostró en

la Figura 20. Sin embargo, en el nivel de retorno 2 años para el departamento del Valle del Cauca el Sistema Geológico Colombiano reportó valores que están dentro de la predicción referida, por ejemplo, el sismo ocurrido en el municipio de Versalles de magnitud local de 6.1 el 23 de marzo del 2019, y el sismo del 27 de enero del 2021 en la Victoria, con magnitud 5.0, los cuales pertenecen al intervalo 4.96 y 5.89. Finalmente, para los departamentos restantes las magnitudes de los sismos ocurridos en este tiempo no pertenecen al intervalo predicho, con valores por encima de lo registrado.

#### 4. CONCLUSIONES

Gracias al uso de la teoría de valores extremos se modeló el comportamiento sísmico de la región Pacífica colombiana. Para ello se utilizaron los métodos de bloques máximos y el de excedencias del umbral. Mediante máxima verosimilitud se estimó el parámetro forma en la Distribución de Valores Extremos Generalizadas y en la Distribución de Pareto Generalizada, que permitió asociar las magnitudes máximas de cada uno de los departamentos a un tipo de distribución. Dicho lo anterior, se concluye que:

Basado en la DVEG, se mostró que la distribución de Gumbel fue el modelo adecuado para la región Pacífica en conjunto. Aunque el valor del parámetro estimado forma no es igual a 0, son cercanos, y no se encontró evidencia significativa para ir en contra de dicho modelo.

En el enfoque de la GPD la distribución exponencial describió mejor ajuste para todos los departamentos, excepto Valle del Cauca, cuyos datos presentan un mejor ajuste con la distribución de Pareto. Sin embargo, mediante este método se presenta estimaciones de magnitudes sísmicas muy grandes en niveles de retorno mayores a 10 años, lo que indica que el método de bloques es mejor en su estimación y ajuste.

Mediante la distribución de Gumbel se calculan para el departamento de Chocó, altos niveles de retorno para todos los periodos de retorno planteados. Sismos como

los registrados en Bahía Solano y Bajo Baudó de 6.2 y 6.7, respectivamente, tienen un periodo de retorno de 50 años. Sismos como el de Opogado, registrado en 1991, con magnitud de 7.2 tienen un periodo de retorno de 100 años, tiempo para el que se estima un sismo entre 6.4 y 8.1. Por tal razón, se considera que dicho departamento presenta mayor amenaza sísmica en la región pacífica.

Para el departamento de Nariño, se calcula por las dos metodologías planteadas en la teoría de valores extremos que en 2 años puede suceder un terremoto con magnitud igual o mayor a 4.6, como el 12 de junio del 2018 de magnitud 4.5 en la escala de Richter. Por otro lado, sismos como los registrados en 2013 en Tumaco de magnitud 6.3 y en el año 2016 en el municipio de Guaitarilla de magnitud 6.4 tienen un retorno de 50 años. También, sismos como el registrado en su costa en diciembre de 1979, cuya magnitud fue de 8.3, tienen un retorno de 100 años.

En el departamento del Valle del Cauca, y mediante la distribución de Gumbel, se estima con un nivel de confianza del 95% la ocurrencia de un sismo entre [4.42-4.9] para un periodo de 2 años, será mayor a la ocurrida el 23 de julio del 2018, de magnitud local 4.2. Asimismo, en 2 años, mediante la distribución de Pareto se estima una magnitud local igual o mayor 5.7, superando la ocurrida el 27 de enero del 2021, que fue de magnitud 5.1. Un sismo como el registrado en Calima, de magnitud 6.0, se predice en un retorno de 10 años.

Las observaciones en el departamento de Cauca presentan un menor ajuste con la distribución Gumbel, por tanto, la estimación en los niveles de retorno y los intervalos de confianza presentan una mayor incertidumbre a medida que aumenta el periodo de retorno. Sin embargo, sismos de magnitudes 6.4 como los registrados en los municipios de Páez y La Vega, se esperan en un retorno de 10 años, según el modelo de excedencias del umbral o de 50 años, basado en el modelo Gumbel.

Con el uso de esta metodología se evidenció que es posible utilizar muestras pequeñas, las cuales generan ajustes

razonables en las observaciones de la región pacífica. Se recomienda, sin embargo, utilizar las Distribuciones Generalizadas, de igual manera, hacer uso de la función de verosimilitud perfil relativa para la estimación del parámetro forma; finalmente, aplicar la modelación multivariada, teniendo en cuenta otras variables que puedan tener impacto en el fenómeno.

## REFERENCIAS

- [1] J. Amaya (2012) "Gestión Del Riesgo Sísmico En Medellín". Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/6595/1/79597260.15052012.pdf>
- [2] Comité AIS-300. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.
- [3] D. Muñoz (1989) "Conceptos básicos en riesgo sísmico. In Conceptos básicos en riesgo sísmico", Física de la Tierra, Ed. Universidad Complutense de Madrid. Issue 1, pp. 199–216
- [4] C. Cárdenas, Y. Garzón, L. Santa, and L. Castillo, (2010). Modelo de Poisson para la ocurrencia y magnitud espacio temporal de los sismos en Colombia. UD y La Geomática, 4,28–43. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/article/view/3655/5257>
- [5] C. A. Cornell (1968) "Engineering seismic risk analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58(5).
- [6] S. Coles (2001) "An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values". Springer Series in Statistics.