

Artículo original

Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos

Focal parameters of the April 28, 1894 earthquake in the Venezuelan Andes using macrosismic data

Elkin de J. Salcedo-Hurtado^{1,2}, Franck A. Audemard³, Nathalie García-Millán^{2,*}

¹ Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia

² Grupo Georiesgos, Observatorio, Departamento de Geografía, Universidad del Valle

³ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Departamento de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela

Resumen

El terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes venezolanos es uno de los más destructores del siglo XIX en este país. Dejó grandes daños materiales y pérdidas humanas en diversas poblaciones vecinas a la frontera entre Colombia y Venezuela. En la zona epicentral causó grandes grietas, dislocaciones en el terreno y eyecciones de lodo, petróleo y gases. Varios estudios paleosismológicos, históricos y sismológicos se han publicado con información sobre los efectos causados e interpretaciones macrosísmicas de sus parámetros focales. En el presente trabajo se utilizaron datos extraídos de la exploración de un mapa de isosista publicado anteriormente para determinar los principales parámetros focales del terremoto. Los resultados obtenidos ubican el epicentro local (*El*) en las coordenadas geográficas $\phi = 8,55^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$, y el normal (*En*) en $\phi = 8,56^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$. La profundidad normal $hn = 18,24 \pm 1,66$ km, y el foco local $hl = 8,8 \pm 2,23$ km; la magnitud de Richter y la energía sísmica liberada corresponden a $Ml = 7,3$ y $E = 1,58 \cdot 10^{23}$ ergios, respectivamente. Se determinó el momento sísmico escalar $M_0 = 3,16 \cdot 10^{27}$ dinas-cm y la magnitud de momento sísmico $Mw = 7,6$. La magnitud de ondas superficiales fue $Ms = 6,6$ y también se obtuvo la aceleración sísmica, $a = 0,69$ g. Los parámetros obtenidos son compatibles con los publicados por otros autores y se aporta nueva información que permite alimentar los catálogos sismológicos.

Palabras clave: Parámetros focales; Terremoto; Isosistas; Macrosísmica; Venezuela.

Abstract

The earthquake of April 28, 1894, in the Venezuelan Andes was one of the most destructive of the 19th century in this country. It left great material damages and human losses in various neighboring populations on the border between Colombia and Venezuela. In the epicentral zone, it caused large cracks, dislocations in the terrain, and ejections of mud, oil, and gases. Several paleoseismological, historical, and seismological studies have been published with information on its effects and macroseismic interpretations of the focal parameters. Here, we used data extracted from the exploration of an isoseismal map published previously to determine the main focal parameters of the earthquake. The results obtained locate the local epicenter (*El*) at the geographical coordinates $\phi = 8.55^\circ\text{N}$ and $\lambda = -71.72^\circ\text{W}$, and the normal (*En*) at $\phi = 8.56^\circ\text{N}$ and $\lambda = -71.51^\circ\text{W}$. The normal depth was $hn = 18.24 \pm 1.66$ km and the local focus, $hl = 8.8 \pm 2.23$ km. The Richter magnitude and the seismic energy released corresponded to $Ml = 7.3$ and $E = 1.58 \cdot 10^{23}$ ergs, respectively. The scalar seismic moment was $M_0 = 3.16 \cdot 10^{27}$ dynes-cm and the seismic moment magnitude, $Mw = 7.6$. We also obtained the magnitude of surface waves $Ms = 6.6$ and the seismic acceleration $a = 0.69g$. The parameters obtained are compatible with those published by other authors and we provide new information to feed seismological catalogs.

Keywords: Focal parameters; Earthquake; Isoseismal; Macroseismic; Venezuela.

Citación: Salcedo-Hurtado E de J, Audemard FA, García-Millán N. Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):591-606, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1195>

Editor: Carlos Alberto Vargas Jiménez

***Correspondencia:**

Nathalie García-Millán;
nathalie.garcia@correounivalle.edu.co

Recibido: 17 de abril de 2020

Aceptado: 20 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Uno de los principales inconvenientes que se presentan en muchas regiones para realizar estudios exitosos sobre la valoración de la amenaza y de los riesgos sísmicos es la falta de conocimiento de los parámetros focales de los sismos históricos que, en ocasiones, son los que mayor cantidad de energía sísmica liberan, y por la falta de instrumentación sismológica para el monitoreo de las fuentes sismogénicas y la detección confiable de los eventos sísmicos recientes, lo que resulta en catálogos sismológicos incompletos y faltos de homogeneidad (Stucchi, 1994).

Una posible solución a estos problemas se encuentra en la valoración macrosísmica de los terremotos ocurridos en periodos preinstrumentales, lo cual es factible a partir de los estudios de sismicidad histórica, que propenden por el registro y descripción cualitativa de los efectos macrosísmicos de los terremotos del pasado que, interpretados apropiadamente, permiten determinar los principales parámetros focales: el tiempo en que ocurren, la localización epicentral, la intensidad y, cuando es posible, la magnitud macrosísmica equivalente y la profundidad del foco. Existen modelos teóricos o empíricos que proponen el uso de información macrosísmica, en este caso de la intensidad sísmica, para valorar diversos parámetros focales de terremotos históricos (Blake, 1941; Shebalin, 1968; Bakun & Wentworth, 1997; Bakun, 1999); asimismo, están las relaciones geológicas, también empíricas, que de manera complementaria proporcionan información para mejorar el conocimiento de los parámetros focales de los terremotos (Wells & Coppersmith, 1994).

En diferentes regiones del mundo se han usado con éxito métodos macrosísmicos empíricos para evaluar los parámetros focales de terremotos históricos y recientes, lo que ha permitido un mejor conocimiento de sus particularidades físicas (Shebalin, 1971; Shebalin, 1974; Barbano, *et al.*, 1979; Bottari, *et al.*, 1979; Bottari, *et al.*, 1982 a, b; Bottari, *et al.*, 1986; Sibol, *et al.*, 1987; Dorbath, *et al.*, 1990; Shebalin, 1991; Bakun, 2000; Gómez & Salcedo, 2000; Hinzen & Oemisch, 2001; Arango & Tabares, 2002; Bakun, 2005; Bakun, 2006; Marín, *et al.*, 2006; Musson, *et al.*, 2008; Marín, *et al.*, 2009; Beauval, *et al.*, 2010; Szeliga, *et al.*, 2010; Gasperini, *et al.*, 2010; Bakun, *et al.*, 2011; Bindi, *et al.*, 2013). En Venezuela, además de los trabajos peleosismológicos realizados por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS (Audemard, 1997; Audemard, 1998), diversos autores han usado métodos macrosísmicos para determinar los parámetros focales de algunos sismos históricos ocurridos en este país (Palme de Osechas, *et al.*, 2005; Choy, *et al.*, 2010).

En el presente trabajo se aplicó el método Blake-Shebalin (Shebalin, 1968; Shebalin, 1971) para determinar los parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes Venezolanos que dejó numerosos muertos y una extensa zona de devastación en diversas poblaciones de Colombia y Venezuela. Usando el mapa de isosistas de dicho terremoto publicado por Kingland, *et al.* (2008), se determinaron las coordenadas de los epicentros macrosísmicos local y normal y se evaluó la profundidad de los focos local y normal y, a partir de estos parámetros, se obtuvieron los valores de magnitud, energía y aceleración sísmica.

Estado del arte

El terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes venezolanos se presentó a las 10:30 de la noche, hora local (Schubert, 1994). La mayoría de las fuentes bibliográficas que dan cuenta del suceso lo referencian como el “Gran Terremoto de Los Andes Venezolanos” debido a los numerosos muertos y la extensa zona de devastación en las poblaciones colombianas de San José de Cúcuta, Pamplona, Ocaña, Bucaramanga, Tunja y Bogotá, así como los muchos daños y efectos en otras poblaciones venezolanas como Coro, La Vela, Acarigua, Tinaco, Tinaquillo, Puerto Cabello, Valencia, Maracay, Villa de Cura, San Juan de Ortíz, Cúa, Charallave, Santa Lucía, San Casimiro, Ocumare del Tuy,

Altagracia, Valle de la Pascua, Tucupido y Zaraza. También se le atribuye la generación de grandes grietas, dislocaciones en el terreno y eyecciones de lodo, petróleo y gases, según el relato de José Ignacio Lares (Altuve, 2005).

Sobre este terremoto se han elaborado varios estudios paleosismológicos, así como históricos y sismológicos, que sustentan las diversas interpretaciones macrosísmicas para determinar las causas y algunos de los parámetros focales más relevantes. En la **figura 1** se esquematiza el árbol simplificado (“árbol genealógico investigativo”), que expresa el estado del arte y del conocimiento que se tiene sobre este evento sísmico.

Estudios paleosismológicos

Los estudios paleosismológicos sobre el terremoto del 28 de abril de 1894 han sido adelantados principalmente por el grupo de investigaciones en paleosismología de la FUNVISIS (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>). Los investigadores lo asocian con la falla de Boconó, lo que determinó su magnitud entre $M_s = 7,1$ y $7,3$, siendo este el evento más grande en dicha falla, cuyo periodo de retorno es del orden de 300 años (Audemard, 1998) (Figura 2).

La falla de Boconó se caracteriza por ser de carácter transcurrente dextral, se extiende por más de 500 km en el occidente venezolano en dirección SW-NE, entre la población de San Cristóbal, cerca de la frontera con Colombia, y la población de Morón, en la costa caribeña del golfo Triste (Audemard, 2009).

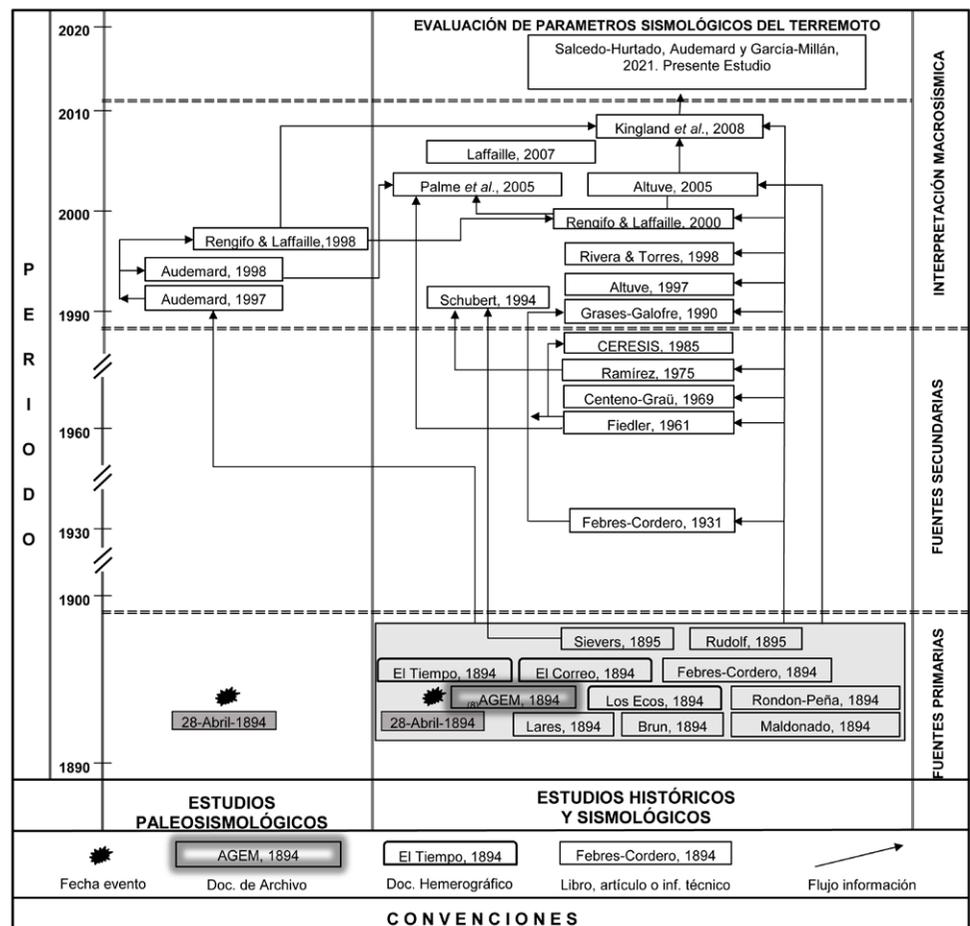


Figura 1. Árbol simplificado de estudios realizados sobre el terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos

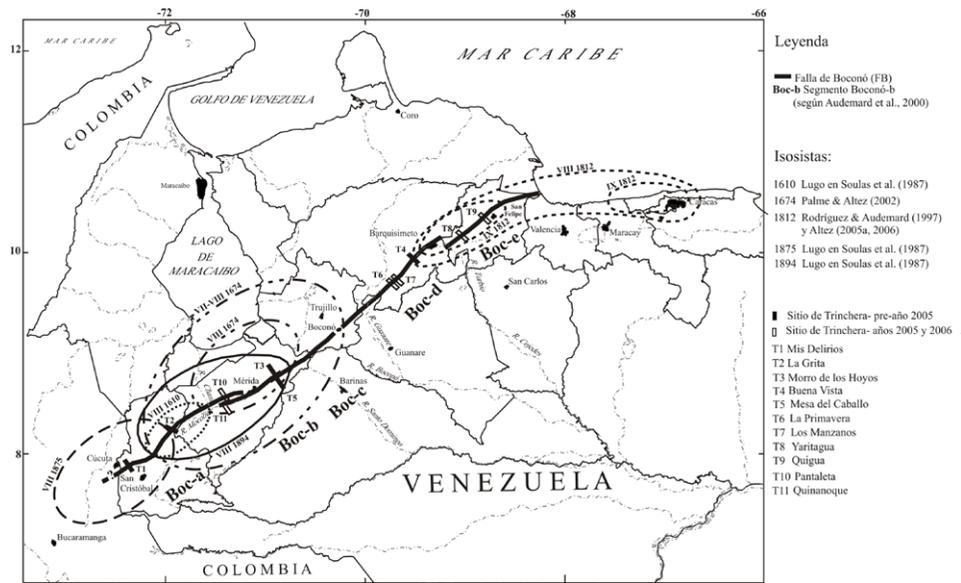


Figura 2. Mapa de localización de la falla de Boconó. Fuente: Audemard, 2016

Estudios históricos y sismológicos

Fuentes primarias

Los documentos catalogados como fuentes primarias (documentos hemerográficos como periódicos, documentos de archivo, artículos, relatos o documentos) se enumeran en la **tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>.

Fuentes secundarias

En la literatura aparecen documentos escritos por importantes investigadores que sintetizan la información descrita en fuentes anteriores, pero sin llegar a dar interpretaciones de los principales parámetros focales del evento (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>).

Interpretaciones macrosísmicas

Varios autores reportan algunos parámetros del terremoto de abril de 1894 que reflejan sus características físicas (**Tabla 1**). Además, en la **tabla 2** se presentan los trabajos publicados sobre las interpretaciones macrosísmicas del terremoto.

Tabla 1. Parámetros dados para el terremoto del 28 de abril de 1894

Coordenadas del epicentro		Profundidad (km)	Magnitud	Intensidad	Número de puntos de intensidad	Referencia
Lat. °N	Long. °W					
71,7	8,7	10 fijada	7,56±0,33 M _l w	---	32	Palme de Osechas, <i>et al.</i> , 2005
71,7	8,5	20	7,1 M _l	---	---	Fiedler (1961)
71,7	8,5	---	7,0 m _C	---	---	Fiedler (1961)
---	---	---	7,1-7,3 M _s	---	---	Audemard (1998)
71,69	8,55	---	7,1-7,4 M _l	¿?	¿?	Rengifo & Laffaille (2000)
71,90	8,5	20	7,1 M _l	X-XI (MCS)	---	Rivera & Torres, 1998
---	---	---	---	X (MM)	100	Kingland, <i>et al.</i> (2008)

Tabla 2. Estudios de interpretación macrosísmica del terremoto del 28 de abril de 1894

Nombre de la fuente	Autor	Fecha	Páginas	Referencia
Documentos Archivos – Archivo General Estado de Maracaibo (AGEM):				
Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. Memoria del III Congreso Geológico Venezolano, 3: Caracas	G. Fiedler	1961	p. 1791-1810	Grases, 1990
Terremotos destructores del Caribe 1502-1990: una contribución al Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, Caracas. Montevideo: Unesco-Relacis	José Grases	1990	132 p	---
Wilhelm Sievers (1895) y el gran terremoto de los Andes. Centro de Ecología I.V.I.C. Apartado 21827 Caracas 1020-A, Venezuela	Carlos Schubert	1994	10 p	---
El gran terremoto de Los Andes venezolano: 28 de abril de 1894. Revista Presente y Pasado, Vol. 2. No. 3. Mérida, Venezuela	Frank Reinaldo Altuve	1997	p. 63-73	---
Estudio de daños originados a las iglesias de la ciudad de Mérida por la acción de los terremotos de 1812 y 1894. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 39 (Nº 1 y 2)	Ángela Rivera De Uzcátegui y Rafael Torres	1998	p. 219-256	---
Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. Acta Científica Venezolana 51	Martín Rengifo y Jaime Laffaille	2000	p. 160-175	---
El gran terremoto de los Andes venezolanos y las juntas de socorro 28 de abril de 1894. Universidad De Los Andes, Mérida-Venezuela. Tesis.	Frank Reinaldo Altuve	(2005).	---	---
Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun & Wentworth. Revista Geográfica Venezolana, Número especial	Christl Palme de Osechas, María T. Morandi S. y José E. Choy	2005	p. 233-253	---
El gran terremoto de los Andes de 1894: memorias de una destrucción. En: El Desafío de la Historia, N° 12, Caracas	Jaime Laffaille	2007	p. 56-63	---
Modelo de atenuación de la intensidad y mapa de isosistas del gran terremoto de los Andes venezolanos de 1894 a partir de datos macrosísmicos. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. 26 a 30 de mayo de 2008 - Santiago – Chile. Conference paper	Jorge Kingland, Rafael Torres y Pether Inglessis	2008	33p	---

Fundamentos teóricos y metodológicos

El comportamiento de la intensidad sísmica con respecto a la distancia hipocentral puede expresarse matemáticamente con la siguiente relación:

$$I_i = I_0 - f(r_i) \quad (1),$$

donde I_i representa la intensidad en un punto cualquiera de la superficie terrestre, I_0 es la intensidad epicentral, y $f(r_i)$ corresponde a una función con respecto a la distancia hipocentral, donde r_i se expresa como:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + h^2} \quad (2),$$

donde x define la distancia epicentral y h la profundidad focal del sismo.

La ecuación (1), que corresponde a la expresión matemática del campo macrosísmico de un terremoto, muestra el decaimiento de la intensidad macrosísmica en dependencia de la profundidad focal del terremoto y representa los efectos dejados por el evento sísmico en la superficie terrestre.

El campo macrosísmico se entiende como la región geográfica en la superficie de la tierra alrededor del epicentro en la que interactúa la fuerza del terremoto con los elementos que ocupan dicho espacio, de tal manera que en ella el sismo puede ser percibido y en algunos casos producir daños y efectos considerables. Una buena representación del campo macrosísmico es el trazado de los mapas de isosistas, que corresponden a isolíneas que encierran áreas de igual nivel de intensidad sísmica en una región durante un terremoto.

Modelo de Blake-Shebalin

En términos generales, el modelo de Blake-Shebalin para la representación del campo macrosísmico se expresa mediante la siguiente ecuación (Shebalin, 1974):

$$I_i = a_i - \gamma \log x_i \quad (3)$$

Al comparar las ecuaciones (1) y (3) para focos superficiales ($h \rightarrow 0$), se puede ver que $a_i = I_0$ y $\gamma \log x_i = f(x_i)$. Análogamente, para focos no superficiales el postulado de Blake-Shebalin en términos de la i -ésima isosista se expresa como (Shebalin, 1974):

$$I_i = I_0 - \gamma \log(r_i/h) \quad (4)$$

La ecuación (4) define el campo macrosísmico cuando la atenuación anelástica de las ondas sísmicas es despreciable en comparación con la atenuación geométrica, de tal manera que γ es el coeficiente de atenuación geométrica, denominado también como coeficiente de Blake-Shebalin.

Profundidad focal (h) y coeficiente de Blake-Shebalin (γ)

Según Shebalin (1968), el foco del terremoto se entiende como la mínima región suficientemente isométrica (igual medida o escala de medición en los tres ejes principales x , y , z), dentro de la cual se encierran todas las deformaciones irreversibles iniciales que ocurren durante el terremoto. Así, el foco de un terremoto puede considerarse puntual solo si se ubica a una distancia suficientemente lejana del punto de observación. En los puntos más cercanos al epicentro macrosísmico, los efectos locales del campo macrosísmico se manifiestan condicionados por la gran extensión vertical del foco (Shebalin, 1974). Por otra parte, la extensión vertical del foco, condicionada por el incremento de la intensidad, se revela por la presencia de un máximo o un mínimo en la relación de las áreas limitadas por las isosistas vecinas al epicentro, manifestado en la curva, donde representa el área de la i -ésima isosista (Shebalin, 1968). Sin embargo, la ausencia de este máximo o mínimo no significa la ausencia del efecto de extensión vertical. El efecto local o manifestación de una mayor intensidad en una región de la superficie terrestre, también puede evidenciarse en el caso de que el epicentro local (E_l) no coincida con el epicentro normal (E_n). En el mapa de isosistas el epicentro normal estaría localizado en el baricentro de todo el sistema de isosistas, mientras que el epicentro local estaría representado por el baricentro de las tres primeras isosistas contadas desde el centro hacia afuera (Shebalin, 1974).

Cabe señalar que en el presente trabajo se diferenció entre el epicentro local y el normal, puesto que el primero está relacionado con la zona de mayores daños o efectos locales y el segundo corresponde al centro de intensidades del campo lejano por fuera de la zona de los posibles efectos locales causados por el terremoto.

La determinación de la profundidad del foco de un terremoto se logra satisfactoriamente usando la ecuación (4) siempre y cuando se conozca el coeficiente de Blake-Shebalin, que representa la atenuación geométrica en la ecuación general del campo macrosísmico, de tal manera que h se determina por la siguiente expresión (Shebalin, 1968, 1974):

$$h_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sqrt{(10^{2(U_0 - I_i)/\gamma} - 1)}} \quad (5)$$

donde N es el número total de isosistas correspondiente al campo macrosísmico normal del terremoto y x_i es la distancia epicentral de la i -ésima isosista, en tanto que h_n representa la profundidad normal del terremoto, la cual se asocia con el lugar donde inicia la ruptura.

La profundidad local h_p , que corresponde a la prolongación y culminación de la ruptura, y a la cual se asocian los efectos locales del terremoto, se determina por la expresión:

$$h_i = \frac{x_j}{\sqrt{(10^{2(I_0 - I_i)/\gamma} - 1)}} \quad (6).$$

Tanto en la ecuación (5) como en la (6) el coeficiente de Blake-Shebalin (γ) puede determinarse como (Shebalin, 1968):

$$\gamma = -\frac{2}{\log(S_i/S_{i+1})} \quad (7),$$

donde S_i es el área de la i -ésima isosista.

Datos macrosísmicos

Los datos macrosísmicos del terremoto de 28 de abril de 1894 usados en el presente trabajo corresponden a los publicados por Kingland, *et al.* (2008), quienes presentan valores de intensidad para cien poblaciones de Venezuela donde el evento causó algún tipo de afectación. La intensidad máxima (X) se asignó a la población Selva de Onía (Mérida), la cual se propuso como la zona epicentral. Otras poblaciones del estado de Mérida como Zea, Chiguará, Santa Cruz de Mora, Tovar, Mesa de Culebra/Culebra, Mesa Bolívar/Tala y Estanques, se evaluaron con una intensidad de IX en la escala de Mercalli modificada.

A su vez, el trabajo de Kingland, *et al.* (2008) se basó en la recolección y revisión de información en documentos históricos, trabajos, tesis, libros y revistas que dan información sobre los efectos causados por este evento sísmico (Maldonado, 1894; Sievers, 1895; Febres-Cordero, 1931; Febres-Cordero, 1985; Febres-Cordero, 1991; Castillo & Hernández, 1993; Salvatierra, 1993; López, 1996; Rengifo & Laffaille, 1998; Rivera De Uzcátegui & Torres, 1998, Grases, *et al.*, 1999; Altuve, 2005).

A partir de la evaluación de la intensidad en cada una de las poblaciones, Kingland, *et al.* (2008) trazaron el respectivo mapa de isosistas, que consta de seis isolíneas, donde la de mayor valor corresponde a la isosista de grado X (10) (Figura 3). Se observa que las isolíneas dibujadas pueden circunscribirse en una figura de forma elíptica en la cual se deduce que el eje mayor estaría orientado en dirección SW-NE, lo que indica la mejor propagación de la energía sísmica y concuerda con las estructuras tectónicas presentes en la zona, en especial la falla de Boconó, en tanto que el eje menor estaría orientado en dirección SE-NW.

Resultados

Parámetros macrosísmicos

Los resultados corresponden a la determinación de la profundidad del foco (normal y local), las coordenadas del epicentro macrosísmico (normal y local), la magnitud, la energía liberada, el momento sísmico y la aceleración macrosísmica.

Análisis del mapa de isosistas

La aplicación del modelo de Blake-Shebalin implica el análisis del mapa de isosistas. En este caso, las isosistas se circunscribieron en una elipse, de tal manera que en cada una de las isolíneas se midió el diámetro mayor (d_{max}), el diámetro menor (d_{min}), el área S_i (en km^2), el radio equivalente a la isosista que limita el área señalada (R_i), y la extensión horizontal, la cual corresponde a la distancia de las isosistas de mayor valor que indican el campo lejano del terremoto, y que es dada por la diferencia entre los dos diámetros:

$$l_x = \frac{(d1_{max} - d1_{min}) + (d2_{max} - d2_{min})}{2} \quad (8).$$

De esta forma, la exploración del mapa de isosistas señalado permitió obtener los valores mostrados en la tabla 3.

El coeficiente de Blake-Shebalin obtenido a partir de la ecuación 7 correspondió a $\gamma = 3,8$.

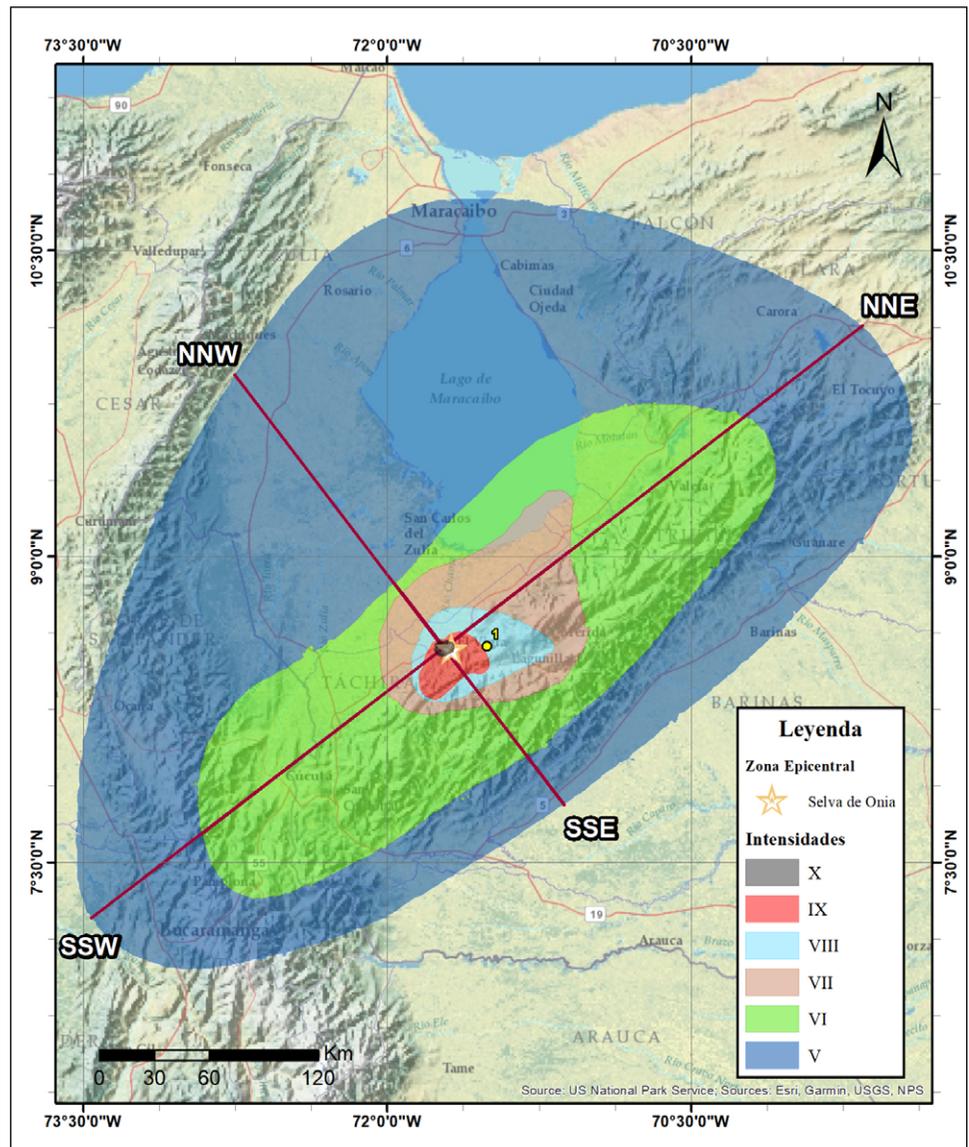


Figura 3. Mapa de isosistas del terremoto del 28 de abril de 1894. Fuente: Kingland, *et al.*, 2008.

Tabla 3. Datos obtenidos a partir de la exploración del mapa de isosistas del terremoto del 28 de abril de 1894

Intensidad de la isosista $I(\text{MM})$	Diámetro (km)		Área (S_i) (km ²)	$S_i/S_{(i+1)}$	Radio (R_i) (km)	$R_i/R_{(i+1)}$	Extensión horizontal (L_x) (km)		
	d_{max}	d_{min}					L_1	L_2	N
10	9,4	7,2	54,9	---	4,98	---	2,2	} 29,4 226,95	
9	26,7	24,5	877,9	0,063	20,71	0,24	2,2		
8	54,1	44,6	2.664,6	0,329	39,72	0,52	9,5		
7	125,8	76,5	8.976,7	0,297	73,56	0,54	49,3		
6	371,4	151,8	39.493,9	0,227	191,49	0,38	219,6		
5	528,3	294,0	123.144,0	0,321	264,79	0,72	234,3		

Profundidad del foco

En la **figura 4** se representa la relación de las áreas limitadas por las isosistas con el valor de intensidad para el terremoto del 28 de abril de 1894. Se observa un mínimo y un máximo en las isosistas de intensidad de 6 y 8, respectivamente, es decir, las isosistas de menor valor están asociadas con el capo normal del terremoto, en tanto que las isosistas de mayor intensidad, a partir del 8 ($I = 10$ y 9), están relacionadas con un efecto local causado por el evento sísmico.

Las profundidades normal (h_n) y local (h_l) del foco se determinaron a partir de las ecuaciones (5) y (6), respectivamente, obtenido los siguientes valores:

$$h_n = (18,24 \pm 1,66) \text{ km.}$$

$$h_l = (8,8 \pm 2,23) \text{ km.}$$

Epicentro macrosísmico

Los epicentros macrosísmicos normal (E_n) y local (E_l) corresponden a los baricentros de los dos conjuntos de isosistas que, separadamente, representan los campos macrosísmicos normal y local. Los valores obtenidos para dichos epicentros fueron los siguientes:

$$E_l: \phi = 8,55^\circ\text{N}; \lambda = -71,72^\circ\text{W}$$

$$E_n: \phi = 8,56^\circ\text{N}; \lambda = -71,51^\circ\text{W}$$

Magnitud, energía liberada y momento sísmico

Con el propósito de aportar nuevos parámetros focales de este terremoto, en el presente estudio se calculó la magnitud del sismo utilizando las relaciones empíricas propuestas por **Gutenberg & Richter** (1942), válidas para cualquier región cuando se conoce la profundidad h :

$$Ml = 2,2 + 3,6 \log \frac{R}{h} \tag{9}$$

$$\log E = 11,1 + 6,4 \log R - 3,2 \log h \tag{10}$$

donde Ml es la magnitud de Richter, E es la energía, R , el radio de perceptibilidad, y h la profundidad hipocentral.

Para el cálculo de estos parámetros se usaron los datos del radio de perceptibilidad R (**Tabla 3**), el cual corresponde al radio equivalente del límite espacial en el cual el sismo se ha percibido y la profundidad local h_l ya determinados. De acuerdo con las ecuaciones (9) y (10), se obtiene una $Ml = 7,3$ y una $E = 1,58 * 10^{23}$ ergios.

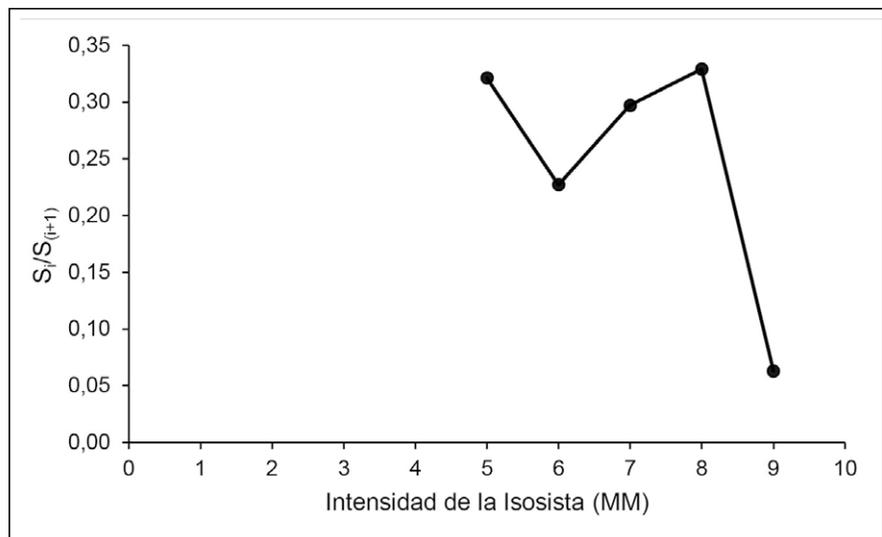


Figura 4. Relación de las áreas de las isosistas con la intensidad de las isolíneas

Ahora, según **Kanamori (1977)**, **Abe (1982)**, **Vassiliou & Kanamori (1982)**, **Kanamori (1983)**, **Sauter (1989)** y **Bormann & Giacomo (2010)**, el momento sísmico escalar puede calcularse en términos de la energía sísmica liberada a partir de la siguiente relación:

$$E = \frac{M_0}{2 * 10^4} \quad (11),$$

donde E es la energía sísmica liberada dada en ergios y M_0 el momento sísmico escalar expresado en dinas-cm.

Asimismo, Kanamori propuso la magnitud de momento M_w para eventos profundos y superficiales a partir de M_0 expresada como (**Kanamori, 1983**):

$$M_w = (\log M_0 - 16,1)/1,5 \quad (12).$$

Con estos datos se obtuvieron los siguientes valores de M_0 y M_w : $M_0 = 3,16 * 10^{27}$ dinas-cm y $M_w = 7,6$.

A partir de las intensidades consideradas en el mapa de isosistas, también es posible realizar un cálculo aproximado de la magnitud M_s considerando la siguiente ecuación (**Bommer, 1994**):

$$M_s = 0,83 \log(R^2) + 0,28I_0 - 0,13 \quad (13),$$

donde M_s es la magnitud de ondas superficiales, R el radio equivalente del límite de perceptibilidad (en kilómetros) e I_0 la intensidad epicentral o la máxima intensidad registrada. Así se obtuvo un valor de $M_s = 6,6$.

Aceleración (macrosísmica)

Gutenberg & Richter (1942, 1956) proponen una relación empírica entre la intensidad macrosísmica y la aceleración sísmica, expresada de la siguiente manera:

$$\log a = \frac{I}{3} - 1/2 \quad (14).$$

La aceleración calculada es, entonces, $a = 676$ cm/seg², que equivale a 0,69 g.

En resumen, los parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 se presentan en la **tabla 4**.

Tabla 4. Parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 obtenidos a partir de datos macrosísmicos

Parámetro sismológico	Símbolo	Unidad	Valor
Epicentro macrosísmico local	E_l	grados	$\phi = 8,55^\circ\text{N}$; $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$
Epicentro macrosísmico normal	E_n	grados	$\phi = 8,56^\circ\text{N}$; $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$
Coefficiente de expansión geométrica	γ	adimensional	3,8
Profundidad normal del foco	h_n	km	18,24±1,66
Profundidad local del foco	h_l	km	8,8±2,23
Intensidad macrosísmica máxima	I_0	escala MM	X (10)
Magnitud de Richter	M	adimensional	7,3
Energía sísmica liberada	E	ergios	1,58*10 ²³
Momento sísmico escalar	M_0	dinas-cm	3,16*10 ²⁷
Magnitud de momento sísmico	M_w	adimensional	7,63
Magnitud de ondas superficiales	M_s	adimensional	6,58
Aceleración sísmica	a	cm/seg ²	676,0 ≈ 0,69g

Discusión

El uso de datos de intensidad obtenidos mediante métodos macrosísmicos sólidos permite hacer una valoración apropiada de los parámetros focales de terremotos ocurridos en cualquier región geográfica. Así, los estudios macrosísmicos deben considerarse como una herramienta complementaria de los estudios con datos instrumentales para la caracterización de terremotos históricos o recientes donde la cobertura y sensibilidad de las redes sismológicas sea baja.

En el presente estudio se utilizó el mapa de isosistas del sismo del 28 de abril de 1894 propuesto por **Kingland, et al.** (2008), quienes trazaron las isolíneas a partir de datos de intensidad macrosísmica en cien puntos diferentes del territorio venezolano afectados.

Los parámetros focales descritos en la **tabla 4** evidencian un avance en el conocimiento de las características físicas del terremoto, pues se rebasa el número de parámetros presentados en otros estudios para este evento (**Tabla 5**).

La diferencia entre los epicentros macrosísmicos normal y local establecida en el presente estudio muestra que el proceso sísmico asociado con la zona de ruptura en la región focal fue complejo y que los efectos de un evento sísmico en la superficie no están asociados con un solo punto de nucleación de la energía, lo que permitió establecer que dicha nucleación se concentró en dos puntos diferentes en el interior de la tierra, mostrando una clara extensión de la región focal. De esta manera, se establecieron dos subfocos denominados normal y local, a los cuales se asociaron diferentes parámetros de epicentro y profundidad. Se nota, entonces, la correlación entre el epicentro macrosísmico local obtenido en este estudio con el único dado por otros autores.

Asimismo, en el estudio se asignó la profundidad local y la normal asociada geoméricamente a las localizaciones epicentrales anteriores. La profundidad normal ($18,24 \pm 1,66$ km) obtenida fue similar al único valor de profundidad (20 km) propuesto en otros estudios,

Tabla 5. Comparación de parámetros sismológicos deducidos para el terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos obtenidos en diferentes estudios mediante datos macrosísmicos

Parámetro sismológico del terremoto del 28 de abril de 1894 obtenidos mediante datos macrosísmicos	Resultados		Otros autores		
	Presente estudio	Palme, <i>et al.</i> , 2005	Fiedler (1961)	Rengifo & Laffaille (2000)	Rivera & Torres (1998)
Epicentro macrosísmico local (E_l)	$\phi = 8,55^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$	$\phi = 8,7^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,7^\circ\text{W}$	$\phi = 8,5^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,7^\circ\text{W}$	$\phi = 8,55^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,69^\circ\text{W}$	$\phi = 8,5^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,90^\circ\text{W}$
Epicentro macrosísmico normal (E_n)	$\phi = 8,56^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$	---	---	---	---
Profundidad normal del foco (h_n) - km	$18,24 \pm 1,66$	10 fijada	20	---	20
Profundidad local del foco (h_l) - km	$8,8 \pm 2,23$	---	---	---	---
Magnitud de Richter (M_l)	7,3	---	7,1	7,1-7,4	7,1
Magnitud momento sísmico (M_w)	7,63	$7,56 \pm 0,33$	---	---	---
Magnitud de ondas superficiales (M_s)	6,58	---	7,0 mC	---	---
Momento sísmico escalar (M_0) - dinas·cm	$3,16 * 10^{27}$	---	---	---	---
Energía sísmica liberada (E) - ergios	$1,58 * 10^{23}$	---	---	---	---
Aceleración sísmica (a) - cm/seg ²	$676,0 \approx 0,69g$	---	---	---	---

en tanto que la profundidad local ($8,8 \pm 2,23$ km), al ser menor que la normal, evidenció un efecto local causado por el evento que se reflejó con mayor precisión en la gravedad de los daños relatados en las diferentes fuentes bibliográficas descritas arriba, y que no había sido calculada en trabajos anteriores.

Se ha estimado el epicentro local y el normal, cuyas extensiones coinciden con la traza de la falla de Boconó, también establecida por otros autores como la fuente de este terremoto (Audemard, 1998).

En cuanto a la magnitud, en el presente trabajo se calcularon las magnitudes M_l , M_w y M_s , y se encontró una fuerte correlación entre ellas que concuerda con los valores propuestos por otros autores. Solo se obtuvo un valor más bajo en M_s comparado con el dado por Audemard (1998), quien propuso una $M_s = 7,1-7,3$ a partir de un método paleosismológico. Ahora, la leve diferencia entre el valor de la magnitud M_w encontrada en este trabajo y la que proponen Palme de Osechas, *et al.* (2005) puede atribuirse a que estos autores usaron el método de Bakun & Wentworth (1997), el cual fija la profundidad de 10 km, obligando a que geoméricamente el centro de intensidades sea restringido a este hipocentro, constriñendo, por lo tanto, el cálculo de la magnitud. Algo similar podría ocurrir con la ecuación que relaciona la magnitud (M_w) en el territorio venezolano con la atenuación de la intensidad macrosísmica, la cual se seleccionó para la actualización del catálogo sismológico de América del Sur en una ventana temporal antes de 1964 (Gómez, *et al.*, 2017). Dicha ecuación se expresa como:

$$M_w = 1,3328 + 0,5993 I \quad (15),$$

donde al reemplazar el valor de $X(10)$ de la intensidad máxima del mapa de isosistas usado en el presente trabajo, se obtendría una magnitud de $M_w = 7,3$, valor ligeramente inferior a los correspondientes que se presentan en la **tabla 5**.

Es importante precisar que los métodos macrosísmicos son una potente herramienta que aporta información suficiente para alimentar los catálogos sismológicos nacionales y locales, los cuales ayudan a mejorar la estimación de la amenaza y el riesgo sísmico en cualquier región geográfica sismológicamente activa.

Conclusiones

En el presente estudio se aplicó un método macrosísmico empírico para deducir los parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes Venezolanos. Los resultados arrojaron que el epicentro macrosísmico local (E_l) se localizó en las coordenadas $\phi = 8,55^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$, mientras que el epicentro macrosísmico normal (E_n) se localizó a $\phi = 8,56^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$. La profundidad del foco normal obtenida fue de $h_n = 18,24 \pm 1,66$ km, y la del foco local de $h_l = 8,8 \pm 2,23$ km, localizaciones que sugieren que la fuente del terremoto fue la falla de Boconó.

Se obtuvo un valor de magnitud $M_l = 7,3$ y de energía sísmica liberada de $E = 1,58 * 10^{23}$ ergios. También se determinó el momento sísmico escalar con un valor de $M_0 = 3,16 * 10^{27}$ dinas-cm y la respectiva magnitud de momento sísmico de $M_w = 7,6$. Mediante una relación empírica se obtuvo una magnitud de ondas superficiales aproximada de $M_s = 6,6$ y el valor de aceleración sísmica fue de $0,69$ g.

Los cálculos realizados y los valores obtenidos permiten concluir que el método de análisis macrosísmico usado en este trabajo representa una herramienta apropiada para la determinación de los parámetros focales de terremotos históricos y aporta datos e información que conducen a mejorar los problemas de completitud y homogeneidad de los catálogos sismológicos para la valoración de la amenaza y el riesgo sísmicos.

Información suplementaria

Tabla 1S. Estudios paleosismológicos sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1195/3055>

Tabla 2S. Fuentes históricas primarias sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1195/3055>

Tabla 3S. Fuentes históricas secundarias sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>

Agradecimientos

Los autores agradecen al Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano de la Universidad del Valle - Colombia (OSSO), y a las directivas de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), por el apoyo y la colaboración para la realización de este trabajo.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la escritura del documento y en la búsqueda de la información. EJSJH participó en el desarrollo teórico y metodológico; FAA en la interpretación macrosísmica y NGM en la exploración del mapa de isosistas y en la interpretación de resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan influir en el proceso de publicación.

Referencias

- Abe, K.** (1982). Magnitude, seismic moment and apparent stress for major deep earthquakes. *J. Phys. Earth.* **30**: 321-330.
- AGEM.** (1894a). Fondo Gobernación. Correspondencia con la Junta Subalterna de Instrucción Popular del Distrito Sucre. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894b). Fondo Gobernación Presidencia del Estado Los Andes. Acta de la Junta Comunal de la Parroquia Libertad. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894c). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Acta de la Junta Comunal de la parroquia Chiguará. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894d). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Correspondencia con el Jefe Civil del Distrito Torondoy. Leg.1-2. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894e). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Informe de José Antonio Dávila. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894f). Fondo Gobernación. Presidencia del Gran Estado Los Andes. Correspondencia con el Presidente de la República. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894g). Fondo Gobernación. Sección Presidencia del Estado Los Andes. Correspondencia con el Jefe Civil del Distrito Tovar. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894h). Fondo Gobernación: Correspondencia de la Jefatura Civil de la Parroquia San Juan con la Jefatura Civil del Distrito Sucre. (Citado en Altuve, 2005).
- Altez, R.** (2010). Si la naturaleza se opone... Terremotos, historia y sociedad en Venezuela. Caracas, Venezuela: Editorial Alfa. 321 p.
- Altuve, F. R.** (1997). El gran terremoto de Los Andes venezolano: 28 de abril de 1894. *Revista Presente y Pasado.* **2** (3): 63-73.
- Altuve, F. R.** (2005). El gran terremoto de los andes venezolanos y las juntas de socorro 28 de abril de 1894. Mérida, Venezuela: Universidad De Los Andes. 40 p.
- Arango, O. H., Tabares, J. H.** (2002). Estudio macrosísmico del terremoto de Armenia- Colombia del 25 de enero de 1999: modelo de reconstrucción geométrica del foco sísmico. Cali, Colombia: Universidad del Valle (Trabajo de grado).
- Audermard, F.** (1997). Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: Trench confirmation. *Journal of Geodynamics.* **24** (1-4): 155-167.
- Audermard, F.** (1998). Contribuciones de la Paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y 1894 en Los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana.* **39** (1- 2): 87-105.
- Audermard, F.** (2009). 5.3.8 Falla de Boconó (VE-06b y VE-06c). En: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas. Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Publicación Geológica Multinacional No. 7 (259-271). Canadá.

- Audemard, F.** (2016). Evaluación paleosísmica del segmento San Felipe de la Falla de Boconó (Venezuela noroccidental): ¿responsable del terremoto del 26 de marzo de 1812? *Boletín de Geología*. **38** (1): 125-149.
- Bakun, W. H. & Wentworth, C. M.** (1997). Estimating earthquake locations and magnitude from seismic intensity data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**: 1502-1521.
- Bakun, W. H.** (1999). Erratum to Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**: 557.
- Bakun, W. H.** (2000). Seismicity of California's north coast, *Bull. seism. Soc. Am.* **90**: 797-812.
- Bakun, W. H.** (2005). Magnitude and location of historical earthquakes in Japan and implications for the 1855 Ansei Edo Earthquake. *J. Geophys. Res.* **110**: B02304. Doi: 10.1029/2004JB003329.
- Bakun, W. H.** (2006). Estimating locations and magnitudes of earthquakes in Southern California from modified Mercalli intensities, *Bull. Seism. Soc. Am.* **96**: 1278-1295.
- Bakun, W. H., Gómez-Capera, A. A., Stucchi M.** (2011). Epistemic uncertainty in the location and magnitude of earthquakes in Italy from macroseismic data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101** (6): 2712-2725.
- Barbano, M. S., Bottari, A., Carvani, P., Cosentino, M., Federico, B., Fonte, G., Lo Giudice, E., Lombardo, G., Patane, G.** (1979). Macroseismic Study of the Gulf of Patti Earthquake in the Geostructural Frame of North – Eastern Sicily. *Boll. Soc. Geol. It.* **98**: 155-174.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J-C.** (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophys. J. Int.* **181**: 1613-1633.
- Bindi, D., Gómez-Capera, A. A., Parolai, S., Abdrakhmatov, K., Stucchi, M., Zschau, J.** (2013). Location and magnitudes of earthquakes in Central Asia from seismic intensity data: model calibration and validation. *Geophys. J. Int.* **192**: 710-724.
- Blake, A.** (1941). On the Estimation of Focal Depth from Macroseismic Data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **31** (3): 225-231.
- Blanco, E. J.** (2017). El gran terremoto de los Andes de 1894. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020. Disponible en: <http://matriavigiense.blogspot.com/2017/04/el-gran-terremoto-de-los-andes-de-1894.html>
- Bommer, J.** (1994). Sismología para ingenieros. Papeles Técnicos UCA. Serie Fundamentos F93001. San Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 7 p.
- Bormann, P. & Giacomo, D.** (2010). The moment magnitude and the energy magnitude: common roots and differences. *Journal of Seismology*. **15** (2): 411-427.
- Bottari, A., Carapezza, E., Carapezza, M., Carvani, P., Cefali, E., Lo Giudice, E., Pandolfo, C.** (1986). The 1908 Messina Strait Earthquake in the Regional Geostructural Framework. *Journal of Geodynamics*. **5**: 275-302.
- Bottari, A., Federico, B., Lo Giudice, E.** (1979). Metodological Considerations Regarding the Determination of Some Macroseismic Field Parameters. Application to earthquakes in the Calabro-Pelotarian Arc. *Boll. Geof. Teor. Appl.* **23** (83): 197-225.
- Bottari, A., Federico, B., Lo Giudice, E.** (1982a). Nuove Evidenze di Correlazione tra l'Attenuazione Macrosísmica ed Campi di Lineamenti Strutturali nell'Italia Meridionale. *Ann. di Geofisica*. **35**: 5-26.
- Bottari, A., Giovani, L., Lo Giudice, E., Longo, V., Spadea, M., Vecchi M.** (1982b). Regional Macroseismic Field of the 1980 Irpinia Earthquake. *Ann. di Geofisica*. **35**: 27-84.
- Brun, J. A.** (1894). Relación circunstanciada de la situación de los edificios, de la línea, puente, material rodante y máquinas del Ferrocarril de Santa Bárbara a El Vigía después del temblor de tierra del día 28 de abril de 1894. Documentos del Ministerio de Obras Públicas. (Citado por Eudes J. Blanco P., 2017).
- Castillo, M. & Hernández, A. del C.** (1993). Santa Cruz del Carmelo de Mora (1840-1993). Venezuela: Universidad de Los Andes. Facultad de Humanidades y Educación- Escuela de Historia (Tesis de pregrado).
- Centeno-Graü, M.** (1969). Estudios Sismológicos. 2ª edic. Caracas, Venezuela-. Min de Obras Públicas y Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales. (Citado en Altuve, 2005).
- Centro Regional de Sismología para América del Sur-CERESIS.** (1985). Catálogo de terremotos para América del Sur. Datos de hipocentro e intensidades. Venezuela, Vol. 8.
- Choy, J.E., Palme de Osechas, C., Guada, C., Morandi, M., Klarica, S.** (2010). Macroseismic Interpretation of the 1812 Earthquake in Venezuela Using Intensity Uncertainties and A Priori Fault-Strike Information. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**: 241-255.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C.** (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Perú. *Bull. Seism. Soc. Am.* **80** (3): 551-576.

- El Correo de los Estados.** (1894). Caracas, Venezuela. 2. (Citado en Altez, 2010).
- El Tiempo.** (1894). Caracas, Venezuela. Única. (Citado en Altez, 2010).
- Febres-Cordero, T.** (1894). Terremoto de los Andes. Óbolo para Los Andes. Folleto No. **3**: 46-50. (Citado en Altuve, 2005).
- Febres-Cordero, T.** (1931). Archivo de Historia y Variedades. Tomo II. Caracas, Venezuela: Editorial Suramerica. (Citado en Altuve, 1997).
- Febres-Cordero, T.** (1985). El Lápiz, Datos Curiosos, Apuntes de Cartera, Misceláneas. Mérida-Venezuela: Instituto Autónomo Biblioteca Nacional, Universidad de Los Andes. Edición facsimilar.
- Febres-Cordero, T.** (1991). Obras Completas. Segunda Edición. 9 v. San Cristóbal, Venezuela: Banco Hipotecario de Occidente. 2243 p.
- Fiedler, G.** (1961). Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. En: Memoria del III Congreso Geológico Venezolano. **3**: 1791-1810. Caracas.
- Gasparini, P., Vannucci, G., Tripone, D., Boschi E.** (2010). The location and sizing of historical earthquakes using attenuation of macroseismic intensity with distance, Bull. Seismol. Soc. Am. **100**: 5A:2035-2066. Doi: 10.1785/0120090330.
- Gómez, A. & Salcedo, E.** (2000). Determinación de la profundidad focal de algunos sismos ocurridos en Colombia, a partir de datos macrosísmicos. Rev. Red Sismológica Regional del Eje Cafetero. **5**: 12-16. ISSN. 0123-9074.
- Gómez-Capera, A. A., Stucchi, M., Arcila, M., Bufaliza, M., Choy, J., Leyton, L., Pirchiner, M., Rendón, H., Rodríguez, L., Sarabia, A. M., Tavera, H., Yepes, H.** (2017). Updated earthquake catalogue for South America: time window pre-1964. En: 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017.
- Grases, J., Altez, R., Lugo, M.** (1999). Catálogo de sismos sentidos o destructores, Venezuela 1530-1998. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales-Facultad de Ingeniería, UCV.
- Grases, J.** (1990). Terremotos destructores del Caribe 1502-1990: una contribución al Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, Caracas. Montevideo: Unesco-Relacis. 32 p.
- Gutenberg, B. & Richter, C.** (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. Bull. Seismol. Soc. Amer. **32**: 163-191.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F.** (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). Bull. Seismol. Soc. Amer. **46** (2): 105-145.
- Hinzen, K. G. & Oemisch, M.** (2001). Location and magnitude from seismic intensity data of recent and historic earthquakes in the Northern Rhine area, central Europe. Bull. seism. Soc. Am. **91**: 40-56.
- Kanamori, H.** (1977). The energy release in great earthquakes. J. Geophys Res. **82**: 2981-2987.
- Kanamori, H.** (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. Tectonophysics. **93**: 185- 199.
- Kingland, J., Torres, R. A., Inglessis, P.** (2008). Modelo de atenuación de la intensidad y mapa de isosistas del gran terremoto de los Andes venezolanos de 1894 a partir de datos macrosísmicos. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. 26 a 30 de mayo de 2008 - Santiago – Chile. Conference paper.
- Laffaille, J.** (2007). El gran terremoto de los Andes de 1894: memorias de una destrucción. El Desafío de la Historia. **12**: 56-63.
- Lares, J. I.** (1894). Volvamos al hogar: después del terremoto del 28 de abril de 1894. Mérida, Venezuela: Imprenta Picón Grillet. (Citado en Altuve, 2005).
- López, Y.** (1996). Evaluación histórica y análisis morfoestructural de los efectos del terremoto del 28-04-1894 en los Andes venezolanos: una aproximación integral a un estudio de riesgo sísmico. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales (Tesis de pregrado).
- Los Ecos del Zulia.** 08-05-1894 Maracaibo, Venezuela. 2. (Citado en Altez, 2010).
- Maldonado, J.** (1894). Terremoto de Tovar (Ruinas). Hojas sueltas. Tovar. Biblioteca Febres Cordero. Mérida. (Citado en Kingland, *et al.*, 2008).
- Marín, J. P., Castillo, H., Salcedo, E.** (2006). Modelo geométrico del foco del terremoto de Popayán (Colombia) a partir de datos macrosísmicos. Boletín de Geología. **28** (2): 93-109.
- Marín, J. P., Valencia, L. Y., Rendón, L. M.** (2009). Análisis macrosísmico del terremoto de Murindó – Antioquia (Colombia) octubre de 1992. Boletín de Geología. **31** (1): 85-93.
- Musson, R., Jiménez, M. J., Gómez-Capera, A. A.** (2008). Earthquake parameter estimation from historical macroseismic data. Seismological Research Letters. **79** (2): 313.

- Palme de Osechas, C., Morandi, M. T., Choy, J. E.** (2005). Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun & Wentworth. *Revista Geográfica Venezolana*. Número especial: 233-253.
- Ramírez, J. E.** (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 250 p.
- Rengifo, M. & Laffaille, J.** (1998). El terremoto del año 1894 en Los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana*. **39** (1- 2): 141-162.
- Rengifo, M. & Laffaille, J.** (2000). Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. *Acta Científica Venezolana*. **51** (3): 160-175.
- Rivera De Uzcátegui, A. & Torres, R. A.** (1998). Estudio de daños originados a las iglesias de la ciudad de Mérida por la acción de los terremotos de 1812 y 1894. *Revista Geográfica Venezolana*. **39** (1-2): 219-256.
- Rondón-Peña, R.** (1894) *Triste Suerte de Zea*. Tovar, Venezuela: Imprenta de V. de Jesús. (Citado en Altuve, 2005).
- Rudolf, E.** (1895). Über submarine Erdbeben und Eruptionen. *Beiträge zur Geophysic*. **II**: 537-666. (Citado por Grases, 1994).
- Salvatierra, M.** (1993). Estudio preliminar sobre la vulnerabilidad sísmica de Mérida. Trabajo de Ascenso. Mérida-Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Sauter, F.** (1989). *Introducción a la sismología. Fundamentos de ingeniería sísmica I*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 270 p.
- Schubert, C.** (1994). Wilhelm Sievers (1895) y el gran terremoto de los Andes. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0051660166c4c67e9b973>
- Shebalin, N. V.** (1968). Método de utilización de datos ingeniero-geológicos en la zonación sísmica. En: Zonación sísmica de la U.R.S.S (95-111). Moscú: Nauka. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1971). Cálculo del tamaño y posición del foco del terremoto de Tashkent mediante datos macrosísmicos e instrumentales. En: El terremoto de Tashkent de 1966 (68-80). Tashkent, Uzbekistán. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1974). Focos de terremotos fuertes en el territorio de la URSS. Moscú: Nauka. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1991). Cálculo del tamaño y posición del foco del terremoto de Spitak mediante datos macrosísmicos. *Problemas de la Ingeniería Sísmica*. **32**: 35-44. (En ruso).
- Sibol, M. S., Bollinger, G. A., Birch, J. B.** (1987). Estimations of magnitudes in central and eastern North America using intensity and felt area. *Bull. Seism. Soc. Am.* **77**: 1635-1654.
- Sievers, W.** (1895). Das Erdbeben in Venezuela am 28. April 1894. En: *Mitteilungen der geographische Gesellschanfl* (237-244). Giessen, Alemania. Traducido y presentado por C. Schubert (1994) en el Foro: "A cien Años del Gran Terremoto de los Andes", Mérida. (Citado en Kingland, *et al.*, 2008).
- Stucchi, M.** (1994). Recommendations for the compilation of a European parametric earthquake catalogue, with special reference to historical records. En: *Materials of the CEC Project "Review of historical seismicity in Europe"*. Vol 2. (181-190).
- Szeliga, W., Hough, S., Martin, S., Bilham, R.** (2010). Intensity, magnitude, location and attenuation in India for felt earthquakes since 1762. *Bull. Seism. Soc. Am.* **100** (2): 570-584.
- Vassiliou, M. S. & Kanamori, H.** (1982). The energy release in earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **72**: 371-387.
- Wells, D. L. & Coppersmith K. J.** (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **84** (4): 974-1002.