

Catálogo de terremotos de América del Sur homogéneo en Mw para el periodo pre-1964

A.A. Gómez-Capera¹, M. Stucchi², L. Rodríguez³, M. Arcila⁴, M. Bufaliza⁵, J. Choy⁶, E. Minaya⁷,

L. Leyton⁸, M. Pirchiner⁹, H. Rendón¹⁰, A. Sarabia⁴, H. Tavera¹¹, H. Yepes¹²

¹Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Milano, Italia

²Eucentre, Pavía, Italia

³Centro Regional de Sismología para América del Sur-CERESIS, Lima, Perú.

⁴Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia

⁵Instituto Nacional de Prevención Sísmica, San Juan, Argentina

⁶Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Geofísica, Mérida-Venezuela.

⁷Observatorio de San Calixto, La Paz, Bolivia

⁸Universidad de Chile, Santiago, Chile

⁹Universidade de São Paulo, Brasil

¹⁰FUNVISIS, Caracas, Venezuela

¹¹Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

¹²Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

*aagomezcapera@gmail.com

Resumen

En el marco del proyecto *The South América Risk Assessment (SARA)*, se compiló un catálogo de terremotos para América del Sur, en términos de magnitud momento (M_w), a partir de los datos disponibles en el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), tanto de los estudios recientes de terremotos históricos, como de los análisis realizados durante el proyecto. En particular, se incluyen: i) la última versión del catálogo CERESIS-91 preparado por CERESIS y publicado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC del Perú; ii) la determinación de parámetros por parte de estudios recientes, incluidos los propuestos por el catálogo ISC-GEM y, en su caso, los catálogos nacionales que cumplen con los criterios de transparencia requeridos por el proyecto. Los resultados descritos en el presente artículo se refieren a la ventana de tiempo pre-1964.

La primera parte del trabajo corresponde al desarrollo de un inventario crítico de todos los estudios públicos relacionados con los terremotos de América del Sur. Los diferentes estudios para el mismo terremoto son asociados entre sí a partir de la comparación del tiempo, de las coordenadas del epicentro y del tamaño (magnitud o intensidad macrosísmica máxima) del terremoto. Para cada evento, se selecciona de manera preliminar un conjunto de parámetros considerados confiables.

El principal problema de un catálogo de parámetros de terremotos es la necesidad de expresar los valores del tamaño del sismo de manera homogénea en términos de magnitud momento (M_w). Actualmente, en la región son pocos los estudios, (en particular sobre terremotos históricos) que proporcionan ese valor. En la mayoría de los casos, debido al tiempo de ocurrencia de estos eventos, que corresponde al periodo pre-instrumental; los valores de magnitud se calcularon a partir de datos macrosísmicos. A lo largo del continente sudamericano muchos terremotos tienen disponibles la información del tamaño en términos de magnitud de onda superficial M_s y magnitud de onda volumétrica m_b . Para dichos eventos, en el presente estudio se utilizan relaciones empíricas de conversión entre M_w , M_s y m_b , publicadas en la literatura. También hay terremotos para los que sólo está disponible la información macrosísmica, por lo cual, usando relaciones empíricas, la M_w es calculada a partir de la intensidad macrosísmica máxima (I_{max}). Dichas relaciones son de carácter regional y son calibradas en este estudio utilizando terremotos post-1900.

La segunda parte de trabajo corresponde a la compilación y evaluación de parámetros del terremoto (localización, Mw e incertidumbres) a partir de la distribución de datos de intensidad macrosísmica, para eventos históricos de los valles andinos del norte de América del Sur. En particular, una relación de atenuación de la intensidad macrosísmica se calibró en término de Mw para el territorio colombiano y se aplicó para evaluar parámetros a partir del método de Bakun y Wentworth (1997) y usando datos macrosísmicos dados por la literatura. Para los casos de eventos históricos en Ecuador y Venezuela, son adoptados los resultados de parámetros de estudios recientes donde se aplica dicho método. De esta manera, se evaluó la magnitud Mw para 2564 terremotos de América del Sur. El umbral inferior es definido en Mw=5 para la región andina. Para Brasil no se aplicó un umbral más bajo.

Palabras clave: Catálogos, terremotos, América del Sur.

Abstract

Under the framework of The South America Risk Assessment (SARA) project, an earthquake catalogue was compiled for South America in terms of the moment magnitude (Mw), with data from the *Centro Regional de Sismología para América del Sur* (CERESIS), recent national and international studies, and from the analysis conducted during the project. In particular, it is included the latest versions of the catalogue CERESIS-91 prepared by CERESIS and published by the National Council of Science and Technology CONCYTEC of Peru, the determination of parameters by recent studies, including those proposed by the ISC-GEM catalogue. Also, when they were available, the national catalogues that meet the criteria of transparency required by the project. The results presented in this work correspond to the pre-1964 time window.

The first phase of the study is the development of a critical inventory of all public studies related to earthquakes in South America. Studies for the same event have been associated with each other from the comparison of the time, the epicentre coordinates and the size of the earthquake (magnitude or maximum seismic intensity). For each event, a set of parameters considered reliable were been preliminarily selected. The main problem of the catalogue is the necessity to express the values of magnitude in terms of moment magnitude (Mw). Currently, few studies on historical earthquakes provide this value for the study region. For many events, values in terms of M_s and m_b are available; although for most cases, because of the time of occurrence of these events, the magnitude values were calculated from macroseismic data. For these earthquakes we have used empirical conversion relationships published in the literature for M_s and m_b to M_w .

There are also events for which only a value of maximum intensity (I_{max} or I_0) is available. For these events, regional relationships I_{max} to M_w were been determined, using the most reliable and recent data of M_w and I_{max} values.

In a second phase, for some events having a sufficient number of macroseismic data, the source parameters (including location, Mw and uncertainties) were determined using the method of Bakun and Wentworth (1997), regionally calibrated, based on what already has been obtained for Ecuador, Venezuela the literature, and Colombia in this project.

In this way, the magnitude Mw was evaluated for 2564 earthquakes in South America. The lower threshold is defined in Mw = 5 for the Andean region. For Brazil, a lower threshold was not applied.

Keywords: earthquakes; catalogue; South America.

1. Introducción

El continente sudamericano tiene una larga tradición de investigación sobre terremotos históricos (Giesecke et al., 2004). El Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) publicó el primer catálogo de terremotos a escala continental en 1985. En dicho catálogo, para muchos eventos históricos y aquellos localizados en áreas escasamente monitoreadas, los parámetros de terremotos fueron calculados a partir de la primera base de datos de intensidades macrosísmicas publicada a nivel internacional por CERESIS (1985). La investigación de carácter histórico y macrosísmico continúa su desarrollo a escala nacional por las diferentes instituciones sismológicas de los países de América del Sur, principalmente con referencia a grandes terremotos, ya sean históricos o recientes.

El proyecto SARA (*South America Risk Assessment*) se realizó en el bienio 2013-2015, y fue un programa regional promovido por iniciativa de la Fundación "Global Earthquake Model" (GEM; www.globalquakemodel.org). SARA tuvo como objetivo evaluar la amenaza y el riesgo sísmico, estimar la combinación de factores sociales y económicos que aumentan los daños físicos y disminuyen las capacidades post-evento de las poblaciones para responder y recuperarse de los efectos causados por la ocurrencia de terremotos en América del Sur (<https://sara.openquake.org/>), involucrando a expertos locales de la región.

El presente artículo presenta la metodología aplicada para la compilación del catálogo de parámetros de terremotos de América del Sur para el periodo pre-1964, que corresponde principalmente a la componente histórica del catálogo de terremotos que se desarrolló en el marco del módulo de amenaza sísmica del proyecto SARA (<https://sara.openquake.org/>). La metodología sigue los objetivos trazados por

dicho proyecto:

- que la compilación del nuevo catálogo de terremotos, para América del Sur, sea homogénea en lo posible, en términos de magnitud M_w ;
- que sea aplicada la experiencia adquirida a través de los métodos, implementaciones y productos publicados por GEM, como por ejemplo, el catálogo de terremotos de carácter instrumental ISC-GEM (2015) y el catálogo histórico de carácter global para $M_w \geq 7$ (Global Earthquake History, GEH, 2013).

En este estudio, el material público disponible en la región también se consideró en la compilación; dicho material se agrupó de la siguiente forma:

- estudios de terremotos con información de parámetros del sismo, es decir, fecha y tiempo, magnitud, localización, profundidad focal e incertidumbres;
- estudios de terremotos con información de datos de intensidad macrosísmica;
- catálogos paramétricos nacionales e internacionales que están disponibles, entre otros, en el CERESIS, en la literatura y en las agencias nacionales que estudian y gestionan el ámbito sismológico de los países de América del Sur.

A partir del material público considerado se realizó un inventario crítico y un análisis de dicho material durante todo el proyecto. Las entradas relacionadas al mismo terremoto se agruparon, lo cual permitió detectar y eliminar varias duplicaciones con respecto a los terremotos fronterizos según la fuente principal.

El principal problema que se encuentra en la compilación del catálogo fue la necesidad de expresar los valores de magnitud de cada evento sísmico de manera homogénea, en términos de M_w o una magnitud equivalente a ésta para el caso de terremotos históricos. Esta tarea se realizó:

- i. adoptando los valores de magnitud M_w disponibles para terremotos post-1900 del catálogo de ISC-GEM (2015), de otros catálogos a escala continental y nacional, así como los valores de M_w disponibles en algunos estudios macrosísmicos recientes para eventos históricos;
- ii. transformando a magnitud M_w los valores disponibles de magnitud M_s y m_b en los diversos catálogos y estudios en la literatura, haciendo uso de las relaciones propuestas por Scordilis (2006) y de Assumpção *et al.* (2014) para Brasil, la cual es calibrada para eventos de baja magnitud;
- iii. computando valores equivalentes a M_w a partir de datos macrosísmicos utilizando el método de Bakun y Wentworth (1997) a través de relaciones de atenuación de la intensidad macrosísmica calibradas regionalmente, con base en lo que ya se ha publicado en Ecuador y Venezuela. Para eventos históricos de Colombia se calibró, en M_w , un modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica, el cual fue aplicado utilizando la base de datos de intensidad macrosísmica del Servicio Geológico Colombiano (2013);
- iv. determinando relaciones lineales de magnitud M_w en función de la intensidad macrosísmica máxima para Argentina, Bolivia, Colombia, Perú y Chile. Dichas relaciones son aplicadas a terremotos que no tienen valoración de magnitud, pero tienen disponible un valor de intensidad máxima.

El resultado final consiste en la evaluación de

manera homogénea de parámetros para 2556 eventos en la ventana de tiempo 1513-1963 para el continente sudamericano.

2. Fuente de datos

El material público está disponible en la literatura a través de catálogos sismológicos a escala internacional y nacional. También esta disponible en estudios de terremotos que cubren diferentes periodos y áreas geográficas y son caracterizados por diferentes tipos de magnitudes e incertidumbres. En primer lugar, se consideró el material público disponible a escala continental.

2.1 Catálogos y bases de datos macrosísmica

Enseguida se describen las bases de datos:

- CERESIS (1985) consiste en el catálogo de terremotos y la primera base de datos macrosísmica publicada a nivel internacional para ocho países de América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, Perú y Venezuela). Dicho material fue compilado por el CERESIS en el ámbito del proyecto SISRA (Programa para la Mitigación y los Efectos de los Terremotos en la Región Andina). El catálogo y la base de datos provienen de compilaciones previas, análisis de sismicidad histórica y datos instrumentales. CERESIS (1985) constituye la principal base de datos de intensidades macrosísmicas y compilación de estudios de parámetros de terremotos históricos de América del Sur, indicando las fuentes de información. La base de datos contiene 16.318 puntos de intensidad macrosísmica y 3.183 terremotos en el catálogo (Figura 1a) y cubre la ventana de tiempo de aproximadamente 500 años, entre 1530 y 1985 (Giesecke *et al.*, 2004; Gómez Capera y Leschiutta, 2004). Terremotos del periodo pre-Hispánico no son incluidos. El número de eventos del periodo

pre-1964 corresponde a 2.399 entradas (Tabla 1a).

- CERESIS (1995) corresponde a la actualización del catálogo CERESIS (1985) hasta diciembre del 1991. Esta actualización fue realizada para el Programa Piloto (Dimaté et al., 1999) en el ámbito del proyecto GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program; Giardini, 1999). El Programa Piloto tuvo como objetivo producir un modelo de amenaza sísmica unificado para cinco países andinos (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, y Bolivia) por lo cual integró catálogos nacionales junto con la información del CERESIS (1985) y homogeneizó en términos de magnitud de onda superficial M_s . Los catálogos de Chile, Argentina y Brasil fueron incluidos. En el presente estudio la extracción de eventos del periodo pre-1964 en CERESIS (1995) corresponde a 7.667 entradas (Tabla 1a, Figura 1b)
- Engdahl y Villaseñor (2002), conocido como el "Catálogo de Terremotos del Centenario", se elaboró a escala global para terremotos del siglo XX. La magnitud para cada evento fue asignada dependiendo de la disponibilidad en los catálogos regionales. Para eventos superficiales usa preferiblemente magnitud M_w y M_s . Para eventos con profundidades mayores a 60 km se usaron la escala de magnitud M_w y m_b . Para el presente estudio la extracción de eventos del periodo 1900-1964 corresponde a 252 entradas (Tabla 1a; Figura 2a)
- Storchak *et al.* (2012 y 2013) es el catálogo de terremotos a escala global de carácter instrumental del "International Seismological Center-Global Earthquake Model" (ISC-GEM) para el periodo 1900-2009, homogéneo en M_w y con valores de incertidumbre para la magnitud. El catálogo ISC-GEM se elaboró para satisfacer las necesidades de usuarios que evalúan y modelan la amenaza y el riesgo

sísmico. Para el presente estudio la extracción de eventos corresponde a 216 entradas (Tabla 1a; Figura 2b).

La Tabla 1 resume los catálogos a escala continental que corresponden a las principales fuentes de datos consideradas en la compilación y su contribución en cuanto al número de entradas relevantes para cada fuente. Los catálogos nacionales actualizados para cada país se consideraron y fueron aportados por las instituciones que participaron en el proyecto (Tabla 1b), mientras que la Figura 1-3 muestra la distribución de las entradas de las principales fuentes de datos. La Figura 4a es un ejemplo de la información suministrada por CERESIS (1985) para el sismo histórico del 20 octubre del 1746 en Venezuela: epicentro en la zona de la cuenca del Orinoco, magnitud 7.5 M_s y 46 puntos de intensidad macrosísmica, con intensidad máxima ($I_{max}=8$) en Cumaná, la cual se localiza lejos de la zona epicentral. La Figura 4b muestra un ejemplo de un terremoto con múltiples entradas para la magnitud según la literatura: el evento de 16 de agosto de 1906 en Valparaíso, Chile.

2.2 Estudios

Además de los catálogos, se consultaron 34 estudios de terremotos que en la mayoría son citados en la Tabla 2; sólo una parte de ellos son considerados por los compiladores de los catálogos nacionales. A partir de los estudios consultados y en relación con la base de datos macrosísmica del CERESIS (1985), se observa que estudios con información de nuevos puntos de intensidad macrosísmica para diferentes terremotos históricos son propuestos en los países del norte de América del Sur: Venezuela (Palme et al., 2009; Sismicidad Histórica de Venezuela, 2011); Colombia (Espinosa, 2003; SGC, 2013; Sarabia Gómez et al., 2010; Salcedo Hurtado et al., 2007; Salcedo Hurtado y Castaño, 2011; Sarabia y Cifuentes, 2011) y Ecuador (Egred, 2004).

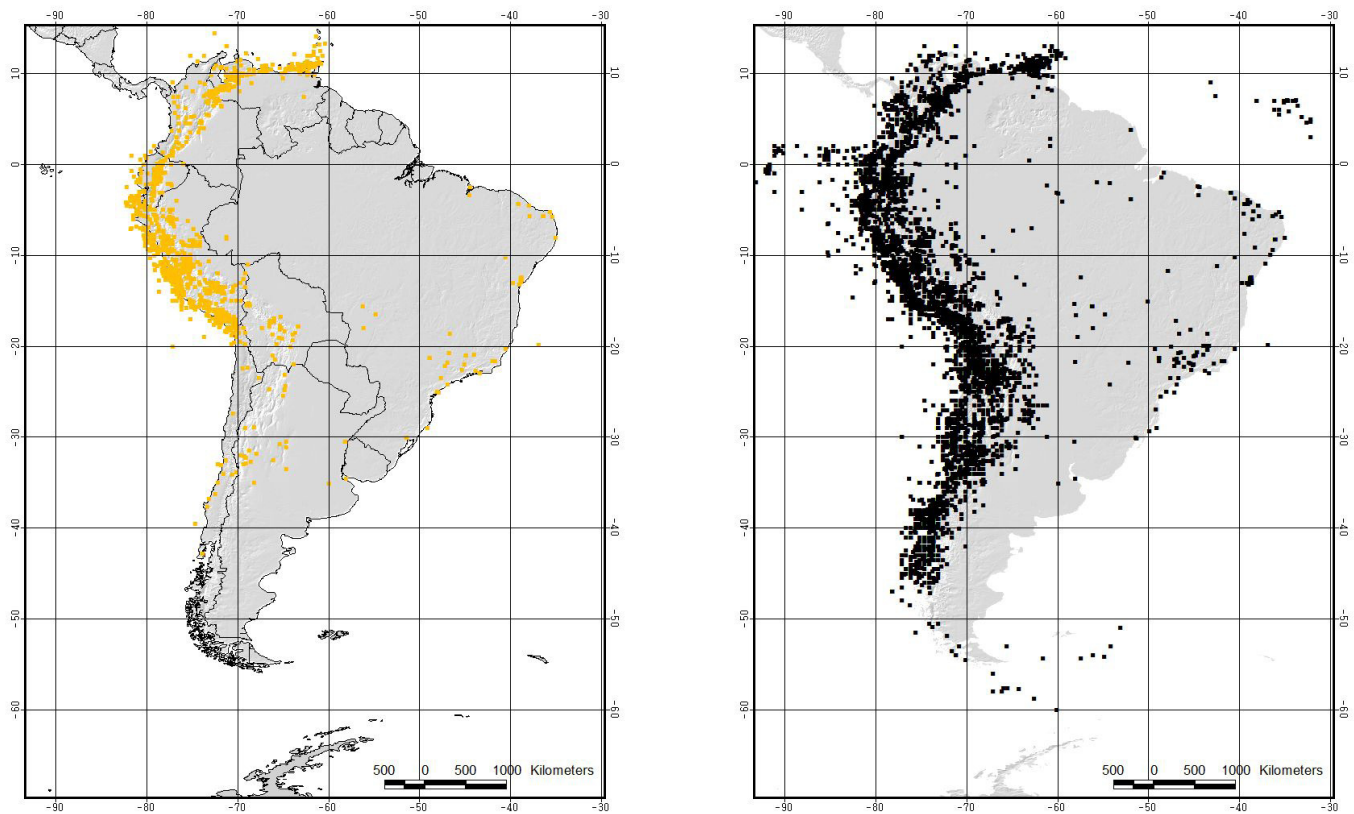


Figura 1. Epicentros en la ventana de tiempo antes de 1964. a) CERES985; b) CERES995

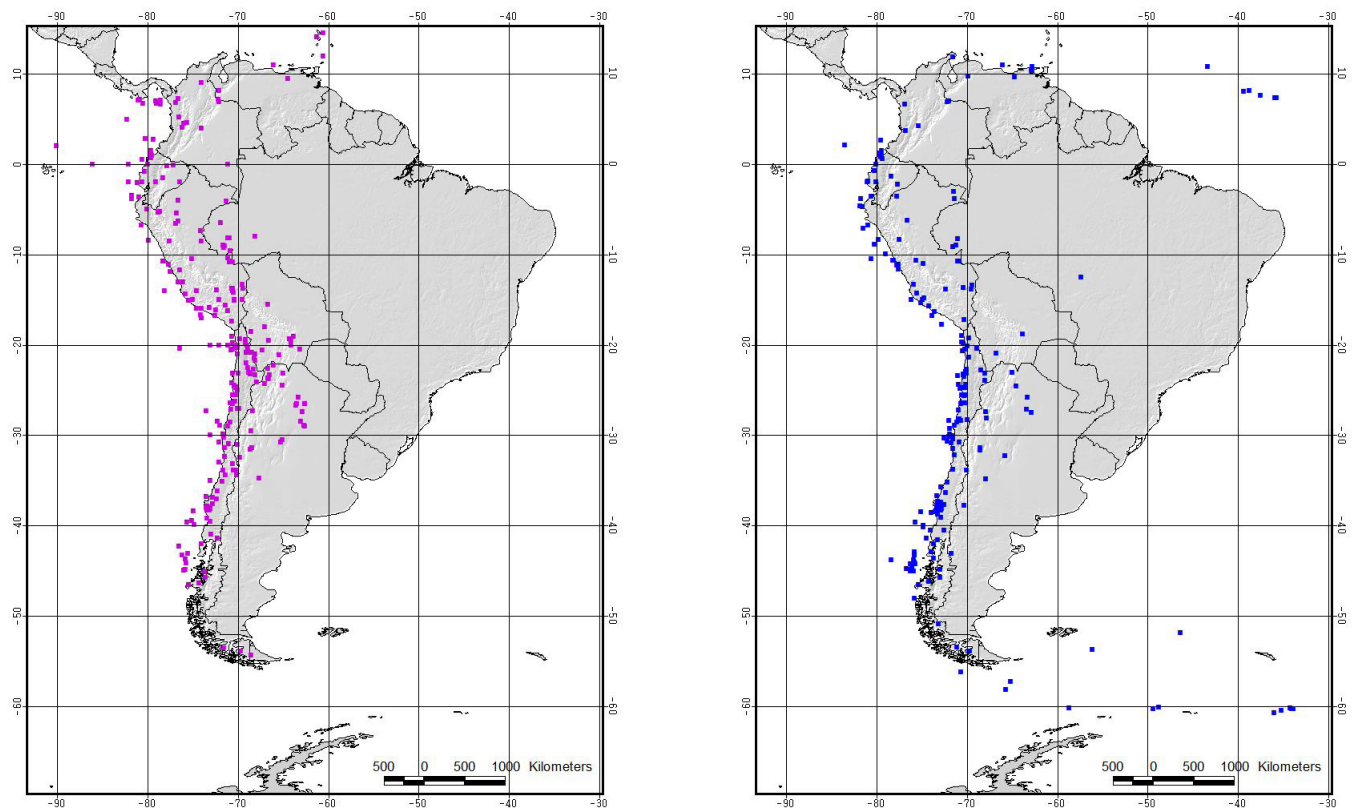


Figura 2. Epicentros en la ventana de tiempo antes de 1964. a) ENGV1002; b) ISCGE015

Tabla 1. Principales fuentes de datos consideradas y número de entradas relevantes. a) Catálogos a escala continental. Número de entradas equivale a número de terremotos. b) Catálogos nacionales

a)

*Código	Referencias abreviadas	Número de entradas
	Fuente de datos a escala continental	
CERES985	CERESIS (1985)	2.399
CERES995	CERESIS (1991)	7.667
ENGV1002	Engdahl y Villaseñor (2002)	252
ISCGE015	Storchak <i>et al.</i> (2012; 2013), ISC-GEM(2015)	216

b)

Código	País	Catálogo paramétrico	Número de entradas
OSC013	Bolivia	Observatorio de San Calixto (2013)	246
BSB012	Brasil	Catálogo Sísmico Brasileiro (2012)	203
SGC014	Colombia	Servicio Geológico Colombiano (2014)	148
ECU014	Ecuador	Catálogo de terremotos de Ecuador (2014)	134
FUN014	Venezuela	FUNVISIS (2014)	513
INPRE015	Argentina	INPRES (2015)	48
LEYAL009	Chile	Leytonet al. (2009)	484
TAVAL001	Perú	Tavera ed. (2001)	3.554

*Las siglas citadas en la columna código son usadas en las Figuras 1, 2 y 3.

a)

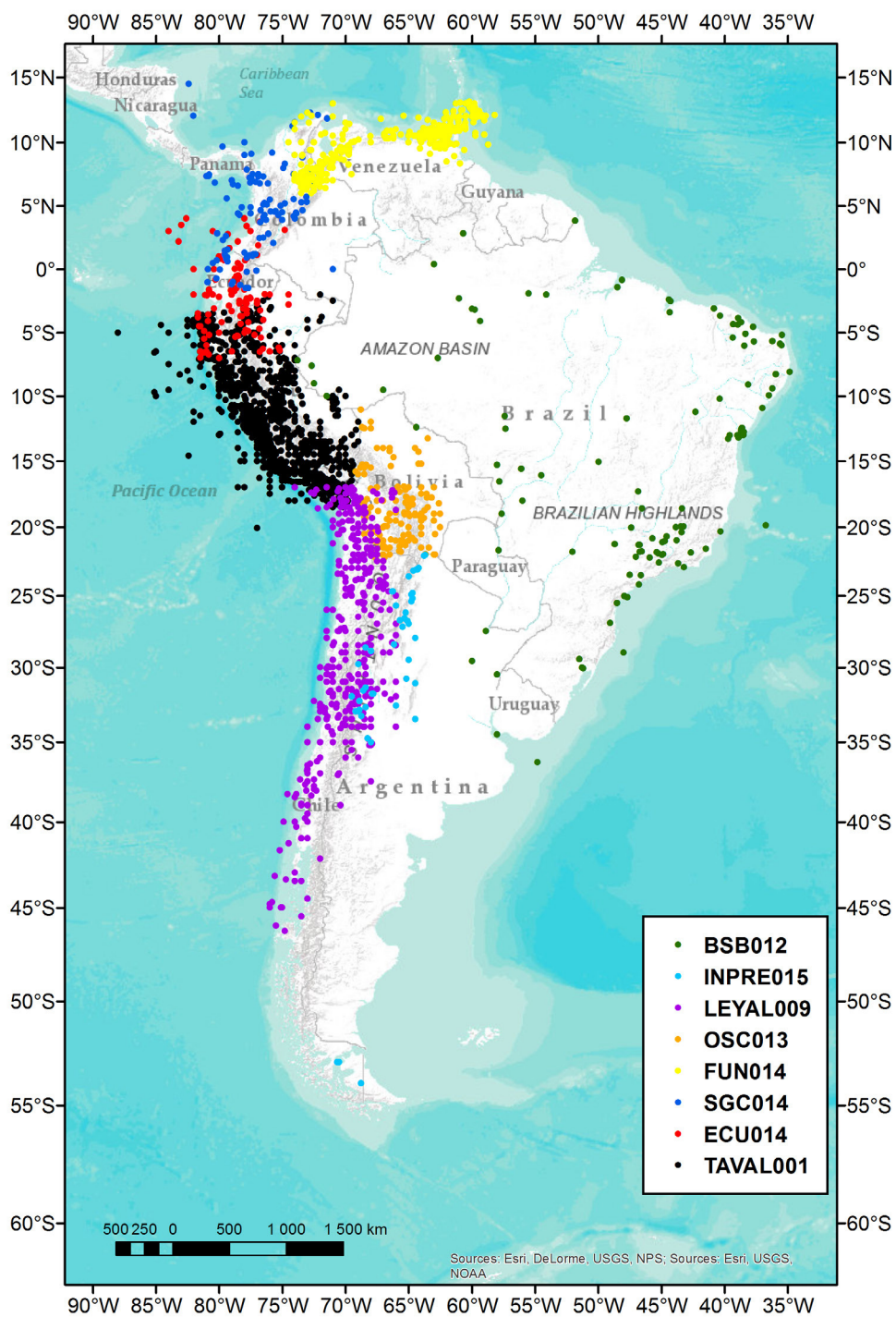
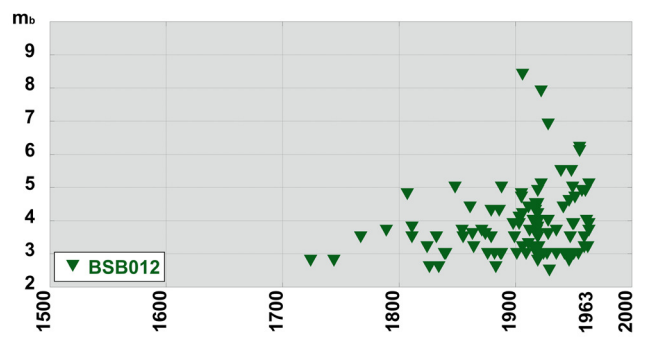
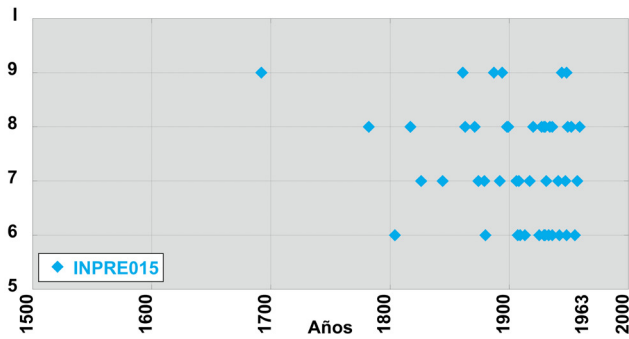
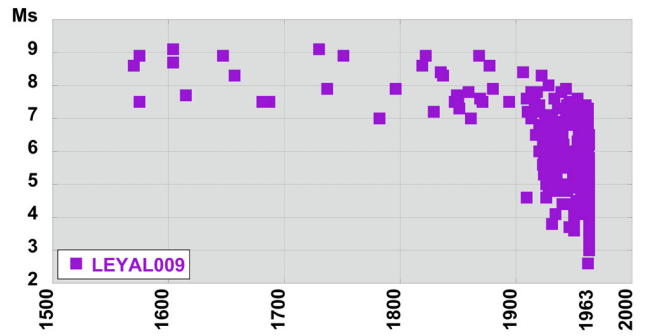
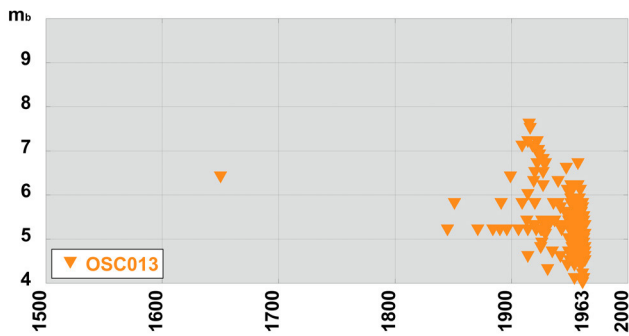
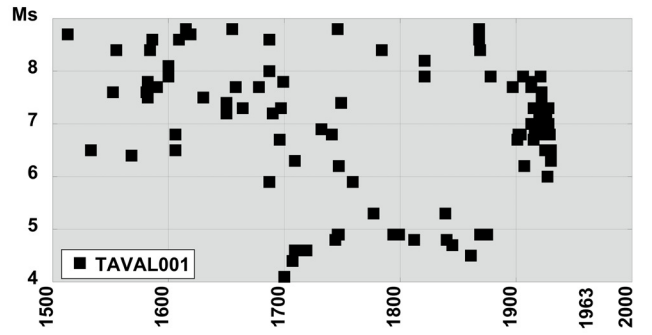
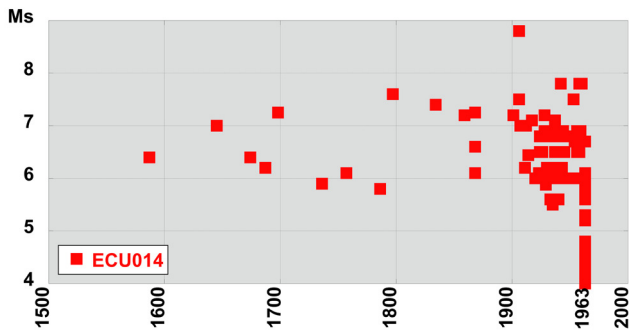
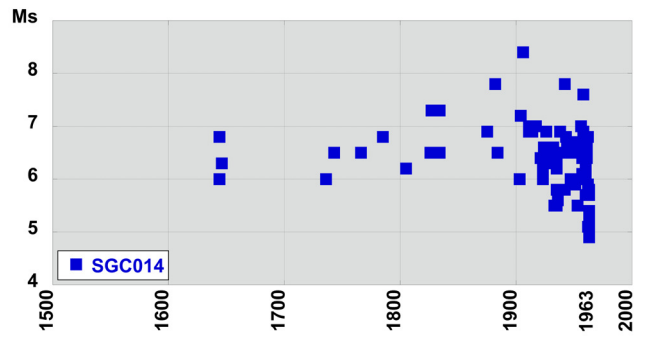
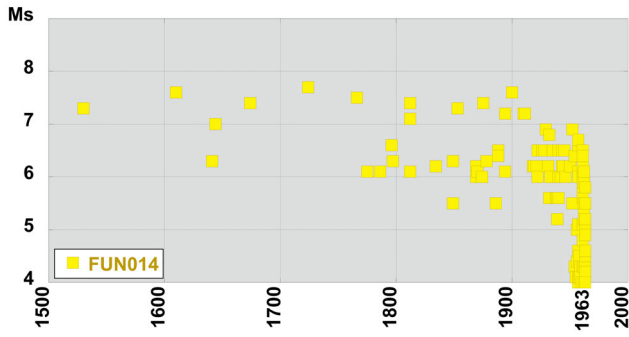


Figura 3. a) Epicentros de los catálogos nacionales en la ventana de tiempo antes del 1964. b) Historia sísmica (pre 1964): Venezuela (FUN014), Colombia (SGC014), Ecuador (ECU014), Perú. (TAVAl001), Bolivia (OSC013), Chile (LEYAL009), Argentina (INPRE015), Brasil (BSB012)

b)



a)



b)

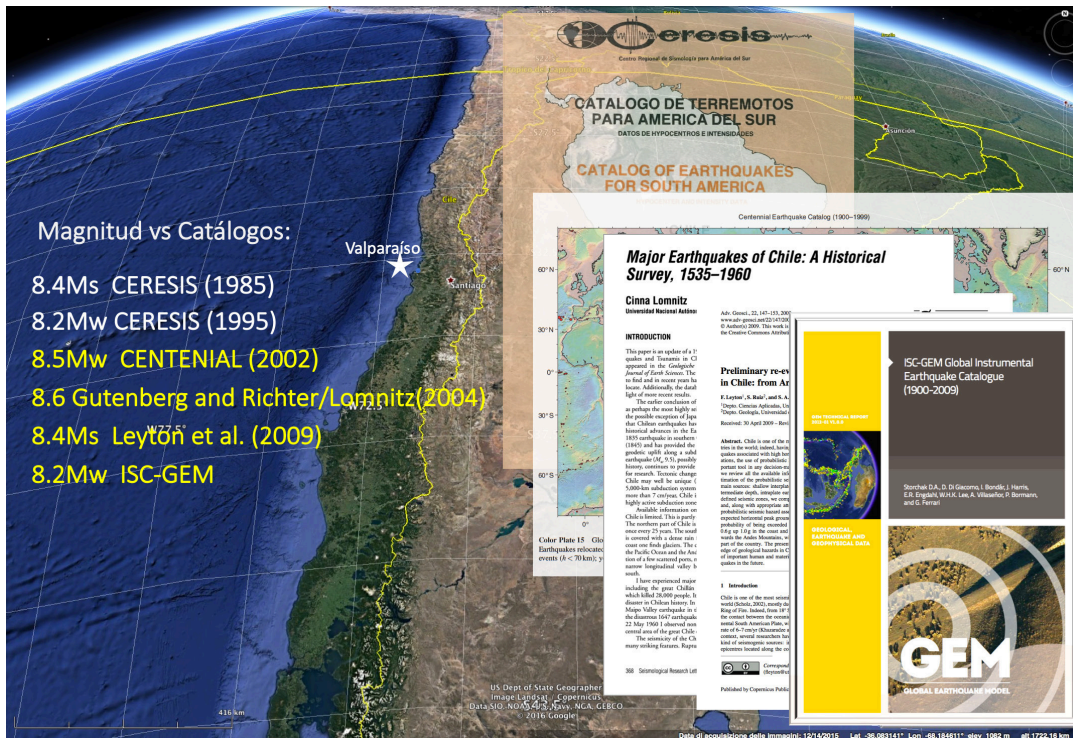


Figura 4. a) El terremoto del 21 de octubre de 1766 en Venezuela según CERESIS (1985). b) El terremoto de Valparaíso (Chile) del 16 de agosto de 1906, la magnitud es dada por seis entradas según los diferentes catálogos a escala continental (CERESIS, CENTENIAL, ISC-GEM) y nacional (Leytón *et al.*, 2009). También es citado el estudio de Lomnitz (2004) cuya fuente es Gutenberg y Richter (1956)

Tabla 2. Estudios de terremotos considerados y número relevante de entradas

AR: Argentina; CA: Mar del Caribe; CL: Chile; CO: Colombia; EC: Ecuador; PE: Perú; VE: Venezuela

Código	Referencia	Área de cobertura	No. de entradas
ALVBE006	Alvarado y Beck (2006)	AR	2
AUDE999	Audemard (1999)	VE	1
ALVAL009	Alvarado et al. (2009)	AR	1
BEAAL010	Beauval et al. (2010)	EC	18
BEAAL013	Beauval et al. (2013)	EC	12
CHOAL010	Choy et al. (2010)	VE	2
CIST012	Cisternas (2012)	CL	1
DIMAL005	Dimaté et al. (2005)	VE	8
DORAL990	Dorbath et al.(1990)	PE	16
DOREL981	Dorel (1981)	CA	1
EGRE004	Egred (2004)	EC	1
ESPI003	Espinosa (2003)	CO	7
GOMAL014a	Gómez-Capera et al. (2014a)	CO	1
GOMAL014b	Gómez-Capera et al. (2014b)	CO	1
GOMAL016	Gómez-Capera et al. (2016)	CO	32
KINAL008	Kingland et al. (2008)	VE	1
LOMNI004	Lomnitz (2004)	CL	38
MOCQ007	Mocquet (2007)	VE	1
PALAL005	Palme et al. (2005)	VE	8
PALAL009	Palme et al. (2009)	VE	3
RENLA000	Rengifo y Laffaille (2000)	VE	1
SALAL007	Salcedo Hurtado et al.(2007)	CO	1
SALGO013	Salcedo Hurtado y Gómez-Capera (2013)	CO	1
SALCA011	Salcedo Hurtado y Castaño (2011)	CO	1
SARAL010	Sarabia Gómez et al. (2010)	CO	1
SARCI011	Sarabia y Cifuentes (2011)	CO	19
SGC013	SGC (2013)	CO	52
SHIVE011	Sism. Hist. Ven. (2011)	VE	48
SISFR010	SisFrance (2015)	CA	4
TELPE005	Tello y Pérez (2005)	AR	1
UDIAL012	Udías et al. (2012)	CL	4

Para Perú, Chile, Argentina y Brasil, estudios con nuevos datos de intensidad macrosísmica no han sido realizados, por lo cual los datos macrosísmicos del CERESIS (1985) siguen siendo vigentes para esos países.

En la Tabla 2 son listados estudios de terremotos históricos que tienen asignación de magnitudes a partir de datos macrosísmicos (Dimaté *et al.*, 2005; Palme *et al.*, 2005; Beauval *et al.*, 2010; Choy *et al.*, 2010; Beauval *et al.*, 2013; Gómez Capera *et al.*, 2014a; Gómez Capera *et al.*, 2014b). En particular, en el proyecto SARA, las magnitudes Mw para 32 terremotos históricos de Colombia son evaluadas y son presentadas en la sección 5.1 del presente artículo.

Parámetros de terremotos para grandes eventos del Perú y Chile son compilados a partir de los estudios de Cisternas (2012), Dorbath *et al.* (1990), Lomnitz (2004) y Udías *et al.* (2012).

También son considerados estudios de evaluación de parámetros de terremotos a escala continental (Abe, 1979; Abe y Noguchi, 1983; Tanner y Shepherd, 1997) y estudios donde el dato macrosísmico complementa los análisis obtenidos con la neotectónica (Audemard, 1999; Alvarado y Beck, 2006; Alvarado *et al.*, 2009).

Fueron revisados estudios para eventos históricos en el mar del Caribe (Dorel, 1981; SisFrance, 2015). Como ejemplo, se destaca un nuevo escenario de intensidades macrosísmica y parámetros para el terremoto del 21 de octubre del 1766 en la isla de Trinidad, según el estudio de Mocquet (2007) en Figura 5a. Para este mismo evento histórico, en la Figura 5b se observa la diferencia de 400 km entre el epicentro en CERESIS (1985) y el propuesto por Mocquet (2007).



Figura 5. a) El terremoto del 21 octubre del 1766 según el estudio de Mocquet (2007). b) El terremoto del 21 octubre del 1766: comparación entre el epicentro en CERESIS (1985) y en Mocquet (2007).

Para los grandes terremotos ($M \geq 7.0$), el inventario compilado en el marco del proyecto GEM-GEH (Global Earthquake History, 2013; Albini *et al.*, 2014) ha sido una fuente importante.

Las entradas relacionadas con el mismo evento se agruparon. Esta operación se realizó en dos pasos: primero, automáticamente, luego manualmente. El último permitió detectar y eliminar varias duplicaciones, principalmente dentro del catálogo del CERESIS (1995) con respecto a los terremotos fronterizos. En la Figura 3 se presenta la distribución geográfica de terremotos según los catálogos nacionales y sus correspondientes historias sísmicas, para dar una idea de la distribución temporal de los eventos sísmicos.

3. Tiempo, localización y profundidad

A partir del inventario crítico dado por la fuente de datos, una entrada por cada terremoto se seleccionó como "preferida" con referencia al tiempo, localización y profundidad focal. La prioridad se dio de acuerdo con el siguiente orden jerárquico de tipo decreciente:

- (1) catálogo ISC-GEM (2015)
- (2) Engdahl y Villaseñor (2002)
- (3) estudios recientes (Tabla 2)
- (4) catálogos paramétricos de carácter nacional (Tabla 1b)
- (5) catálogo CERESIS (1995)
- (6) catálogo y base de datos macrosísmica CERESIS (1985)

Sin embargo, cuando las entradas de los catálogos nacionales coinciden claramente con las de CERESIS (1995), esta última se selecciona, por que es la raíz de las entradas en dichos catálogos y, además, corresponde a la actualización de CERESIS (1985) que cita las fuentes primarias.

Después de compilar el material mencionado se observa que en el período anterior a 1964 el catálogo CERESIS (1995) contiene más entradas que los catálogos nacionales que se consideraron en el proyecto SARA; dichos catálogos nacionales son aportados por los participantes del proyecto, o encontrados en línea en internet para los casos de Argentina y Perú. Se observa que algunas entradas de CERESIS (1995) no se incluyeron en algunos catálogos nacionales debido al umbral de magnitud considerado. Por otra parte, algunas entradas definidas como desconocidas para CERESIS (1995) se encuentran en algunos catálogos nacionales.

Por último, para cada terremoto se compiló una fila que corresponde a la entrada preferida de acuerdo al análisis según el orden jerárquico, adoptando el tiempo, la localización y la profundidad respectiva.

4. Tamaño del terremoto

4.1 El tamaño del terremoto en las fuentes de datos

Un inventario del tipo de magnitud de los datos de entrada se realizó para luego homogeneizar en términos de M_w . Las fuentes de datos que se consideraron proporcionan diversos tipos de magnitud y en algunos casos son definidas a partir de regresiones entre diferentes variables que expresan la magnitud del terremoto, así como las siglas que las definen (M_s o m_b). Por ejemplo, los datos de ingreso del CERESIS (1995) están dados principalmente en magnitud de onda superficial M_s , magnitud de onda volumétrica m_b , y magnitud local M_L ; se observa que muchos eventos de Ecuador y Perú asignan el tipo de magnitud con la sigla "K", dicha sigla corresponde a la relación (Tabla 3) propuesta por Gutenberg y Richter (1956), que evalúa la

Tabla 3. Conversión de magnitud M de "otro tipo" a Ms o m_b

Sigla de Magnitud	Catálogo	Comentario	Conversión final
M	BO	La sigla "M" indica M_L en el correspondiente catálogo de Bolivia del CERESIS (1985), se determina a partir de la relación : $M_L = 1.08 + 0.6228 I_0$ donde I_0 es la intensidad epicentral. Se observa que esta relación es muy similar a otras fórmulas propuestas y aplicadas en CERESIS (1985) que define Ms. La magnitud "M" se adoptada como Ms.	Ms
G	BO	La sigla G indica magnitud local en el volumen del CERESIS (1985) correspondiente al catálogo de Bolivia; dicho tipo de magnitud es citada por CERESIS (1995) como magnitud m_b .	m_b
K	EC PE	En los volúmenes del CERESIS (1985) correspondientes a los catálogos de Ecuador y Perú, la sigla "K" indica Ms evaluada a partir de la intensidad epicentral usando la relación de Gutenberg y Richter (1956): $M = 2/3 I_0 + 1$	Ms
m	EC	La sigla "m" se define como Ms en Abe (1981) para eventos de Ecuador.	Ms
UK	CL	La sigla "UK" indica casos donde la magnitud se desconoce en Engdahl y Villaseñor (2002) para eventos de Chile. En el catálogo chileno se expresa en Ms, por lo cual en el presente trabajo, se considera como Ms.	
B	CL	La sigla "B" indica MB en Abe (1979), por lo cual es considerada como m_b para algunos casos de eventos en Chile.	Ms
F	PE	La sigla "F" indica Ms en Abe y Noguchi (1983) para algunos eventos del Perú.	m_b
I	PE	La sigla "I" define una magnitud determinada a partir de la intensidad macrosísmica máxima usando una serie de regresiones propuestas en el catálogo del Perú por CERESIS (1985). Tal magnitud se adopta en el presente trabajo como Ms.	Ms
Sin tipo se escala	PE	CERESIS (1995) lista un conjunto de magnitudes sin definir la escala para algunos eventos del Perú, pero son citadas con la Fuente LCO (Leónidas Ocola). En otros casos, cuando LCO es citado, aparece como: <ul style="list-style-type: none"> • magnitudes mayores que 6 son Ms • magnitudes menores que 6 son m_b En el presente trabajo se adopta dicha regla.	Ms o m_b
Sin tipo de escala	CO	El catálogo colombiano (SGC, 2014) presenta un evento con escala de magnitud desconocida. Las magnitudes de terremotos históricos en Colombia tendencialmente se expresan en Ms (Espinosa <i>et al.</i> , 2004) por lo cual se adopta dicha escala de magnitud para dicho evento.	Ms

magnitud M_s a partir de la intensidad epicentral o intensidad máxima. Otros casos particulares del tipo de magnitud en los datos de entrada son llevadas en términos de magnitud M_s o m_b a partir de la información dada por las fuentes de dichos datos, más ejemplos son descritos en la Tabla 3.

En este trabajo se adoptó un valor de magnitud según el siguiente esquema de prioridad:

- (1) M_w , (2) M_s , (3) m_b , otros tipos (4) M .

CERESIS (1985 y 1995) proporcionan información sobre los valores de intensidad macrosísmica (máxima o percibida al sitio) que son útiles para evaluar la magnitud usando relaciones empíricas entre ellas [$M_w=f(\text{intensidad})$], para aquellos terremotos que no tienen asignación de ningún tipo de magnitud, pero tienen información macrosísmica.

Después de adoptar el esquema de prioridad de magnitud, la situación en el intervalo de tiempo (1500-1963) de la distribución del tipo de magnitud en CERESIS (1995) se presenta en la Tabla 4. Se observa que, para un total de 7667 terremotos, sólo 12 eventos, que corresponde

al 0.2%, están dados en magnitud M_w , el 18.8% en M_s , el 11.7% en m_b ; el 3.5% están dados en otros tipos de magnitud y la mayoría de eventos (65.8%) no tienen asignación de ningún tipo de magnitud.

El catálogo de Engdahl y Villaseñor (2002) proporciona diferentes tipos de magnitud, incluyendo eventos con magnitud desconocida los cuales se identifican con la sigla UK (unkown) (Tabla 3). El catálogo de ISC-GEM (2015) es homogéneo en magnitud M_w por lo que se adoptan en el presente estudio y corresponde a eventos post-1900.

Los catálogos nacionales de terremotos son compilados a través de proyectos de amenaza sísmica en los países de la región y son publicados con diferentes tipos de magnitud e intensidad. Por ejemplo, para el caso de terremotos históricos de Argentina (INPRES, 2015), un listado de eventos es público en línea en términos de la intensidad macrosísmica máxima VI≤IX de la escala de Mercalli Modificada (MM); dicho listado es de carácter descriptivo, con daños y/o víctimas ocasionados por cada terremoto; la Tabla 5 resume los tipos de magnitud o intensidad máxima para cada catálogo nacional.

Tabla 4. Tipo de magnitud en CERESIS (1995) y números relevantes.

País	Ventana de Tiempo	N de entradas	M_w	M_s	m_b	M (otras)	No tienen M
Argentina	1692-1963	554		111	146	3	294
Bolivia	1650-1963	202		47	123	10	22
Brazil	1720-1963	268		24	207	1	36
Chile	1520-1963	1247	4	254	86	4	899
Colombia	1566-1963	783		705	20	2	56
Ecuador	1541-1963	721		70	78	167	406
Peru	1471-1963	3544	8	180	202	16	3138
Venezuela	1530-1963	348		54	32	67	195
Total	pre 1964	7667	12	1445	894	270	5046

Tabla 5. Tipos de magnitud en los catálogos nacionales de terremotos

País	Código Catálogo	Tipo de magnitud
Bolivia	OSC013	M_s , m_b
Brasil	BSB012	m_b
Colombia	SGC014	M_w , M_s , m_b
Ecuador	ECU014	M_w , M_s , m_b
Venezuela	FUN014	M_s
Argentina	INPRE015	I_{xx} (MM)
Chile	LEYAL009	M_s
Peru	TAVAL001	M_s , M_w

En cuanto a los estudios de terremotos históricos, los más modernos, en Ecuador y Venezuela (Beauval *et al.*, 2010, Palme *et al.*, 2005), proporcionan parámetros tales como la magnitud equivalente a M_w , que es calculada a partir de datos macrosísmicos, usando un modelo de atenuación de la intensidad calibrado en M_w y el método de Bakun y Wentworth (1997). El caso de Colombia se presenta en la sección 5. Las magnitudes no evaluadas en términos de M_w , M_s o m_b , como se observa en los ejemplos de la Tabla 3, se convirtieron a M_s o m_b de acuerdo a la descripción y formatos dados en sus correspondientes fuentes de datos. Además, cuando se encontraron dos o más valores de magnitud M_w , o de M_s , de diferentes fuentes bibliográficas para el mismo terremoto, se seleccionó una de ellas de acuerdo al esquema de prioridad citado en la sección 3. Como regla general, se prefirió la magnitud cuyo origen es conocido es decir, son referidas las fuentes y métodos usados. En esta etapa, se dispone de valores de magnitud M_w para el 34% de las entradas, por lo tanto, la tarea fue determinar la magnitud M_w para aproximadamente 66% de entradas.

4.2 Convirtiendo magnitud M_s o m_b a magnitud M_w

Un conjunto de relaciones de conversión de carácter empírico se consideró para transformar la magnitud M_s y m_b a magnitud M_w . Dichas relaciones se resumen en la Tabla 6, y se grafican en las Figuras 6a y 6b. Las relaciones de Scordilis (2006) son preferidas en el presente estudio porque suministran la desviación estándar y porque se observa que proporcionan valores similares hasta las vecindades de $M_w=8.0$ a los predichos por ISC-GEM (Storchak *et al.*, 2012 y 2013; Lolli *et al.*, 2014).

Para el rango de magnitud $M_w>8.0$ se observa que los tres modelos divergen. Por ello son adoptadas las magnitudes dadas por los diferentes estudios de terremotos históricos, así como en las suministradas por los catálogos homogéneos del periodo pos-1900. Por ejemplo:

- i) las magnitudes M_w de grandes sismos históricos del Perú son tomadas del estudio de Dorbath *et al.* (1990), por ejemplo (Figura 7) para el terremoto del 28 octubre de 1746 en Lima y Callao es adoptada la $M_w=8.6$ de dicho estudio y el epicentro de CERESIS (1985) ;

Tabla 6. Relaciones de conversión consideradas

Fuente	Relación	Rango	σ
Scordilis(2006)	$M_w = 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03)$	$3.0 \leq M_s \leq 6.1$	0.17
Scordilis (2006)	$M_w = 0.99 (\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13)$	$6.2 \leq M_s \leq 8.2$	0.20
Scordilis(2006)	$M_w = 0.85 (\pm 0.04)m_b + 1.03 (\pm 0.23)$	$3.5 \leq m_b \leq 6.2$	0.29
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = 0.67 M_s + 2.13$	$M_s \leq 6.47$	
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = 1.10 M_s - 0.67$	$M_s > 6.47$	
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = e^{(-4.66+0.86m_b)+ 4.56}$	$4.5 \leq m_b \leq 6.0$	
Assumpção <i>et al.</i> , (2014)	$M_w = 1.21 m_b - 0.76$	$1.6 \leq m_b \leq 5.5$	0.32
Contreras Luarte (2009)	$M_w = 1.32m_b - 1.56$	$5.0 \leq m_b \leq 5.5$	-
Contreras Luarte (2009)	$M_w = 1.00M_s + 0.07$	$5.6 \leq M_s \leq 7.5$	-
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(2.133+0.063M_s) - 6.205$	$M_s \leq 5.5$	0.17
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(-0.109+0.229M_s) + 2.586$	$M_s > 5.5$	0.15
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(0.741+0.210m_b) - 0.785$	$3.6 \leq m_b \leq 7.2$	0.33

σ corresponde a la desviación estándar

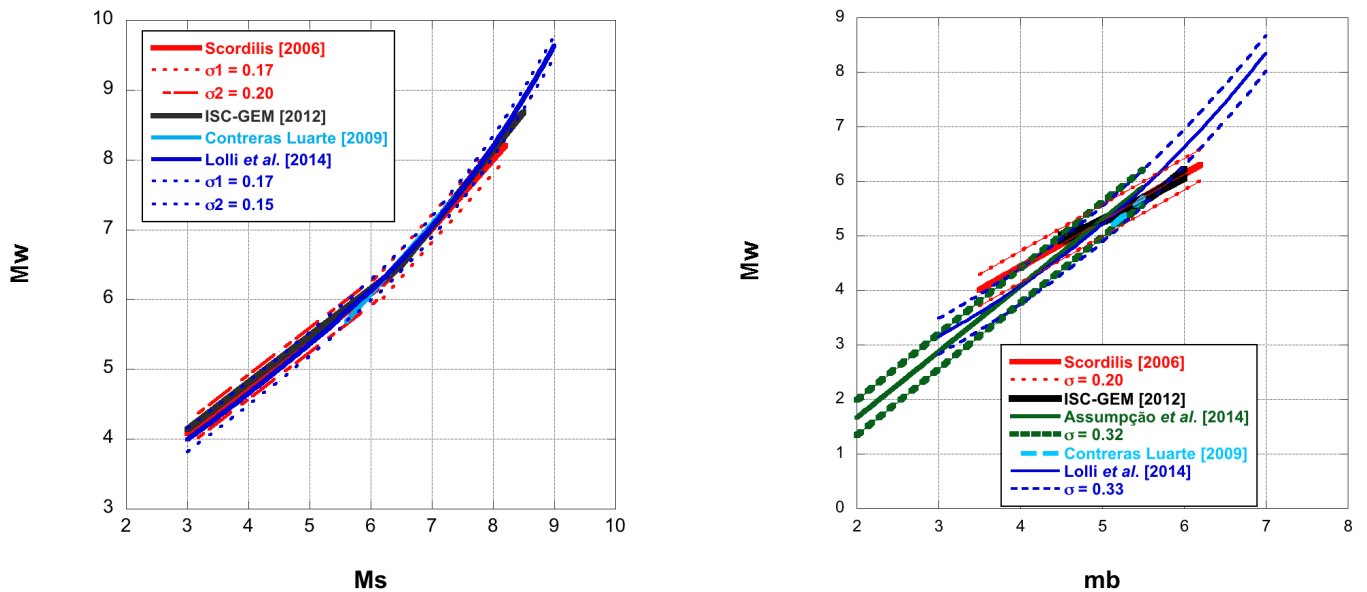


Figura 6. Comparación entre a) relaciones de conversión de Ms a Mw; b) relaciones de conversión de m_b a M

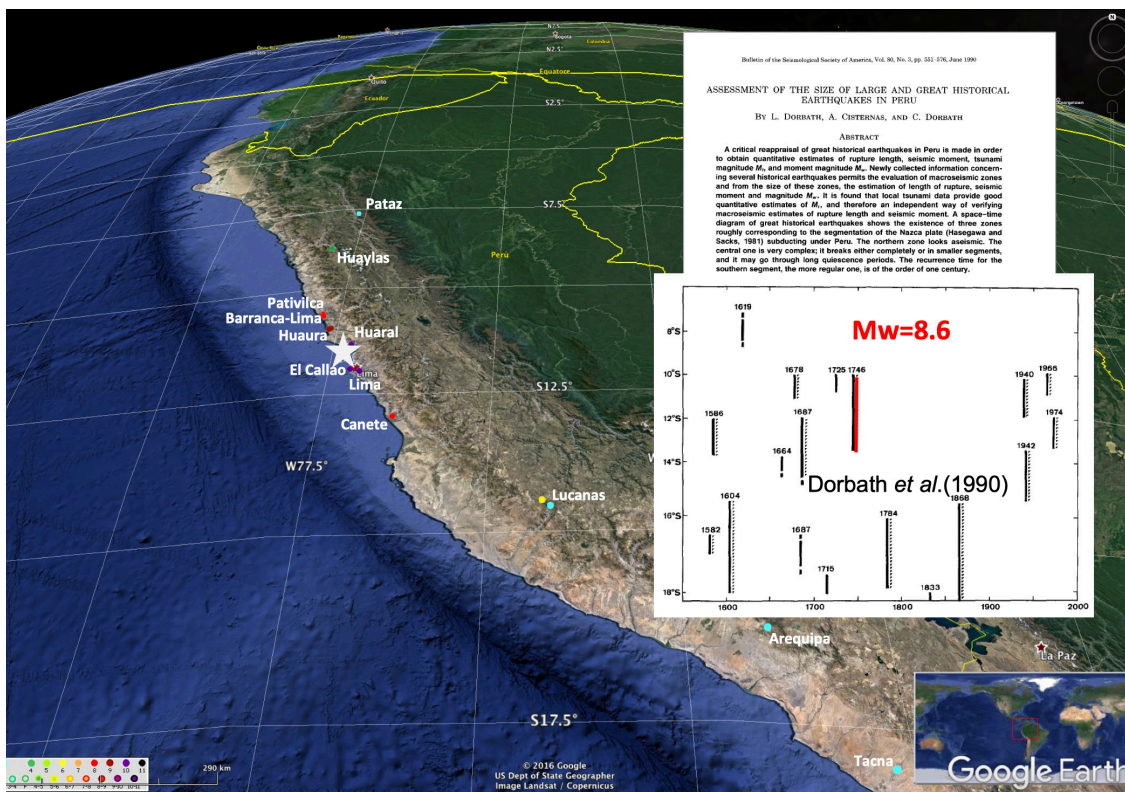


Figura 7. Terremoto del 28 octubre de 1746 en Lima y Callao. El epicentro y los puntos de intensidad macrosísmica son dados por CERESIS (1985). La magnitud Mw es dada por el estudio de Dorbath et al. (1990).



Figura 8. Terremoto del 22 de mayo de 1960 en Valdivia, Chile. Los parámetros del terremoto son tomados del catálogo del ISC-GEM (2013)

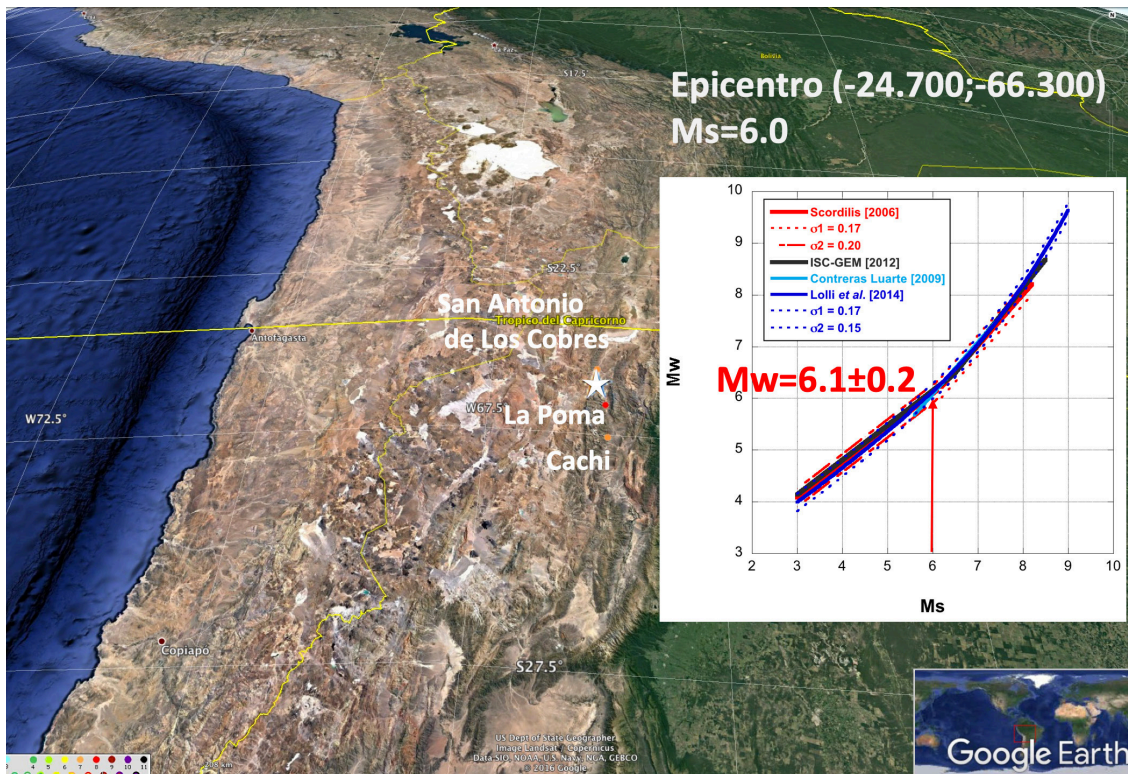


Figura 9. Conversión de magnitud M_s a M_w para el terremoto del 24 de diciembre de 1930, La Poma (Argentina). Los puntos de intensidad, epicentro y magnitud 6.0 M_s son dados por CERESIS (1985).

ii) el evento chileno conocido como el terremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960 ($M_w=9.60\pm 0.30$), la magnitud y el epicentro son adoptados directamente del catálogo ISC-GEM (2015) (Figura 8).

Como se observa en la Tabla 6, la aplicabilidad de Scordilis (2006) se concentra para los eventos sísmicos en dos rangos de M_s ($6.2 \leq M_s \leq 8.2$; $3.0 \leq M_s \leq 6.1$) con sus correspondientes relaciones de conversión a M_w . Por ejemplo en la Figura 9, se observa la conversión de magnitud M_s a M_w para el terremoto de La Poma en la Puna Argentina del 25 diciembre de 1930; la fuente de la magnitud M_s y del epicentro es CERESIS (1985).

Para el caso de eventos con magnitud m_b , una relación de conversión es dada para el rango $3.5 \leq m_b \leq 6.2$.

También se consideraron las relaciones

propuestas por Contreras Luarte (2009) para Chile, pero su rango de definición es muy limitado. Para Brasil se adoptó la relación lineal de Assumpção et al. (2014) que muestra un comportamiento diferente en comparación a Scordilis (2006) y Storchak et al., (2012).

Las relaciones de Scordilis (2006) proporcionan incertidumbres que son expresadas por la desviación estándar respecto al valor medio de las correspondientes relaciones empíricas.

5. Determinando M_w a partir de datos macrosísmicos

Las entradas de eventos sísmicos que no tienen asociado ningún tipo de magnitud, pero tienen información macrosísmica en los datos de entrada, son muchas. En particular 5046 eventos con tales características son encontrados en CERESIS (1995); como se observa en la Tabla (4), la mitad de estos eventos corresponden a terremotos del Perú. A partir de los datos

macrosísmicos, el método más adecuado para determinar la magnitud equivalente a Mw sería hacer uso de algoritmos como los propuestos por Bakun y Wentworth (1997) y Gasperini *et al.* (1999; 2010). Sin embargo, para la modelación de la magnitud de un terremoto a partir de datos macrosísmicos, dichos métodos requieren dos elementos:

- i) modelos de atenuación de la intensidad macrosísmica, los cuales deben ser calibrados en Mw para la región de estudio;
- ii) suficientes puntos de intensidad macrosísmica del terremoto del cual se van a modelar los parámetros.

No obstante la disponibilidad de la base de datos macrosísmica del CERESIS (1985), instituciones de Venezuela, Ecuador y Colombia han continuado la investigación en sismicidad histórica y han propuesto nuevos estudios para la evaluación de puntos de intensidad macrosísmica, ya sea para terremotos históricos como recientes (Egred, 2004; Sismología Histórica de Venezuela, 2011). A partir de dichos estudios, son evaluados parámetros de terremotos históricos de los Andes de Mérida en Venezuela (Palme de Osechas *et al.*, 2005; Choy *et al.*, 2010), y de los valles interandinos de Ecuador (Beauval *et al.*, 2010; Beauval *et al.*, 2013); los resultados de tales estudios son adoptados en el presente trabajo. Colombia dispone de una nueva base de datos macrosísmicos de terremotos históricos y recientes que están en continua actualización en paralelo con estudios de sismicidad histórica (Servicio Geológico Colombiano, 2013). Dicha base de datos se aplica para evaluar parámetros de 29 terremotos históricos; la evaluación se describe en el sección 5.1.

De igual manera, para eventos que no tienen ningún tipo de magnitud asignada en los datos de entrada pero que disponen de al menos un punto de intensidad macrosísmica, el método que se

adopta corresponde a la aplicación de relaciones lineales de carácter empírico entre la Mw y la intensidad macrosísmica máxima a partir de análisis numérico de las relaciones de atenuación propuestas en literatura para Venezuela y Ecuador (párrafo 5.2), y determinando regresiones, en el presente estudio, para el Perú-Chile, Colombia, Bolivia y Argentina (párrafo 5.3).

5.1 Evaluando Mw en Colombia a partir de datos de intensidad macrosísmica

El método de Bakun y Wenworth (1997)

Un modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica se calibró con terremotos superficiales del territorio colombiano y luego se aplicó, usando el método de Bakun y Wenworth (1997), para la evaluación de parámetros de terremotos históricos a partir de puntos de intensidad macrosísmica. Dicho método requiere que la funcional que representa el modelo de atenuación de la intensidad tenga físicamente dos componentes con las siguientes características:

- i) que la intensidad macrosísmica sea directamente proporcional a la magnitud del terremoto, es decir, corresponde a la componente del parámetro energético de la fuente del evento.
- ii) que la intensidad macrosísmica decaiga con la distancia desde el epicentro para una profundidad focal dada, es decir, corresponde a la componente espacial que expresa la atenuación, sea anelástica y geométrica.

Tradicionalmente es usada una funcional de tipo logarítmica-lineal de la distancia y lineal con la magnitud momento (Mw):

$$l_{ij} = a + bMw_j - cR_{ij} - d \log R_{ij} \quad (1)$$

donde Mw_j es la magnitud del j -ésimo terremoto ($j=1, \dots, Neq$), siendo Neq el número de

terremotos usados en el proceso de calibración de la ecuación (1), R_{ij} es la distancia hipocentral ($R = (x^2+h^2)^{1/2}$) para el j -ésimo terremoto sentido en el sitio i , h la profundidad focal, que en la versión original los autores fijan a 10km, I_{ij} es la intensidad macrosísmica en el sitio i ocasionada por el j -ésimo terremoto.

Para sismos donde $h < 60$ km se ha encontrado en este tipo de estudio que el modelo de atenuación es poco sensible con la profundidad focal h (Bindi *et al.*, 2013). Los coeficientes a , b , c y d se calibran en el presente trabajo. En particular, c corresponde al coeficiente de atenuación anelástica y d al coeficiente de atenuación geométrico (Howel y Schultz, 1975). Para el caso de un terremoto histórico, el método de Bakun y Wenworth (1997) aplica la ecuación (1) para modelar la magnitud a partir de sólo los datos de intensidad macrosísmica; dicha magnitud calculada es equivalente a la M_w si en el proceso de calibración se utilizan sismos con magnitudes en esa escala; dicho proceso se presenta en la siguiente sección.

Calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica y aplicación

Para realizar el proceso de calibración del modelo de atenuación (1) en el presente estudio, se seleccionaron ocho terremotos superficiales (profundidad $h \leq 36$ km) del periodo 1917-2008 con parámetros de carácter instrumental (M_w y coordenadas del epicentro) y simultáneamente con datos de intensidad macrosísmica para cada sismo. Por ejemplo, el evento del 25 de enero de 1999, conocido como el terremoto de Armenia, es escogido para el proceso de calibración con las siguientes características (Figura 10):

- i) el epicentro es dado por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) y la magnitud (6.14 M_w) por el catálogo de ISC-GEM (2015)

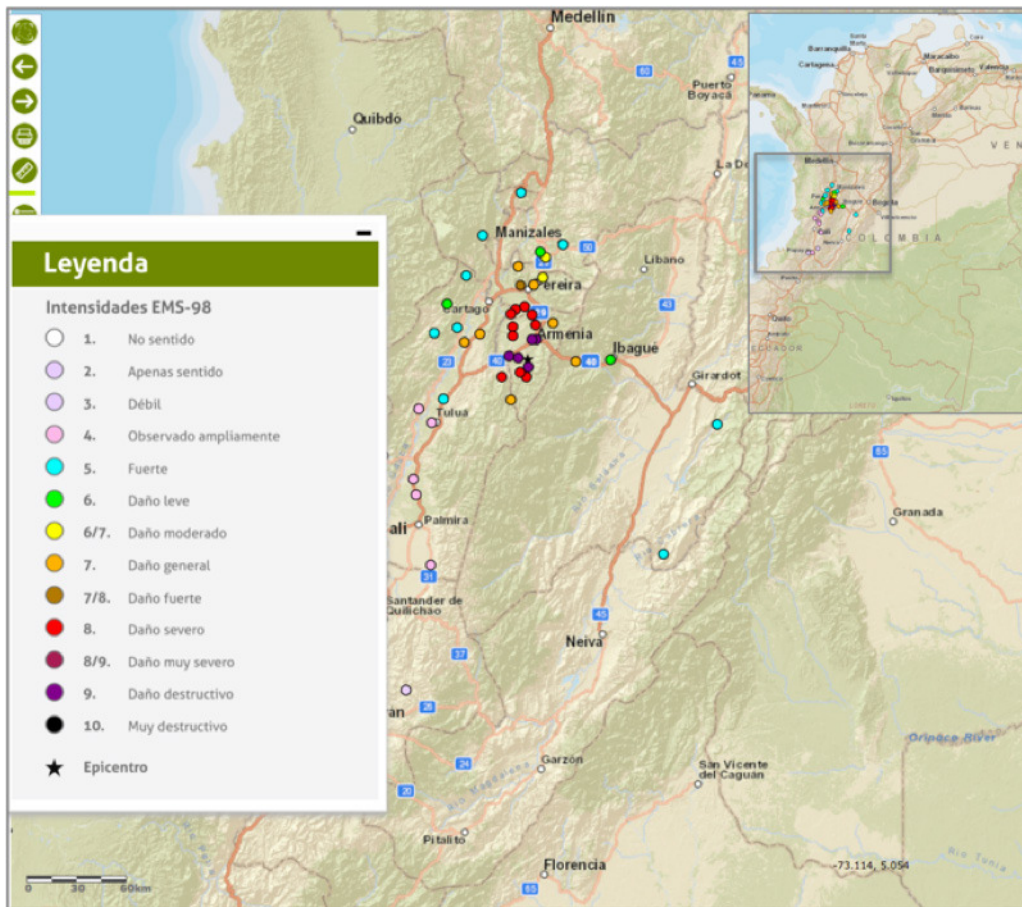
- ii) 46 puntos de intensidad macrosísmica son publicados por la base de datos del SGC (2013) en escala macrosísmica europea (EMS98); dicha base de datos esta soportada por sus correspondientes fuentes.

La selección de los ocho terremotos citados en la Tabla 7, corresponde a sismos superficiales de la zona andina y cubren un rango de magnitud $5.11 \leq M_w \leq 7.11$ e incertidumbres menores de 0.30 unidad de M_w . Los parámetros instrumentales se tomaron del catálogo ISC-GEM (2015) y del SGC (2014) el cual cita fuentes. En la Figura 11 se visualizan la base de datos de puntos de intensidad de los ocho eventos con sus correspondientes epicentros citados en la Tabla 7.

Vacíos de información pueden ser observados en el decaimiento de los puntos de intensidad con la distancia, para cada uno de los ocho terremotos, debido a muchos factores, como la distribución de la población a lo largo de los valles andinos, la directividad de la propagación de la energía sísmica a lo largo de las cordilleras, así como factores como la baja densidad de población en algunas regiones.

Para la gestión del vacío de información en el decaimiento de los puntos de intensidad macrosísmica con la distancia, se aplicó la estrategia de usar la media y la mediana de la distancia hipocentral. Estas se evaluaron para cada clase de intensidad macrosísmica de cada uno de los terremotos usados en el proceso de calibración del modelo de atenuación. La Figura 12 presenta cuatro ejemplos de dicha estrategia: los círculos azules representan los niveles de intensidad macrosísmica; la media y la mediana de la distancia hipocentral para cada clase de intensidad son representadas por los cuadrados verdes abiertos y rojos, respectivamente. Las barras verdes representan ± 1 desviación estándar con respecto al valor medio de la distancia hipocentral.

a)



b)



Figura 10. El evento del 25 de enero del 1999 conocido como el terremoto de Armenia. a) Puntos de intensidad macrosísmica del SGC (2013), se observa que la intensidad en Armenia es 9(EMS98). b) Fotografía del evento en la ciudad de Armenia. (Fuente: http://caracol.com.co/emisora/2016/01/25/armenia/1453727445_582883.html).

Tabla 7. Terremotos seleccionados para la calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia

N	Fecha	Área	Epicentro		Fuente Epicentro	Mw	Error Mw	Fuente Mw / o Transf.	Profundidad Focal	Fuente Profundidad	I Max (EMS98) (SGC013)	N MDP (SGC013)
			Lat	Long								
1	1917.08.31	Suroriente de Cundinamarca	4.000	-74.000	Ramírez (1975)	6.91	0.20	¹ SCORD	15	SGC013	9	56
2	1942.05.22	Girardot	4.500	-75.000	SGC013	5.96	0.17	² SCORD	20	SGC013	7	19
3	1967.02.09	Colombia	2.930	-74.830	ISCGE015	7.00	0.30	ISCGE015	36	SGC013	10	100
4	1988.03.19	El Calvario	4.430	-73.790	SGC013	5.11	0.29	³ SCORD	13.5	SGC013	6	8
5	1992.10.18	Murindó	7.090	-76.770	ENGVI002	7.11	0.10	ISCGE015	5	ENG-VI002	10	121
6	1995.01.19	Tauramena	5.030	-72.950	RSNC	6.51	0.10	ISCGE015	17	ENG-VI002	8	78
7	1999.01.25	Armenia	4.440	-75.700	RSNC	6.14	0.10	ISCGE015	17	NEIC	9	46
8	2008.05.24	Quetame	4.400	-73.810	RSNC	5.90	0.10	ISCGE015	9	NEIC	8	21

Magnitudes transformadas a Mw usando SCORD (Scordilis, 2006) a partir de: ¹M_s=6.90 (Abe,1981), ²M_s=5.80 (SGC, 2013), ³m_b=4.80 (SGC, 2013) RSNC: Red Sismológica Nacional de Colombia (2015)

El conjunto de medianas para cada clase de intensidad y de cada uno de los ocho eventos sísmicos son usadas para calibrar los coeficientes de la ecuación (1) que explícitamente se obtiene como:

$$I = -1.92 + 2.33M_w - 0.0021R - 3.68\log R \quad (2)$$

El modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica calibrado en Mw dado por la ecuación (2) es caracterizado con una desviación estándar $\sigma=0.50$, que corresponde al orden de medio grado de intensidad macrosísmica.

Los coeficientes fueron:

- i) verificados con los mismos terremotos usados en la calibración, determinando magnitudes calculadas con los datos de intensidad (M_{wi}) en la Figura 13a; dichas magnitudes calculadas reproducen las magnitudes instrumentales

(M_w) dentro de un óptimo grado de incertidumbre;

- ii) validados a partir de la determinación de la magnitud (M_{wi}), usando los puntos de intensidad macrosísmica de cuatro terremotos que son independientes del conjunto de terremotos usados en el proceso de calibración (Tabla 8). El proceso de validación del modelo (2) determina si el uso los coeficientes calibrados conduce a resultados realistas del cálculo de la magnitud Mw. Los resultados son mostrados en la Figura 13b, en la cual se observan los valores de la magnitudes calculados (M_{wi}) por el modelo (2) y los valores instrumentales (M_w), cuyas diferencias son menores de 0.3 unidad de Mw, que están dentro del grado de incertidumbre tradicionalmente observados con datos instrumentales.

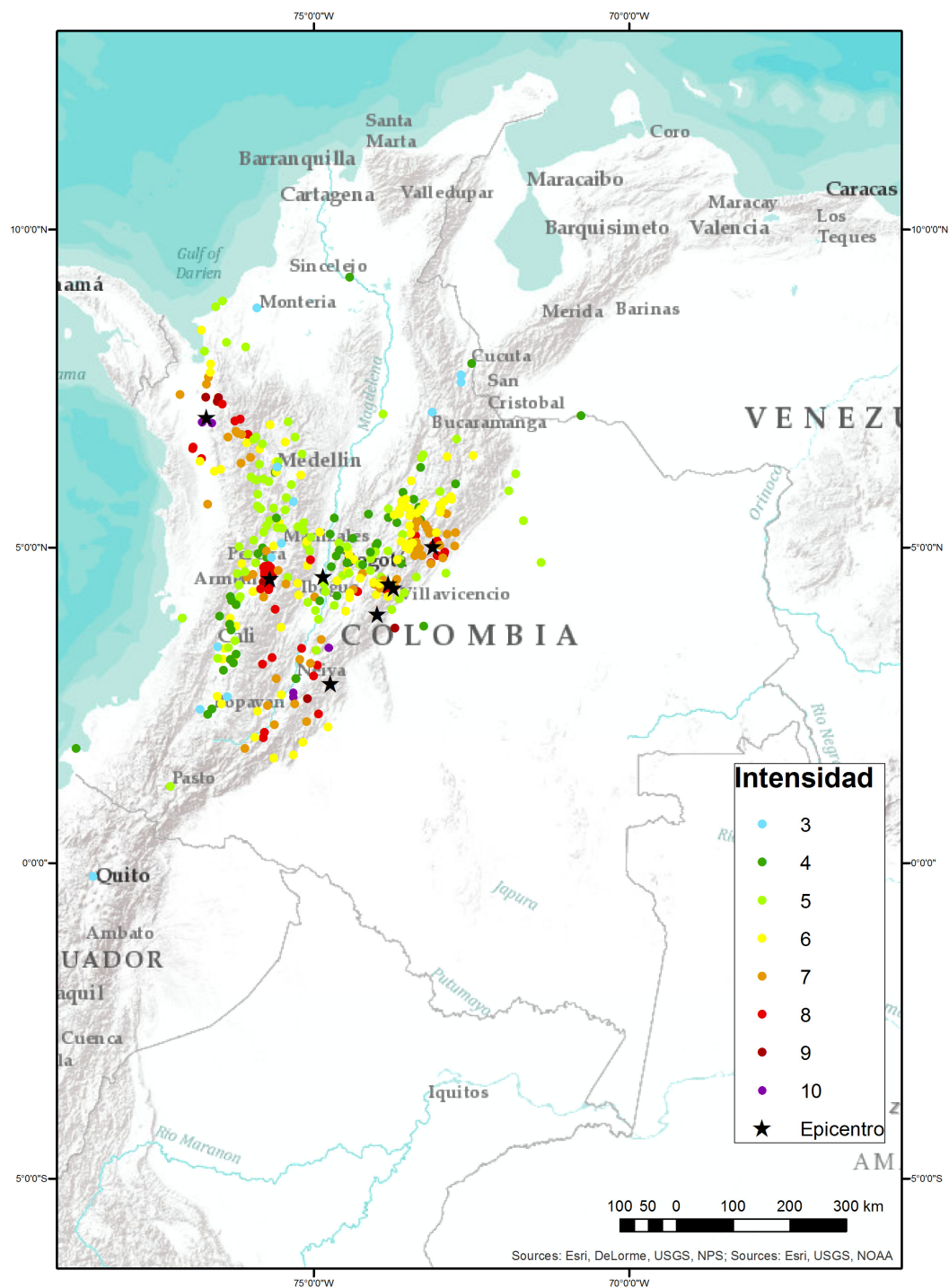


Figura 11. Datos macrosísmicos y epicentros de ocho terremotos usados en la calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica para Colombia

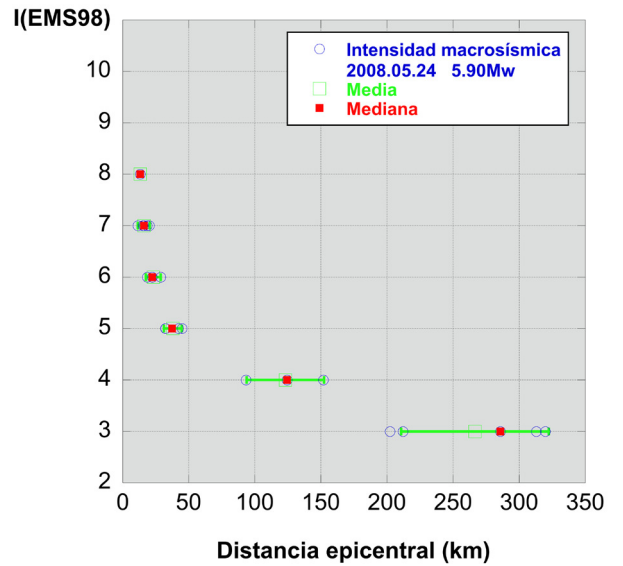
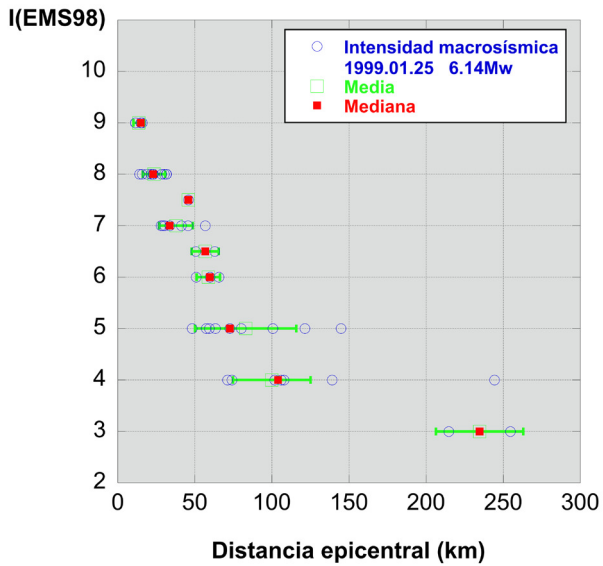
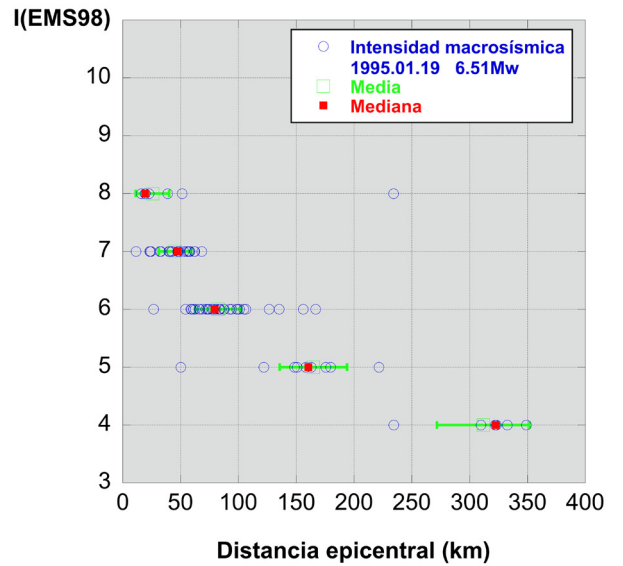
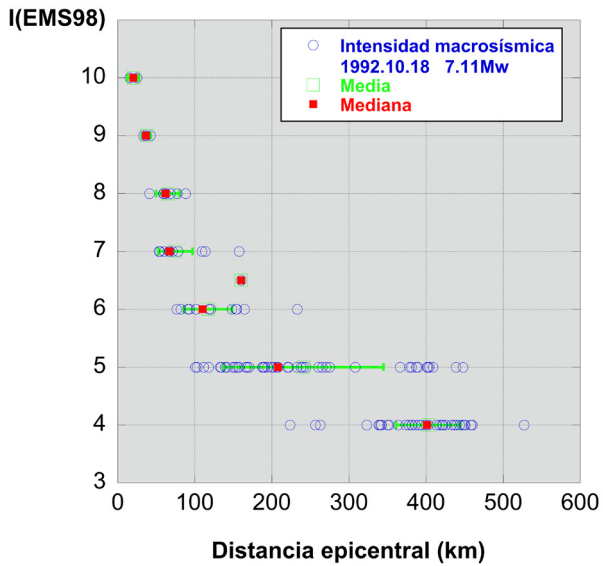


Figura 12. Intensidad vs distancia hipocentral de los puntos de intensidad macrosísmica para terremotos usados en el proceso de calibración del modelo de atenuación macrosísmica para Colombia.

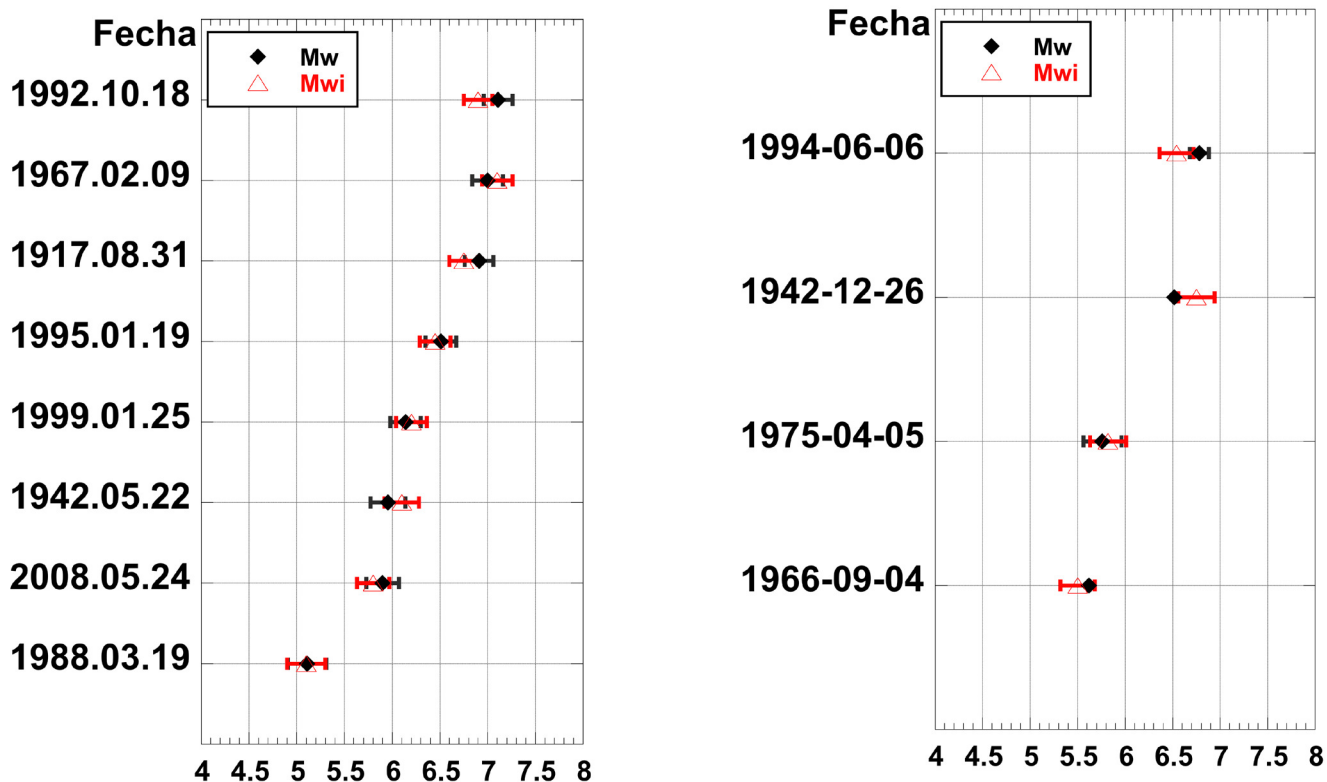


Figura 13. Valores instrumentales (color negro) y calculados (color rojo) de la magnitud Mw y sus correspondientes barras de incertidumbre. a) Eventos usados en el proceso de calibración; b) eventos usados en el proceso de validación

Tabla 8. Terremotos seleccionados para la validación del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia

N	Fecha	Área	Epicentro		Fuente Epicentro	Mw	Error Mw	Fuente Mw / o Transf.	Profundidad Focal	Fuente Profundidad	I Max (EMS98) (SGC013)	N MDP (SGC013)
			Lat	Long								
1	1942.12.26	Lorica	9.190	-75.810	SGC013	6.52	-	¹ SCORD	35	SGC (2014)	8	12
2	1966.09.04	Choachí	4.483	-74.115	SGC013	5.62	-	² SCORD	4.6	SGC (2014)	7	17
3	1975.04.05	Cartagena	10.147	-75.557	ISCGE015	5.76	0.20	ISCGE015	45	ISC-GEM	6	14
4	1994.06.06	Paez	2.889	-75.949	ISCGE015	6.78	0.10	ISCGE015	10	ISC-GEM	8	34

Magnitudes transformadas a Mw usando SCORD (Scordilis, 2006) a partir de: ¹M_s=6.50 (CERESIS, 1995), ²M_s=5.62 (SGC, 2013)

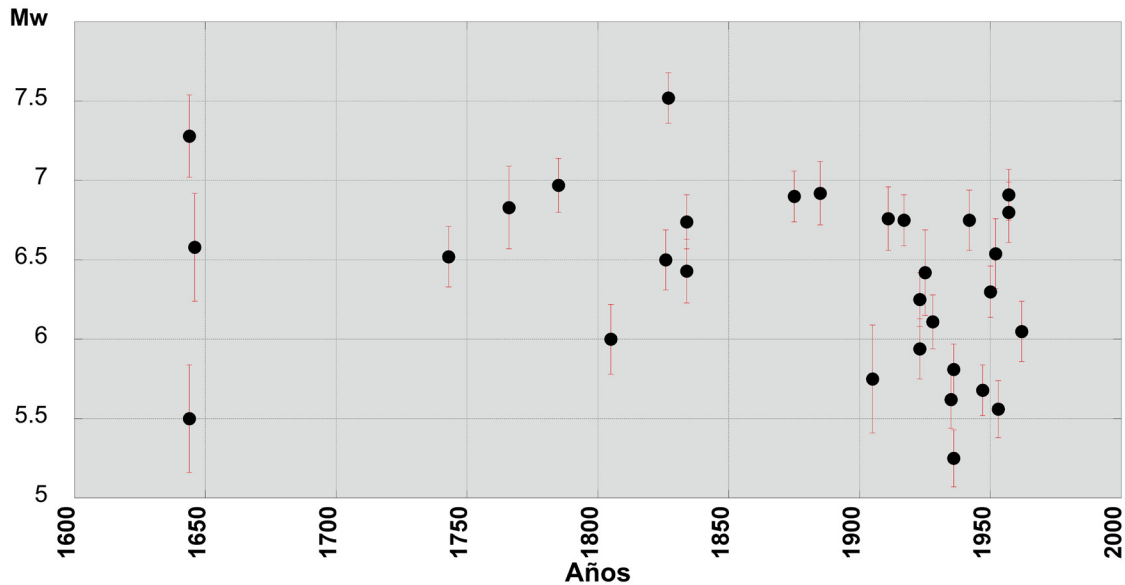


Figura 14. Magnitud Mw calculada a partir de solo datos de intensidad macrosísmica para 29 terremotos históricos de Colombia del periodo 1644-1963

El modelo (2) se aplicó para evaluar los parámetros de 29 terremotos históricos de Colombia, del periodo 1644-1963, cuya historia sísmica es visualizada en la Figura 14 y son incorporados en la presente compilación del catálogo de terremotos para América del Sur.

5.2 Mw como función lineal de la intensidad a partir de relaciones disponibles en la literatura

El catálogo CERESIS (1995) enlista 5046 eventos que no tienen asignación de ningún tipo de magnitud, pero muchos de ellos tienen al menos un punto de intensidad macrosísmica. Dicha información macrosísmica puede ser usada para evaluar la magnitud el evento aplicando relaciones entre la magnitud (Mw) y la intensidad máxima observada (Imax).

La estrategia aplicada, para eventos de Venezuela y Ecuador, fue evaluar la magnitud (Mw) como función de la Imax, usando aproximaciones de las relaciones de atenuación propuestos por *Palme et al.* (2005) y *Beauval et al.* (2010). A partir de dichas relaciones de atenuación, funciones lineales entre la magnitud y la intensidad máxima se obtuvieron aplicando la condición física que en las vecindades del epicentro ($x=0$ km), la intensidad alcanza su valor máximo (Tabla 9).

Las ecuaciones obtenidas para Venezuela y Ecuador se aplicaron para asignar la magnitud (Mw) a 5 y 72 terremotos, respectivamente. Por razones de homogeneidad (*Palme et al.*, 2005; *Beauval et al.*, 2010) la incertidumbre final de Mw es asignada igual a 0.60 unidad, que corresponde a la media del nivel de confianza del 95% a un punto de intensidad macrosísmica siguiendo el método de *Bakun y Wentworth* (1997, 1999).

Tabla 9. Magnitud como función de I_{max} a partir de relaciones de atenuación de la intensidad macrosísmica

País	Fuente	Relación de atenuación de la intensidad macrosísmica	Mw = f(I _{max}) (para distancia epicentral igual a cero)
VE	Palme <i>et al.</i> , (2005)	$I = -2.2237 + 1.6684 M_w - 0.041214x$ x es la distancia epicentral en km y $x \leq 120\text{km}$	$M_w = 1.3328 + 0.5993 I_{\text{max}}$
EC	Beauval <i>et al.</i> , (2010)	$I = -0.85 + 2.41 M_w - 5.39 \log \Delta_h$ Δ_h es la distancia hipocentral en km $\Delta_h = (x^2 + h^2)^{0.5}$ h es la profundidad focal fija a 10km	$M_w = 2.58921 + 0.41494 I_{\text{max}}$

5.3 Magnitud como función lineal de la intensidad a partir de nuevos modelos

En la literatura no están disponibles relaciones entre la intensidad macrosísmica y la Mw para Colombia, Perú, Chile, Bolivia y Argentina, que puedan ser aplicadas para eventos que no tienen Mw asignada pero que tienen disponible poca información macrosísmica. En el presente estudio son calibradas cuatro relaciones lineales $M_w = f(I_{\text{max}})$ para los cinco países citados.

La relación lineal para el área del Perú y Chile, se obtuvo utilizando 42 terremotos, cuyos valores de Mw e intensidad máxima se tomaron de CERESIS (1995), ISC-GEM (2015) y de los boletines sísmicos en línea del IGP (Instituto Geofísico del Perú, 2015). El conjunto de 42 eventos cubre un rango amplio de magnitud Mw (5.42 - 8.19) y de intensidad máxima [5 – 11]. Se realizó el mismo procedimiento para el área de Colombia, Bolivia y Argentina. Las fuentes de datos y los resultados de regresiones se muestran en la Tabla 10.

Por razones de homogeneidad, para los eventos donde se aplicaron las regresiones obtenidas y descritas en Tabla 10, la incertidumbre final de Mw es asignada igual a 0.60 unidad (Bakun y Wentworth, 1997).

6. Resultados y conclusiones

Un umbral de magnitud Mw inferior es definido a 5.0 Mw (-0.2) con incertidumbre de hasta 4.8 para los terremotos en las áreas de la región andina; para Brasil no es definido un umbral más bajo porque los eventos sísmicos son de magnitudes pequeñas ($M_w < 4.8$) y no pertenecen a la región andina. De esta manera se han obtenido 2556 terremotos homogéneos en magnitud Mw, cuya distribución de epicentros por fuentes de datos se presenta en la Figura 15. En dicha figura se observa que, a lo largo del continente, la mayor contribución de los datos de entrada es dada por CERESIS (1995). Para los países septentrionales (Venezuela, Colombia y Ecuador), los estudios recientes de terremotos en los valles interandinos constituyen la principal fuente de datos de entrada. Se evidencia la contribución de los catálogos nacionales principalmente en Bolivia y Chile, así como las recientes actualizaciones en Ecuador, Colombia y Venezuela. Para el Perú, Brasil y Argentina la principal fuente de parámetros de terremotos históricos siguen siendo los datos del CERESIS. El correspondiente inventario del número de entradas efectivo por fuentes está descrito en la Tabla 11.

Luego de haber homogeneizado la magnitud a 2556 terremotos, por primera vez es posible visualizar la sismicidad en términos de magnitud momento para América del Sur en el periodo

Tabla 10. Relaciones Mw/Imax obtenidas para el Peru-Chile, Colombia, Bolivia y Argentina

Area	Fuente de datos	Mw=f(Imax)	No. de terremotos	Rango de Mw	Rango de Intensidad	Periodo
BO	CERES995 Bolivian Catalogue	$Mw = 3.9438+0.292 I_{max}$	18	4.94-6.47	4-8	1650-1928
PE CL	CERES995 ISCGE015 *IGP015	$Mw = 4.513+0.286 I_{max}$	42	5.42-8.19	5-11	1906-2014
CO	SGC013 ISCGE015 *RSNC	$Mw = 2.761+0.425 I_{max}$	18	4.30-7.11	4-10	1917-2015
AR	CERES995 ISCGE015 INPRES015	$Mw = 2.901+0.4287 I_{max}$	24	4.86-7.45	5-9	1903-2002

*IGP= Instituto Geofísico del Perú (2015); *RSNC: Red Sismológica Nacional de Colombia (2015)

Tabla 11. Fuente de datos, número efectivo de entradas y distribución del tamaño del terremoto en la fuente datos

Fuente de datos	N de entradas	Mw	Ms	m _b	I
CERESIS (1985)	12		1		11
CERESIS (1995)	1955	4	841	691	419
Engdahl and V. (2002)	47	4	28	15	
Storchaket al. (2013; 2015)	214	214			
Catálogos Nacionales	241	1	140	81	19
Estudios	87	79	4		4
Total	2556	302	1014	787	453

1500-1963 según la Figura 16. También se visualiza la sismicidad del continente por intervalos de 100 años, que refleja diferencias en cuanto a la historia sísmica distribuida geográficamente en sus respectivos periodos, desde la Conquista y Colonia (Figura 17a – 17d) hasta llegar al siglo XX, que está caracterizado por la gran influencia de la era instrumental (Figura 17e).

En la Figura 18 se visualiza la historia sísmica de América del Sur según la magnitud momento ($M_w \geq 5.0$), siempre para el periodo (1500-1963); se observa como el vacío de información, del periodo de la Conquista, Colonia e Independencia de la Corona Española, se enriquece a medida que se acerca el siglo XX. La Figura 19 muestra una comparación entre el catálogo desarrollado en el presente estudio y el propuesto por ISC-

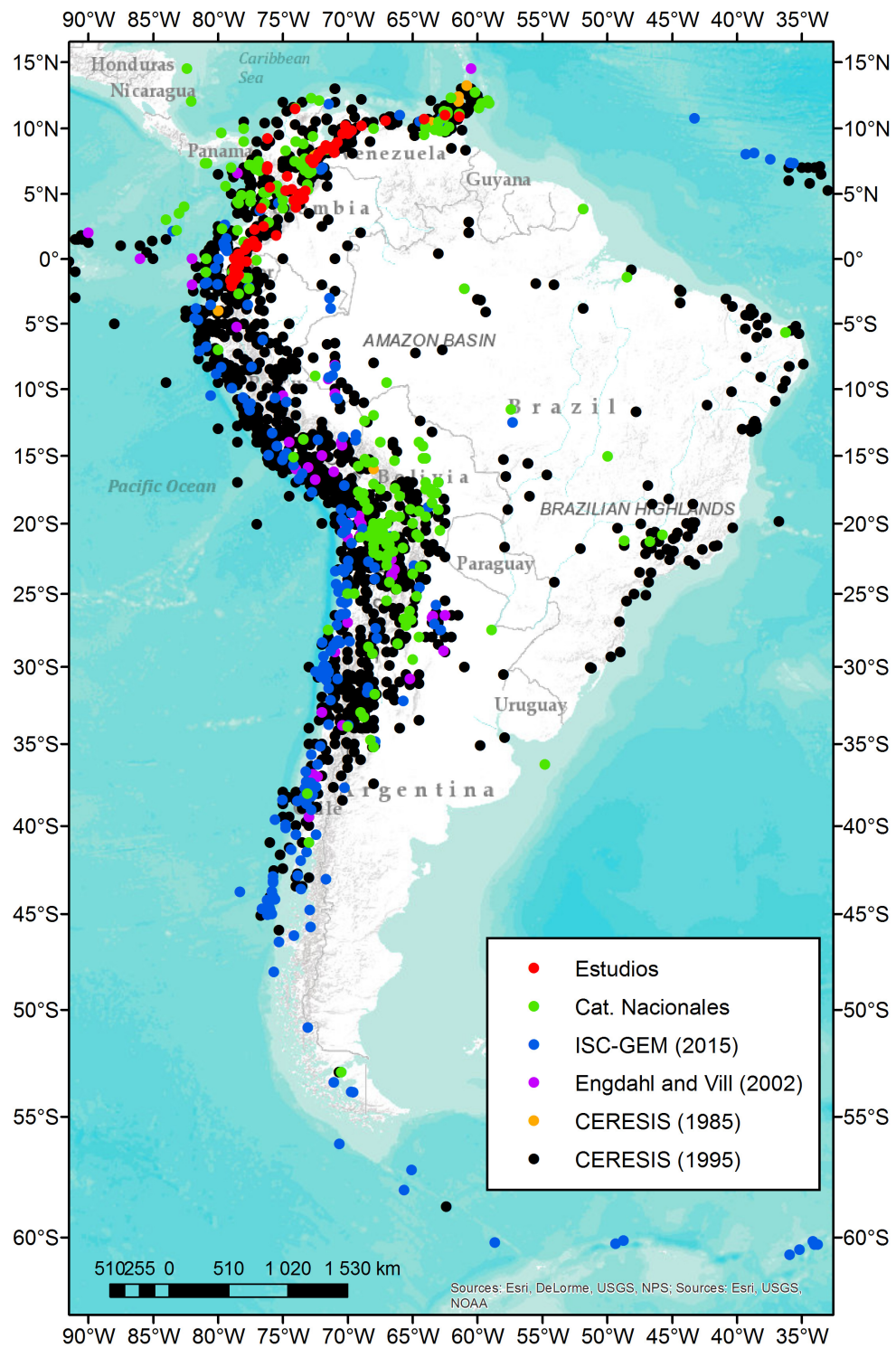


Figura 15. Distribución de epicentros por fuente de datos

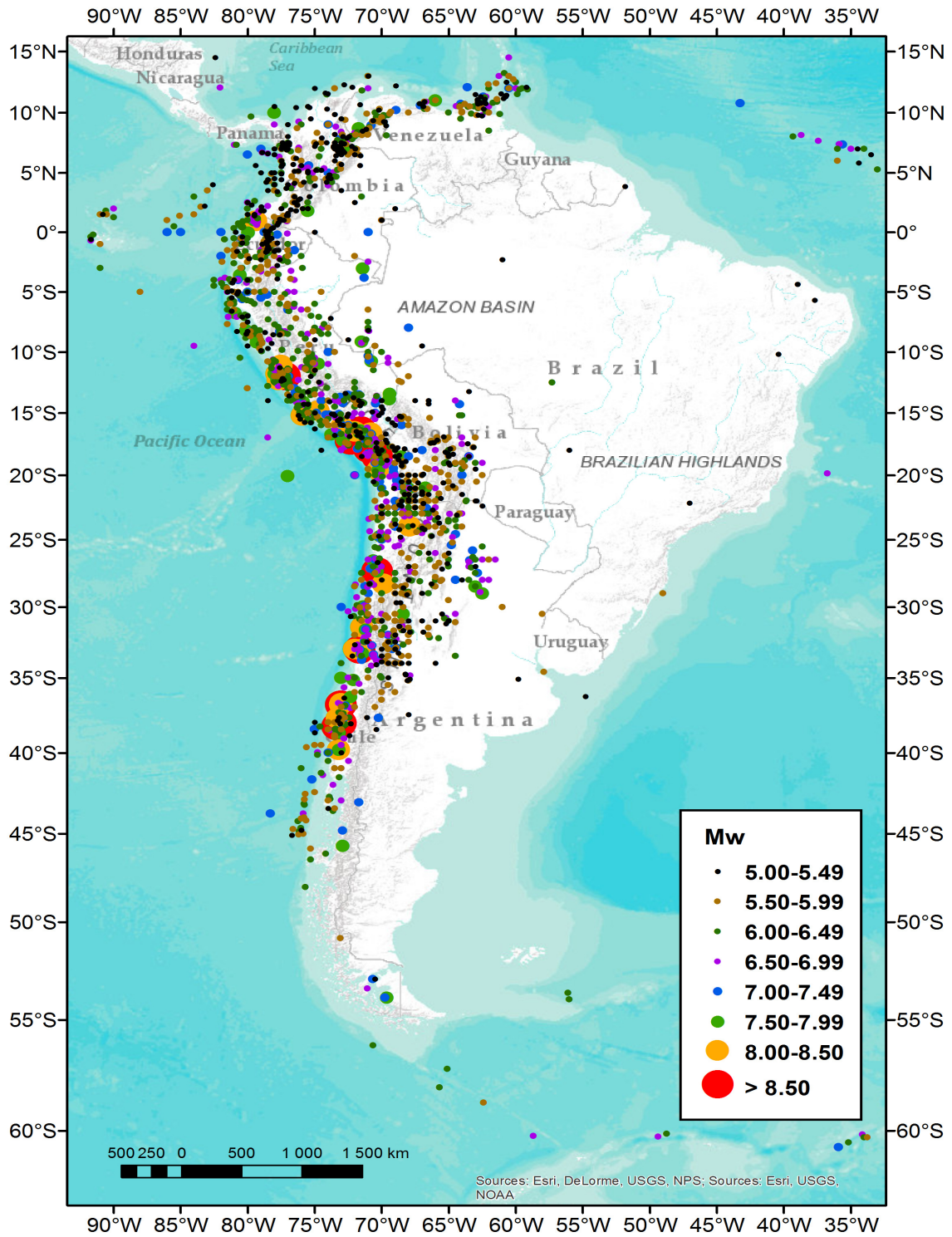


Figura 16. Distribución de epicentros por clases de Mw ($M_w \geq 5.0$)

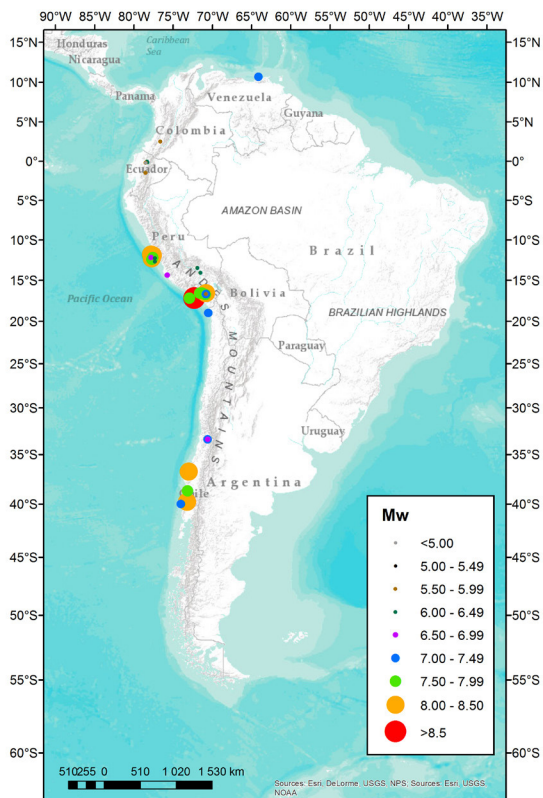


Figura 17a. 1500 - 1600

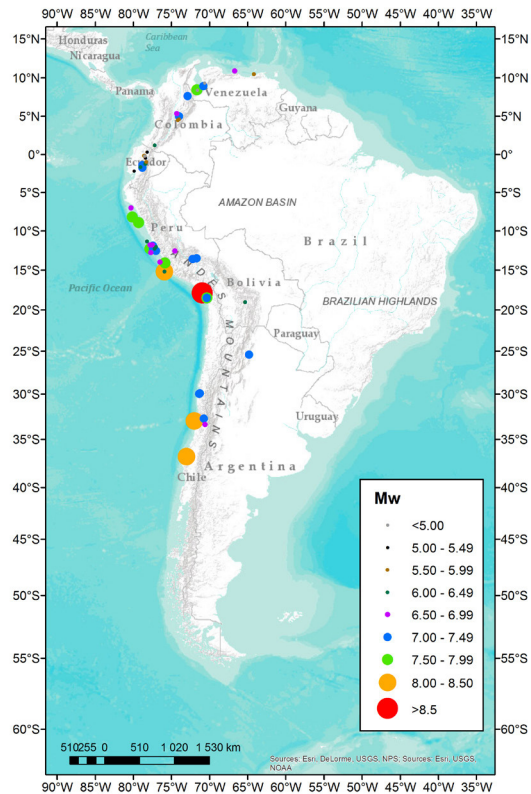


Figura 17b. 1601 - 1700

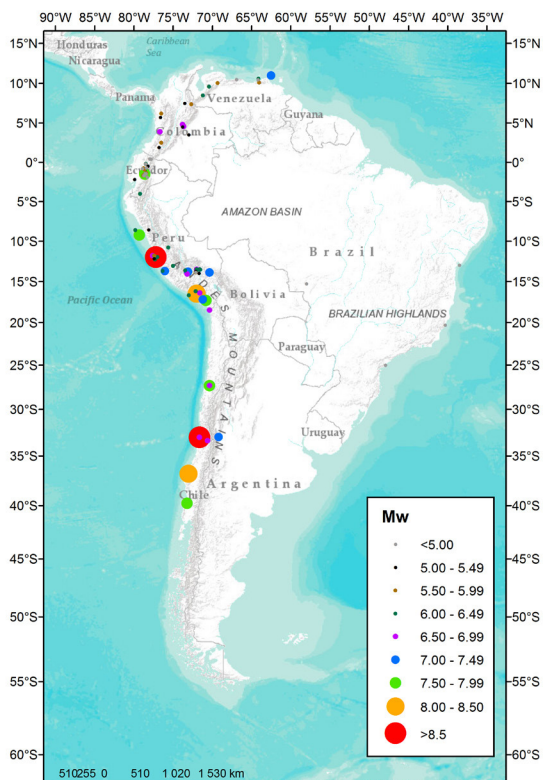


Figura 17c. 1701 - 1800

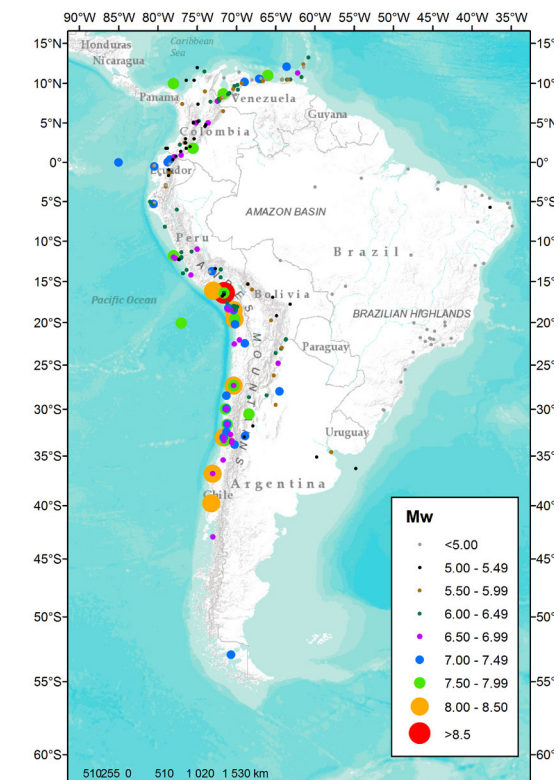


Figura 17d. 1801 - 1900

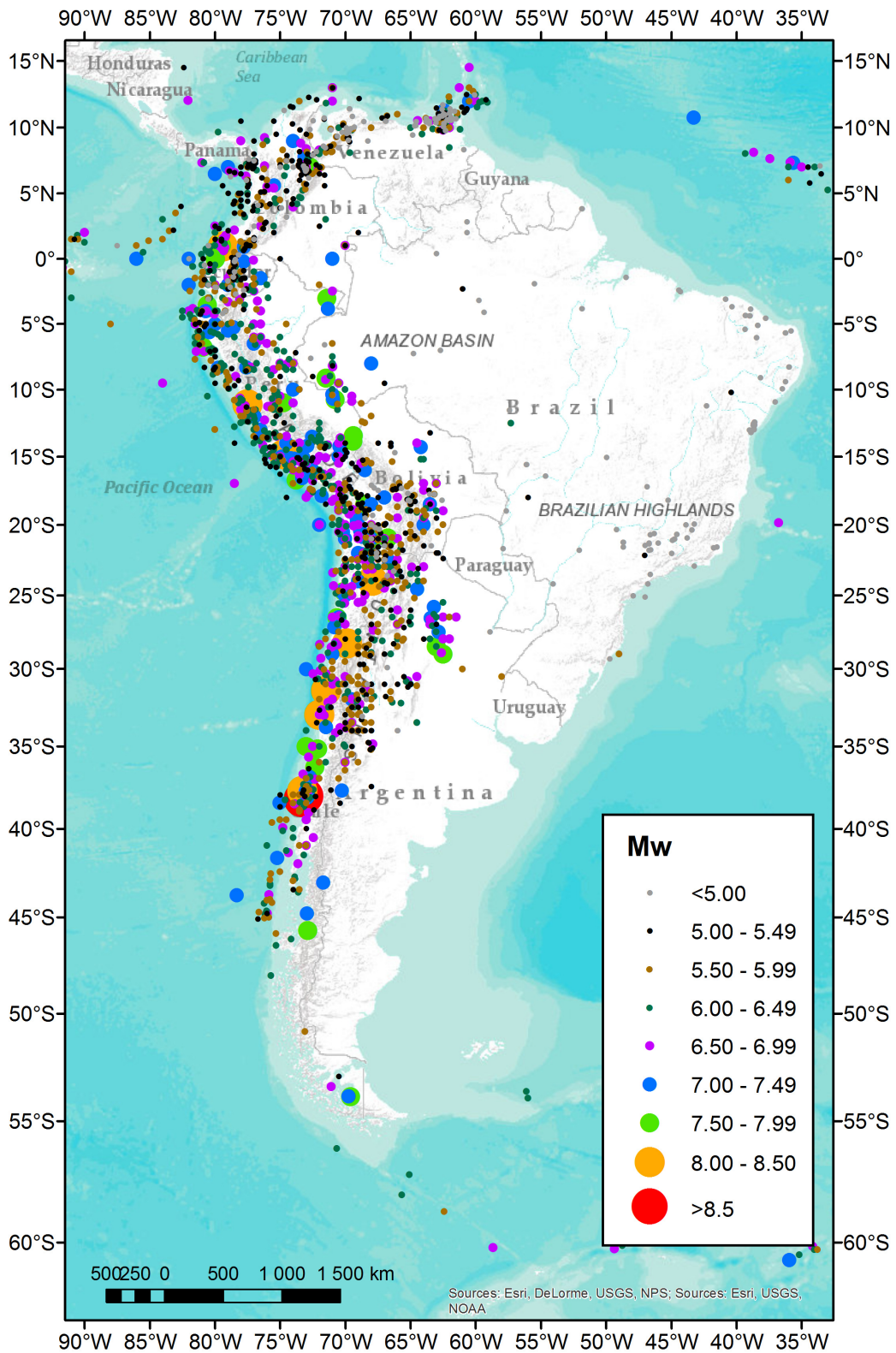


Figura 17d. 1901 - 1963)

Figura 17. Distribución de epicentros por clases de M_w ($M_w \geq 5.0$)

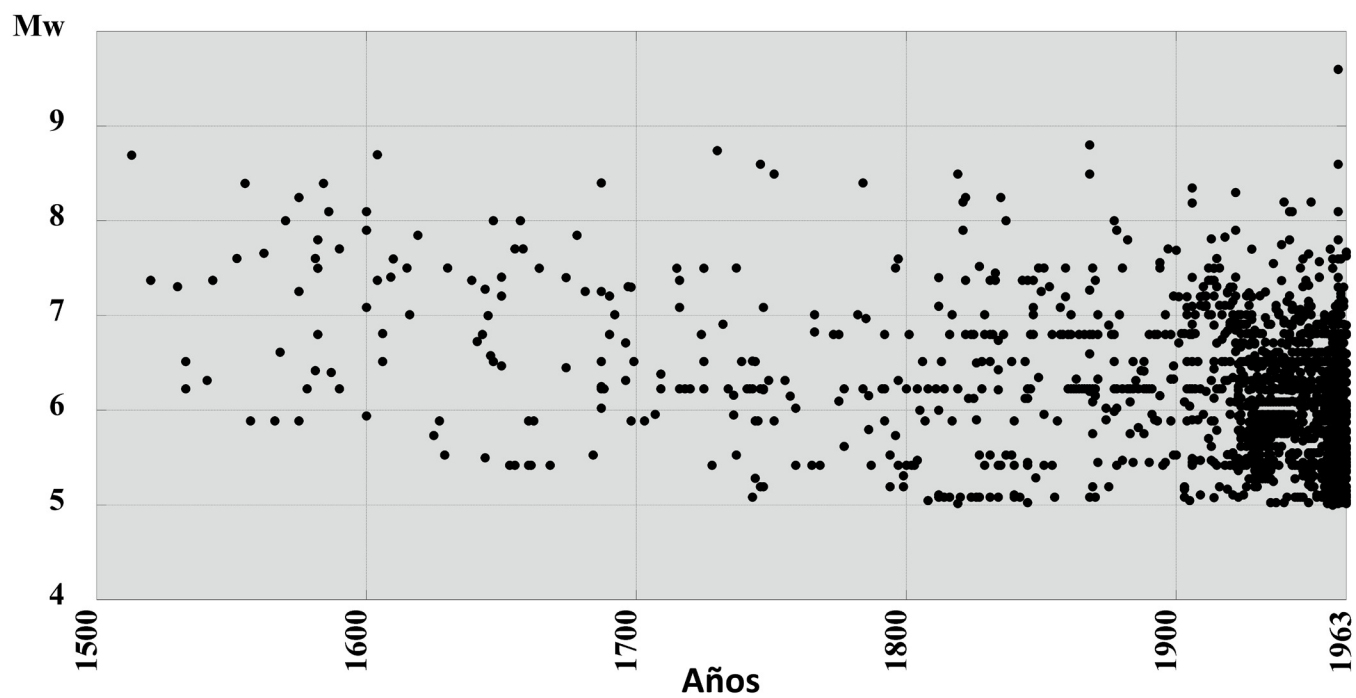


Figura 18 -Historia de terremotos antes de 1964 ($M_w \geq 5.0$) de América del Sur

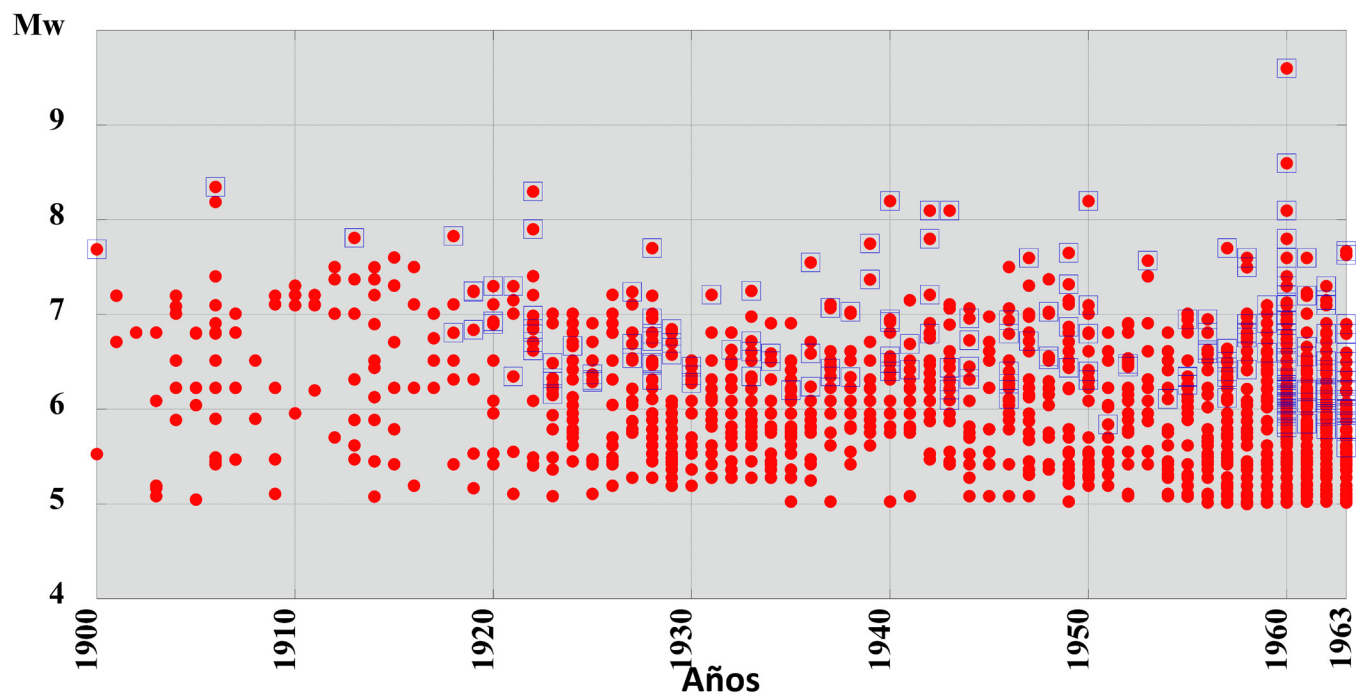


Figura 19 - Comparación del presente catálogo (círculos rojos) y del catálogo del ISC-GEM (1900-1963)

GEM (2015) para eventos entre 1900 y 1963. En tal comparación se observa una gran mejoría que el presente trabajo introduce en la cobertura de eventos históricos en América del Sur de inicios de 1900.

Aunque es asignada la magnitud M_w a 2556 terremotos, aún se encuentran 1766 eventos con un tamaño por debajo del umbral adoptado ($M_w < 5.0$), ya que para la mayoría de ellos el cálculo de la magnitud M_w usando las regresiones propuestas en la Tabla 10 no puede ser aplicado, pues están fuera del rango de confiabilidad.

Además, hay 227 eventos que no tienen de ningún tamaño es decir no tienen asignados en las fuentes de datos ningún tipo de magnitud, ni tampoco información de intensidad macrosísmica, significando capítulos abiertos en la investigación sobre sismología histórica en América del Sur.

El catálogo se encuentra disponible en línea en: https://sara.openquake.org/hazard_rt4

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la fundación “Global Earthquake Model” por promover y financiar la iniciativa del programa regional en el cual se desarrollo y actualizó el Catálogo de Terremotos para América del Sur (pre 1964) presentado en el presente artículo. Agradecimientos al “Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Milano” y al Centro Regional de Sismología para América del Sur CERESIS por apoyar el presente trabajo. También queremos agradecer a los árbitros, Alejandra Núñez y Héctor González Huízar, por las sugerencias constructivas al desarrollo del presente artículo.

Bibliografía

- Abe, K., 1979. Size of Great Earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research*, 84, B4, 1561-1568.
- Abe, K., 1981. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 27, 72-92.
- Abe, K., and Noguchi, S., 1983. Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1898-1917. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 32, 45-59.
- Albini, P., Musson, R.M.W., Rovida, A., Locati, M., Gómez-Capera, A.A., Viganó, D., 2014. The Global Earthquake History. *Earthquake Spectra*, 30, 2, 607-627, Earthquake Engineering Research Institute.
- Alvarado, P., and Beck, S., 2006. Source characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (M_w 7.0) and 11 June 1952 (M_w 6.8). *Earth and Planetary Science Letters* 243, 615-631.
- Alvarado, P., Barrientos, S., Saez, M., Astroza, M., Beck, S., 2009. Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 26-36.
- Assumpção, M., Ferreira, J., Barros, L., Bezerra, H., França, G.S., Barbosa, J.R., Menezes, E., Carlos Ribotta, L., Pirchiner, M., Nascimento, A., and Dourado, J.C., 2014. Intraplate seismicity in Brazil. In *Intraplate Earthquakes*, pages 50–71, Cambridge University Press, ISBN 9781139628921, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139628921.004>.

- Audemard, F.M., 1999. Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la Falla El Pilar, Venezuela Nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos. Mem. VI Congreso Venez. Sismología e Ingeniería Sísmica (CD-ROM), Mérida, Venezuela.
- Bakun, W.H., and Wentworth, C.M., 1997. Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, Bull. Seismol. Soc. Am., 87, 1502–1521.
- Bakun, W.H., and Wentworth, C.M., 1999. Erratum to Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 557.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W.H., Egred, J., Alvarado, A., and Singaicho, J.C., 2010. Locations and magnitudes of historical earthquake in the Sierra of Ecuador (1587-1996). Geoph. Journ. Intern., 181,1613-1633.
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., and Vaca, D., 2013. An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. Bull. Seism. Soc. Am. 103, 2A,773-786.
- Berrocal, J., Assumpção, M., Antezana, R., Dias Neto, C.M., Ortega, R., França, H., Veloso, J.A.V., 1984. Sismicidade do Brasil. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo e Comissão Nacional de Energia Nuclear. Primeira edição. Composto na Editora Esperança, São Paulo, 320p.
- Catálogo Sísmico Brasileiro, 2012. <http://goo.gl/INTtVk> (<http://moho.iag.usp.br/rq/event>)
- CERESIS, Centro Regional de Sismología para América del Sur, 1985. Earthquake Mitigation Program in the Andean Region (SISRA Project), Lima, 14 vols.
- CERESIS, Centro Regional de Sismología para América del Sur, 1995. Catalogue for South America and the Caribbean.
- Choy, J.E., Palme, C., Guada, C., Morandi, M., and 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, 1, 241-255.
- Cisternas, M., 2012. El terremoto de Chile central de 1647 como un evento intra-placa. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, Libro de Resúmenes, 1037-1039.
- Contreras Luarte, V.A., 2009. Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile, 204p.
- Dimaté, C., Drake, L., Yepes, H., Ocola, L., Rendon, H., Grunthal, G., and Giardini, D., 1999. Seismic hazard assessment in the Northern Andes (Piloto Project). Annals of Geophysics, 42(6), 1039-1055.
- Dimaté, C., Rivera, L., and Cisternas, A. 2005. Re-visiting large historical earthquakes in the Colombian Eastern Cordillera, J. Seismol., 9, 1-22.
- Dorbath, A., Cisternas, A., and Dorbath, C., 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, Bull. Seism. Soc. Am., 80(3), 551-576.
- Dorel, J., 1981. Seismicity and seismic gap in the Lesser Antilles arc and earthquake hazard in Guadeloupe, Geophys. J. R. Astron. Soc., 67, 679–695.
- Ecuador, 2014. Catálogo de terremotos del Ecuador (archivo provisorio al task4), developed by Beauval et al. (2013).

- Egred, J., 2004. El terremoto de Riobamba del 4 de febrero de 1797. En *Investigaciones en Geociencias*, vol. 1, pp. 67-86, eds Alvarado A, Garcia-Aristizabal A, Mothes P., Segovia M, IRD-Instituto Geofísico, Corporación Editora Nacional, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.
- Engdahl, E.R., and Villaseñor, A., 2002. Global Seismicity: 1900–1999, In: W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Part A, Chapter 41, pp. 665–690. (Data from <http://earthquake.usgs.gov/data/centennial/>)
- Espinosa Baquero, A., 2003. *Historia Sísmica de Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad del Quindío, Bogotá, Colombia. CD-ROM.
- Espinosa Baquero, A., Gómez Capera, A.A., and Salcedo Hurtado, E. de J., 2004. State-of-the art of the Historical Seismology in Colombia. *Annals of Geophysics*, 47, 2/3, 437-449, ISSN: 2037-416X.
- FUNVISIS, 2014. Catálogo de terremotos de Venezuela, (in progress) archivo provisorio al task4.
- Garcia, J., Weatherill, G., Pagani, M., Rodriguez M., Poggi V., and the SARA Hazard Working Group, 2017. Building an open seismic hazard model for South America: the SARA-PSHA model. In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, January 2017, paper n. 2154
- Gasperini, P., Bernardini, F., Valensise, G., and Boschi, E., 1999. Defining seismogenic sources from historical felt reports, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 94–110.
- Gasperini, P., Vannucci, G., Tripone, D., and Boschi, E., 2010. The location and sizing of historical earthquakes using attenuation of macroseismic intensity with distance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2035–2066.
- GEH, Global Earthquake History, 2013. The GEM Global Historical Earthquake Catalogue (1000-1903). <http://www.globalquakemodel.org/what/global-projects/historical-catalogue/>
- Giardini, D., 1999. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)–1992/1999. *Annals of Geophysics*, 42(6), 957-974.
- Giesecke, A., Gómez Capera, A.A., Leschiutta, I., Migliorini, E., and Rodriguez Valverde, L., 2004. The CERESIS earthquake catalogue and database of the Andean Region: Background, characteristics and examples of use. *Annals of Geophysics*, 47, 2/3, 421-435.
- Gómez-Capera, A.A., Cifuentes, H., Sarabia, A., Bindi, D., Choy, J., Galan, R., Pirchiner, M., Rodriguez, L.M., Sanchez, A., Salcedo Hurtado, E., 2014a. Parámetros del terremoto de Cúcuta del 1875 a partir de intensidades macrosísmicas. IASPEI-LASCS (Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología) Regional Assembly 2014 July 23-25, Bogotá Colombia, Proc. in Earth. Sci. Res. J. Vol. 18 Special Issue, p. 199 (July. 2014).
- Gómez-Capera, A.A., Salcedo-Hurtado, E. de J, Bindi, D., Choy, J.E., García Peláez, J., 2014b. Localización y magnitud del terremoto del 1785 en Colombia a partir de intensidades macrosísmicas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38,147, 206-217.

- Gómez-Capera, A.A., Stucchi, M., with the collaboration of Arcila, M., Bufaliza, M., Choy, J., Leyton, L., Pirchiner, M., Rendon, H., Rodriguez Valverde, L., Sarabia, A.M., Tavera, H., and Yepes, H., 2016. The T4 working catalogue before 1964 of the SARA project. The South America Risk Assessment – SARA, Global Earthquake Model (GEM), 38p.
- Gómez-Capera, A.A., and Leschiutta, I., 2004. Determining the parameters of earthquake sources in South America from macroseismic intensity data (CERESIS database). Earth Sciences Research Journal, 8, 1, 10-18, ISSN. 1794-6190.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (second paper). Bull. Seis. Soc. Am., 46-2, 105-145.
- INPRES, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 2015. Terremotos históricos de la República Argentina. <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historicos.php>.
- Instituto Geofísico del Perú, 2015. Boletines sísmicos, <http://www.igp.gob.pe/portal/>
- ISC-GEM, 2015. V 2.0 of the ISC-GEM Catalogue, http://www.isc.ac.uk/iscgem/update_log/
- Kingland, J., Torres R.A., y Inglessis P., 2008. Ecuación de atenuación de intensidad macrosísmica y mapa de isosistas para el gran terremoto de los Andes de 1894. IMME, 46, 1, 1-22.
- Leyton, F., Ruiz, S., and Sepúlveda, A.A., 2009. Preliminary re-evaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: from Arica to Taitao Peninsula. Adv. Geosci., 22, 147-153.
- Lolli, B., Gasperini, P. and Vannucci G., 2014. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (mb and Ms) and moment magnitude (Mw) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. Geophys. J. Int. (2014), 199, 805-828.
- Lomnitz, C., 2004. Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. Seismological Research Letters, 75, 3, 368-378.
- Mocquet, A., 2007. Analysis and interpretation of the October 21, 1766 earthquake in the Southeastern Caribbean, J. Seismol., 11, 381-403.
- Observatorio San Calixto, 2013. Catálogo OSC revisado del 1650 al 2001 final, archivo provisorio al task4.
- Palme, C., Choy, J., y Guada, C., 2009. Wilhalm Sievers y el Terremoto del 29-oct-1900 reflexiones preliminares, V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica y VI Simposio Venezolano de Historia de las Geociencias, 25-28 de Junio, Mérida, 145-150.
- Palme de Osechas, C., Morandi, M., and 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.
- Red Sismológica Nacional de Colombia, 2015. Boletines de sismicidad, catálogo de sismicidad instrumental del Servicio Geológico Colombiano, <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/boletines-de-sismicidad>
- Rengifo, M., y Lafaille, J., 2000. Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. Acta Científica Venezolana, 51, 160-175.

- Salcedo Hurtado, E. de J., y Castaño A.N., 2011. Reevaluación macrosísmica del terremoto del 12 de julio de 1785 en Colombia, *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*, 33, 2, 15-32.
- Salcedo Hurtado, E. de J., y Gómez-Capera, A.A., 2013. Estudio macrosísmico del terremoto del 18 octubre del 1743 en la región central de Colombia, *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga* 35, 1, 111-313.
- Salcedo Hurtado, E. de J., Romero Vergara, M.D., Vallejo Chocué, M.A., 2007. Contribución al análisis macrosísmico del terremoto del 7 de junio de 1925: principales efectos en la ciudad de Cali. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31, 379-394.
- Sarabia, A.M., y Cifuentes, H., 2011. Sismicidad Histórica de Colombia: Estudios macrosísmicos 1644-2008 (en línea), Bogotá. <http://sish.sgc.gov.co/visor/> (consulta 11.10 2019).
- Sarabia Gómez, A.M., Cifuentes Avendaño, H.G., y Robertson, K., 2010. Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y 1917 en el centro de Colombia, *Revista Colombiana de Geografía, Bogotá*, 19, 153-162.
- Scordilis, E.M., 2006. Empirical global relations converting Ms and mb to moment magnitude, *J. Seismol*, 10, 225- 236.
- Servicio Geológico Colombiano, SGC, 2013. Sismicidad Histórica de Colombia. Disponible en: <http://sish.sgc.gov.co/visor/> (consulta 11.10 2019)
- Servicio Geológico Colombiano, SGC, 2014. Catálogo de terremotos de Colombia; archivo provisorio al task4.
- Sismicité historique de la France, Antilles-Guyane-Mer des Caraïbes, *SisFrance-Antilles*, 2015. histoire et caractéristiques des séismes ressentis aux Antilles françaises et dans l'archipel des Caraïbes, <http://www.sisfrance.net/Antilles/index.asp>
- Sismología Histórica de Venezuela, 2011. At the Universidad de Los Andes, <http://sismicidad.ciens.ula.ve/>
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E.R., Harris, J., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., and Bormann, P., 2013. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), *Seism. Res. Lett.*, 84(5), 810-815.
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Harris, J., Engdahl, E.R., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., Bormann, P., and Ferrari, G., 2012. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (19009-2009), Final Scientific Report, 99p. Consulta: 2014.02.15, <http://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/instrumental-catalogue>.
- Tanner, J.G., and Shepherd, J.B., 1997. Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, *Seismic Hazard in Latin America and the Caribbean*, vol. 1. Final Report to the International Development Research Centre, Ottawa, Canada, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Mexico, D.F., 142 pp.
- Tavera, H. ed. 2001. Catálogo Sísmico del Perú 1471–1982, Versión Revisada y Actualizada, Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología, Lima, 547p. At: <http://www.igp.gob.pe/> (consulta 14.12.2015).
- Tello, G., y Pérez, I. 2005. El Terremoto de 1894: Investigación Histórica. *INSUGEO, Serie Correlación Geológica*, 19, 23-40, Argentina.

Udías, A., Madariaga, R., Buforn, E., Muñoz, D., and Ros, M., 2012. The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from Contemporary Documents, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(4), 1639–1653.

Recibido: 2 de septiembre de 2019

Corregido por el autor: 17 de febrero de 2020

Aceptación: 23 de marzo de 2020