

Relaciones empíricas entre las magnitudes mb/Ms, Ms/Mw y mb/Mc para el área de Cuba, Jamaica y La Española

Empirical relations between magnitudes mb/Ms, Ms/Mw and mb/Mc in the area of Cuba, Jamaica and Hispaniola

Madelin Villalón-Semanat¹, Raúl Palau-Clares¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba.

Resumen

Con el propósito de homogenizar un catálogo de terremotos se calcularon relaciones empíricas entre las escalas de magnitud reportadas por agencias regionales y el Servicio Sismológico Cubano para los terremotos registrados en el área de Cuba, Jamaica y La Española. Fueron compilados catálogos en el período 1973-2012, con una muestra de 8 179 terremotos, con magnitudes entre 3 y 7. La diferencia promedio entre las magnitudes de las relaciones obtenidas está entre 0,13 y 0,46 y los factores de correlación entre 0,58 y 0,94, siendo desechados los más bajos valores de estos últimos. Estas ecuaciones son muy similares a algunas relaciones globales halladas en estudios anteriores. Las relaciones de correlación aquí encontradas podrán ser aplicadas en las investigaciones de peligrosidad sísmica en toda la región de estudio, exceptuando las de la magnitud por coda (Mc) de la red cubana que por sus notables diferencias impiden usarlas para homogenizar el catálogo.

Palabras clave: relaciones de correlación; regresión lineal; escalas de magnitud; servicio sismológico nacional cubano.

Abstract

Empirical relationships among different magnitude scales reported by regional sources and the Cuban Seismological Service for earthquakes in the area of Cuba, Jamaica and Hispaniola Islands are calculated for catalog

homogenization purposes. Catalogs from 1973 to 2012 with a sample set of 8 179 events in the magnitude range 3–7 were compiled and correlated using the Simple Linear Regression method. The average difference between the magnitudes ranged from 0,13 to 0,46 and the correlation factors from 0,58 to 0,94, been rejected the lowest values of the latter. These equations are very similar to some of the global relations found in previous studies. These relationships can be used for catalog homogenization in seismic hazard in the study region with the exception of the relation involving the Coda magnitude (M_c) of the Cuban Network.

Keywords: empirical relations; linear regression; magnitude scales; Cuban seismological service.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de una escala de magnitud es fundamental para cuantificar el tamaño de los terremotos y, por consiguiente, para la conformación de un catálogo de terremotos. Este último requiere ser lo más homogéneo posible en cuanto a magnitud, ya que esto permite hacer comparables los terremotos en términos de la energía liberada en los distintos períodos de que consta el catálogo. Según Weatherill, Paganí y García (2016) el proceso de homogenización de múltiples catálogos en un catálogo unificado simple típicamente requiere la evaluación cuidadosa de los boletines disponibles, la identificación de eventos repetidos dentro de múltiples boletines y el desarrollo y aplicación de modelos empíricos para convertir las magnitudes de un catálogo en la magnitud requerida.

A lo largo del siglo XX se desarrollaron varias escalas de magnitud. La primera fue definida por Richter (1935), la escala de magnitud local (M_L) para el sur de California, con una red de sismómetros de Wood-Anderson estandarizados y de corto período. A partir de esta surgieron otras escalas como la magnitud por ondas superficiales (M_S) y la magnitud por ondas de volumen (m_B), propuestas por Gutenberg (1945), citado por Bayliss y Burton (2013).

La magnitud local (M_L) fue definida a partir del logaritmo de la amplitud máxima medida a una distancia de 100 km con el sismómetro antes mencionado. Por otra parte, las escalas de magnitud por ondas superficiales (M_S) y por ondas de volumen (m_B) se establecieron a partir del uso de instrumentos de períodos medios y largos, respectivamente, para un rango de distancia epicentral mayor. Más adelante, algunos investigadores (Kanamori 1977, citado por Ross *et al.* 2016; Hanks y Kanamori 1979,

entre otros) determinaron la magnitud por momento M_w . Esta escala de magnitud ha probado ser más robusta pues está relacionada con parámetros físicos de la fuente como el desplazamiento de la falla y la longitud de ruptura.

En Havskov y Ottemöller (2010) la definición más general de magnitud M es a través de la fórmula:

$$M = \log\left(\frac{A}{T}\right)_{max} + Q(\Delta, h) \quad (1)$$

Donde A es la amplitud del desplazamiento del suelo, T es el período donde se mide la amplitud y Q es la función de corrección por distancia epicentral Δ y distancia hipocentral h . De esta forma, se obtendría una sola escala de magnitud para cualquier terremoto medido a cualquier distancia, pero en la práctica existen muchas desigualdades a partir de la medición de la amplitud en distintas bandas de frecuencias con diferentes instrumentos.

Por lo anteriormente expuesto, estas magnitudes poseen diferencias entre sí al ser comparadas, dada la distinta naturaleza de su determinación. De ahí que se hayan publicado numerosos trabajos con relaciones de correlación entre las escalas de magnitud (Gutenberg y Richter 1955, 1956; Karnik 1973; García *et al.* 2003; Scordilis 2006; Storchak *et al.* 2013; Di Giacomo *et al.* 2015; Lolli, Gasperini y Vannucci 2014) para diferentes regiones.

En este trabajo se presentan las relaciones empíricas entre las magnitudes que han sido determinadas empleando los datos de diferentes agencias regionales (*International Seismological Centre (ISC)*, *National Earthquake Information Centre (NEIC)*, *Global Centroid Moment Tensor Project (GCMT)* y el Servicio Sismológico Nacional de Cuba) para los terremotos del área de Cuba, Jamaica y La Española (Figura 1). Las coordenadas del área se encuentran entre los $14,5^\circ$ – $23,5^\circ$ N y $85,0^\circ$ – $67,0^\circ$ W.

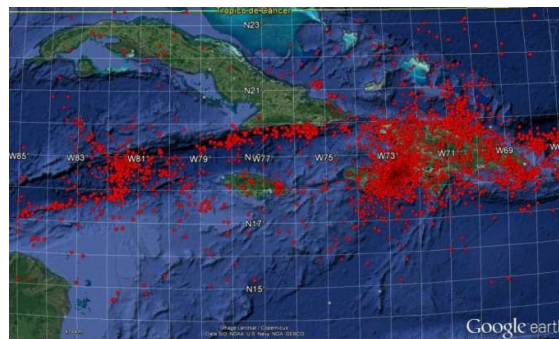


Figura 1. Área de estudio y epicentros de los terremotos recolectados con M (3-7).

Con el objetivo de homogenizar un catálogo de terremotos con fines de evaluación del peligro sísmico en dicha área se calcularon relaciones de correlación, mediante Regresión Lineal Simple, entre magnitudes por ondas de volumen (mb) y por ondas superficiales (Ms) y entre esta última y la magnitud por momento (Mw); además, se indagó sobre posibles relaciones de correlación entre estas magnitudes con la magnitud por duración o Coda (Mc) del catálogo cubano (CUB).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se seleccionaron los terremotos registrados a la vez por cuatro redes regionales: el *National Earthquake Information Center* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (NEIC-USGS), el *International Seismological Centre* (ISC), la base de datos del *Global Centroid Moment Tensor Project* (GCMT) y el *Centennial Earthquake Catalog*; así como los datos locales del Servicio Sismológico Nacional Cubano (SSN). En la Tabla 1 se muestra el resumen de los datos seleccionados, incluyendo la magnitud predominante dentro de cada uno de los catálogos en el período analizado. Esta magnitud predominante se refiere a la mayor cantidad de terremotos con esta magnitud dentro de cada uno de los catálogos.

Tabla 1. Fuentes de los datos empleados

Fuente	Catálogo	Período disponible	Magnitud predominante
NEIC - USGS	PDE	1973 - 2012	mb
ISC	ISC	1973 - 2012	mb, Ms
GCMT	CMT	1977 - 2012	Mw
SSN	CUB	1998 - 2012	Mc

Para el procesamiento de los datos se empleó el sistema de análisis sísmico SEISAN (*Seismic Analysis*, por sus siglas en inglés) que es un paquete completo de programas vinculados con una base de datos para analizar terremotos, ya sean con datos analógicos o digitales.

Como estos catálogos provenían de distintas fuentes con sus respectivos formatos fue necesario convertirlos al formato del SEISAN para el procesamiento y selección de las magnitudes a comparar. Después de chequearlos individualmente estos fueron unidos y los eventos duplicados eliminados. Los catálogos más completos en cuanto a distribución de terremotos por rango de magnitudes fueron el ISC, el PDE y el CUB, mientras que CMT solo contiene terremotos fuertes.

De estos períodos disponibles en todas las fuentes se seleccionaron desde 1973 hasta 2012, con un total de 8 539 terremotos, con magnitudes en el rango 3–6 y 3–7,2. El primer rango se usó para calcular la relación entre la magnitud por ondas de volumen (m_b) y la magnitud por ondas superficiales (M_s) y entre esta última y la magnitud por momento (M_w) para el segundo rango. Se empleó el método Regresión Lineal Simple por ser un método sencillo, rápido y efectivo para comparar pares de variables con niveles de incertidumbre diferente.

La selección de los rangos de magnitudes, específicamente el rango superior, está determinado en el caso de la magnitud por ondas de volumen (m_b) por la saturación de esta escala de magnitud para valores mayores que 6; mientras que en el caso de la magnitud por ondas superficiales (M_s) por la magnitud máxima de los catálogos seleccionados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Relación de correlación entre m_{bPDE} y m_{bISC}

Por ser la magnitud por ondas de volumen (m_b) la magnitud predominante en los datos iniciales de esta investigación se consideró importante chequear la compatibilidad de esta magnitud entre los catálogos ISC y PDE (NEIC), con el fin de determinar si podrían ser empleadas indistintamente en sucesivas correlaciones. Para ello un total de 501 terremotos con ambas magnitudes, en el rango de 3 a 6, fueron seleccionados. Como se muestra en el gráfico de la Figura 2 en el rango de magnitud entre 4 y 5,5 las magnitudes de ambos catálogos presentan menor variabilidad, siendo el factor de correlación entre m_{bPDE} y m_{bISC} de 0,90, lo cual se considera como una buena correlación. Como promedio, en esta comparación, la magnitud m_{bPDE} es mayor en 0,13 unidades que la m_{bISC} .

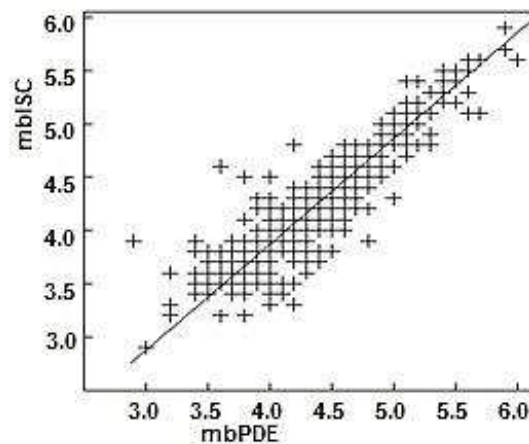


Figura 2. Relación de correlación entre m_{bPDE} y m_{bISC} .

La relación obtenida entre ambas magnitudes fue:

$$m_{b,ISC} = 0,995m_{b,PDE} - 0,113 \quad (2)$$

Esta relación es similar a la obtenida por Scordilis (2006) con una muestra de datos globales, en el rango de magnitud 2,5–7,3:

$$m_{b,ISC} = 1,02(\pm 0,003)m_{b,NEIC} - 0,18(\pm 0,01) \quad (3)$$

3.2. Relación de correlación entre $M_{s,ISC}$ y $m_{b,ISC}$

En este caso se seleccionaron un total de 380 terremotos con ambas magnitudes en el rango de 3 a 6. Como se muestra en el gráfico de la Figura 3 existe una ligera dispersión entre los datos, siendo el coeficiente de correlación 0,79.

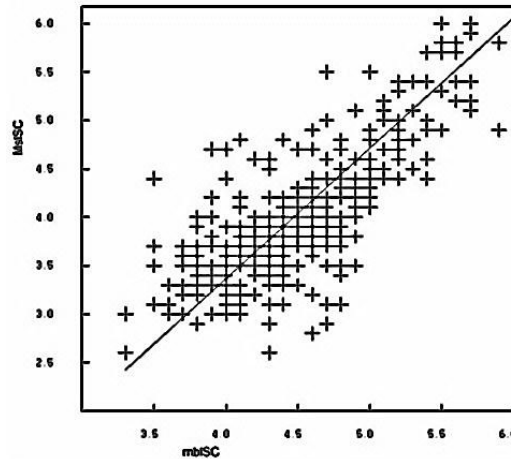


Figura 3. Relación de correlación entre $M_{s,ISC}$ y $m_{b,ISC}$.

De acuerdo con estos resultados, en el catálogo del ISC la magnitud m_b es mayor que la M_s para magnitudes menores que 5 y las menores diferencias entre ambas ocurren para valores iguales o mayores que 5. Como promedio, en esta comparación, la magnitud m_b es mayor en 0,46 unidades que la M_s .

La relación de correlación obtenida es la siguiente:

$$M_{s,ISC} = 1,35m_{b,ISC} - 2,010 \quad (4)$$

Esta relación es similar a la obtenida por García y demás colaboradores (2003) para Cuba:

$$M_s = 1,37m_b - 2,34 \quad (5)$$

Por otro lado, la relación de correlación entre m_{PDE} y M_{ISC} para el área de estudio es muy similar a la relación propuesta por Gutenberg y Richter (1955, 1956) para eventos de foco superficial, así como también es similar a la obtenida por Karnik (1973):

$$m = 0,63M_s + 2,5, \text{ Gutenberg y Richter (1955, 1956)} \quad (6)$$

$$m_b = 0,46M_s + 2,74, \text{ Karnik (1973)} \quad (7)$$

$$m_b = 0,63M_s + 2,13, \text{ en este estudio.} \quad (8)$$

Para la ecuación 8 se empleó una muestra de 353 terremotos con magnitudes en el rango de 3 a 6 y la ecuación se calculó por el método de mínimos cuadrados que mostró un mejor ajuste, a diferencia del resto de las ecuaciones de correlación de este estudio que se determinaron por el método de máxima verosimilitud.

3.3. Correlación entre M_{ISC} y M_{wCMT}

La correlación entre la magnitud M_s del catálogo ISC y la magnitud por momento M_w del catálogo de CMT se realizó para una muestra de 76 terremotos con magnitud entre 3,8 y 7,0. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,94 y, como promedio, en esta comparación, la magnitud M_w es mayor que M_s en 0,46 unidades. De esta correlación se obtuvo la siguiente ecuación:

$$M_{wCMT} = 0,67M_{sISC} + 2,08 \quad (9)$$

Esta es comparable a la ecuación hallada en el catálogo ISC-GEM, 1900-2009, de Storchak y otros investigadores (2013), en la cual emplearon el método de Regresión Ortogonal Generalizada (GOR, en inglés):

$$M_w = 0,67M_s + 2,13 \text{ Para } M_s \leq 6,47 \quad (10)$$

La ecuación propuesta en el presente trabajo también es comparable con la de Scordilis (2006), obtenida para una base de datos global mediante el método GOR:

$$M_w = 0,67(\pm 0,005)M_s + 2,18(\pm 0,03) \quad (11)$$

3.4. Relación entre m_{PDE} y M_{cCUB}

Si bien las diferencias en la forma en que se determinan la magnitud por ondas de volumen (m_b) y la magnitud por coda M_c son significativas, su comparación con los datos de esta investigación resultó de interés. Esto se debió a que en el catálogo cubano de 1999 a 2012 la magnitud por coda M_c es predominante. Para realizar la comparación se empleó una muestra

de 528 terremotos, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0,58. Como se muestra en el gráfico de la Figura 4 no hay una buena correlación entre ambas escalas, existe una gran dispersión alrededor de la línea de correlación debido a la gran diferencia entre los valores de ambas magnitudes.

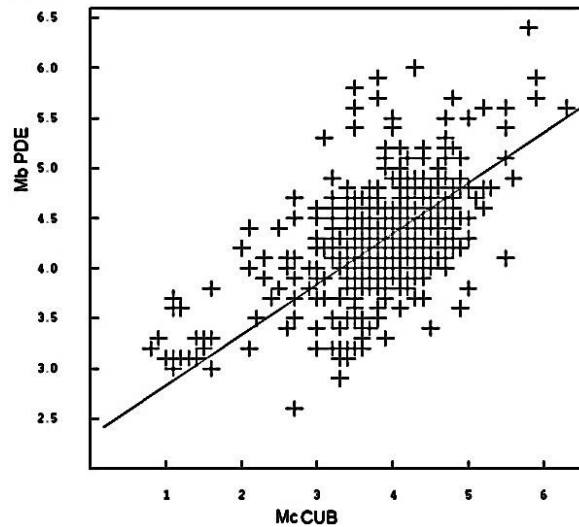


Figura 4. Relación entre m_{bPDE} y M_{CCUB} .

La relación obtenida en este caso fue:

$$m_{bPDE} = 0,507M_{CCUB} + 2,31 \quad (12)$$

Por debajo de la magnitud 4 el catálogo cubano subestima el valor de M_c en casi una unidad en relación con m_b y solo alrededor de 4,5 desaparecen estas diferencias. Las notables desigualdades entre estas magnitudes pueden estar relacionadas con varios factores: con las divergencias inherentes a la determinación de ambas escalas de magnitud y en la práctica la magnitud por duración presenta incertidumbre durante enjambres sísmicos y secuencias de réplicas donde el comienzo de un terremoto se superpone al final del evento precedente, además de errores sistemáticos entre los analistas al marcar dónde termina el evento sísmico. Por estos motivos es muy recomendable que el SSN de Cuba se proyecte hacia la determinación de la magnitud por momento (M_w), la cual eliminaría esta problemática.

4. CONCLUSIONES

- La menor diferencia promedio entre las relaciones de magnitud obtenidas en este estudio es de 0,13 entre las magnitudes m_b del catálogo NEIC y el ISC. En el caso de las relaciones entre M_s y m_b

dentro del catálogo ISC y entre Ms (catálogo ISC) y Mw (catálogo CMT) existe la diferencia promedio más alta, siendo de 0,46.

- La relación mb_{PDE}/M_{SISC} de este estudio es comparable con las encontradas por Gutenberg y Richter (1955, 1956) y Karnik (1973).
- La relación mb_{PDE}/mb_{ISC} y M_{SISC}/M_{WCMT} es comparable con las de Scordilis (2006) y las del catálogo ISC-GEM 1900-2009 de Storchak y demás investigadores (2013).
- La relación mb_{PDE}/M_{CCUB} solo arroja resultados satisfactorios para terremotos alrededor de la magnitud 4,5. Esta gran diferencia impidió el uso de la relación de correlación para homogenizar el catálogo. De ahí que sea recomendable que el SSN de Cuba se proyecte hacia la determinación de la magnitud por momento (Mw) como rutina, de manera que se facilite el trabajo con el catálogo cubano en cuanto a estudios de peligrosidad sísmica.
- Las relaciones de correlación aquí obtenidas son aplicables en las investigaciones de peligrosidad sísmica en toda la región de estudio, exceptuando las relaciones que involucran a la Mc de la red cubana, en rangos de magnitud diferentes a los mencionados en la conclusión anterior.

5. REFERENCIAS

- Bayliss, T. J. y Burton, P. W. 2013: Seismic hazard across Bulgaria and neighbouring areas: regional and site-specific maximum credible magnitudes and earthquake perceptibility. *Natural Hazards*, 68(2): 271–319. DOI 10.1007/s11069-013-0590-5.
- Di Giacomo, D.; Bondár, I.; Storchak, D. A.; Engdahl, E. R.; Bormann, P. y Harris, J. 2015: ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed MS and mb, proxy MW, final magnitude composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239: 33–47.
- García, J.; Slejko, D.; Álvarez, L.; Peruzza, L. y Rebez, A. 2003: Seismic hazard maps for Cuba and surrounding areas. *Bull. Seismological Society of America*, 93(6): 2563–2590.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. 1955: Magnitude and energy of earthquakes. *Nature*, 176(4486), 795.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. 1956: Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the seismological society of America*, 46(2): 105-145.

- Hanks, T. C. y Kanamori, H. 1979: A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84: 2348-2350.
- Havskov, J. y Ottemöller, L. 2010: *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Springer, 360 p. ISBN-10: 904818696X.
- Kanamori, H. 1983: Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 93(3-4): 185-199.
- Karnik, V. 1973: Magnitude differences. *Pure and applied geophysics*, 103(1), 362-369.
- Lolli, B.; Gasperini, P. y Vannucci, G. 2014: Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. *Geophysical Journal International*, 199(2): 805-828. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
- Richter, C. F. 1935: An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1), 1-32.
- Ross, Z. E.; Ben-Zion, Y.; White, M. C. y Vernon, F. L. 2016: Analysis of earthquake body wave spectra for potency and magnitude values: implications for magnitude scaling relations. *Geophysical Journal International*, 207(2): 1158-1164. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw327>
- Storchak, D. A.; Di Giacomo, D.; Bondár, I.; Engdahl, E. R.; Harris, J.; Lee, W. H. K.; Villaseñor, A. y Bormann, P. 2013: Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009). *Seismological Research Letters*, 84(5): 810-815. DOI: 10.1785/0220130034.
- Scordilis, E. M. 2006: Empirical global relations converting M_S and m_b to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10(2): 225-236. DOI: 10.1007/s10950-006-9012-4
- Weatherill, G. A.; Pagani, M. y Garcia, J. 2016: Exploring earthquake databases for the creation of magnitude-homogeneous catalogues: tools for application on a regional and global scale. *Geophysical Journal International*, 206(3): 1652-1676. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw232>

Recibido: 13/10/17

Aceptado: 20/11/17

Madelin Villalón-Semanat, Máster en Ciencias Mención Peligros Geológicos. Investigadora Agregada. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), Cuba madelin@cenais.cu