

Evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva (Colombia) utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación

ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO¹

RESUMEN

Este artículo presenta la evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva a 2013. En esta oportunidad se utilizan las ecuaciones de atenuación recientes y robustas correspondientes a la Nueva Generación de Ecuaciones de Atenuación (NGA) desarrolladas en Estados Unidos. Dichas ecuaciones son Abrahamson y Silva, Boore y Atkinson, Campbell y Bozorgnia, Chiou y Youngs e Idriss. En lo referente a la evaluación determinista se plantean escenarios más conservadores suponiendo ruptura de la totalidad de la longitud de la falla, la aceleración pga sería de 550, 355, 305, 400 y 375 gales debido a la falla La Dina. Estos valores se consideran el sismo máximo creíble. Para el análisis probabilístico, debido al hecho de que las ecuaciones NGA son aplicables a sismos con magnitudes entre 5 y 8, el catálogo se vio reducido drásticamente; por tanto, se hizo un análisis estadístico de los datos con magnitudes entre 4 y 7,2 y se completó el catálogo suponiendo una distribución de Poisson. Las aceleraciones (media más una desviación estándar) evaluadas fueron de 280, 230, 280, 305 y 320 gales respectivamente.

Palabras clave: Neiva, Huila, Colombia, amenaza, sismos, probabilista, determinista, NGA, Poisson.

¹ Ingeniero consultor CIEES, Medellín, Colombia. Correo electrónico: alfaro@ciees.org

FECHA DE RECEPCIÓN: 10 DE FEBRERO DE 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 3 DE MAYO DE 2013

Cómo citar el artículo: Alfaro Castillo, A.J. (2013). Evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva (Colombia) utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. *Épsilon* (20), 145-158.

Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Threat in Neiva (Colombia) through the Use of Next Generation Attenuation Equations

ABSTRACT

This article presents a probabilistic and deterministic assessment of a seismic threat in Neiva as of 2013, using the recent and robust attenuation equations corresponding to the Next Generation Attenuation (NGA) developed in the United States. These equations were proposed by Abrahamson and Silva, Boore and Atkinson, Campbell and Bozorgnia, Chiou, Youngs and Idriss. Regarding the deterministic assessments, conservative scenarios are presented, and considering a total rupture of the fault, the PGA would be of 550, 355, 305, 400 and 375 Gal due to the La Dina fault. These values are considered as the maximum credible seism. For the probabilistic analysis, due to the fact that the NGA equations are applicable to earthquakes with magnitudes between 5 and 8, the catalogue was drastically reduced. Therefore, a statistical analysis was performed with data of magnitudes between 4 and 7.2 and the catalogue was completed, assuming a Poisson distribution. The assessed accelerations (average plus a standard deviation) were 280, 230, 280, 305 and 320 Gal, respectively.

Keywords: Neiva, Huila, Colombia, threat, earthquakes, probabilistic, deterministic, NGA, Poisson.

Avaliação probabilista e determinista de a ameaça sísmica de Neiva (Colômbia), utilizando a nova geração de equações de atenuação

RESUMO

Este artigo apresenta a avaliação probabilista e determinista da ameaça sísmica de Neiva a 2013. Nesta oportunidade se utilizam as equações de atenuação recentes e robustas correspondentes à Nova Geração de Equações de Atenuação (NGA) desenvolvidas nos Estados Unidos. Estas equações são Abrahamson e Silva, Boore e Atkinson, Campbell e Bozorgnia, Chiou e Youngs e Idriss. No que se refere à avaliação determinista sugere-se cenários mais conservadores supondo ruptura da totalidade da longitude da falha, a aceleração pga seria de 550, 355, 305, 400 e 375 gais devido à falha a Dina. Estes valores se consideram o sismo máximo acreditável. Para a análise probabilística, devido ao fato de que as equações NGA são aplicáveis a sismos com magnitudes entre 5 e 8, o catálogo foi reduzido drasticamente; portanto, foi feita uma análise estatística dos dados com magnitudes entre 4 e 7,2 e se completou o catálogo supondo uma distribuição de Poisson. As acelerações (média mais um desvio padrão) avaliadas foram de 280, 230, 280, 305 e 320 gais respectivamente.

Palavras chave: Neiva, Huila, Colômbia, ameaça, sismos, probabilístico, determinístico, NGA, Poisson.

Introducción

Este artículo complementa las investigaciones de Bohórquez (2007), Bohórquez y Alfaro (2008) y Alfaro y Bohórquez (2011); en cada una de ellas no solo se actualizó el catálogo sino que se incorporaron los análisis de completitud del mismo y el análisis determinista. En esta oportunidad se incorpora el estado del arte en lo referente a las ecuaciones de atenuación y se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos. De otro lado, se actualiza el análisis determinista con una visión conservadora, utilizando mayores longitudes de ruptura de las fallas activas identificadas, dichas longitudes se supusieron del 100 % de la longitud de la falla. Estos son de alguna manera los valores límites máximos de control para el análisis probabilista e indicarían los valores máximos posibles. Adicionalmente, se realiza un análisis de los mecanismos focales de los sismos en la zona de interés.

Neiva, la capital del departamento del Huila, está localizada a 304 km al suroccidente de Bogotá, en el valle del río Magdalena. En esta investigación se analizó un área de 40.000 km² alrededor de Neiva, un área cuadrada de 200 km de lado, en esta zona se encuentran tres sistemas de fallas importantes que atraviesan Colombia: el sistema de fallas Romeral, bajo el flanco occidental de la Cordillera Central, dicho sistema atraviesa Colombia desde el mar Caribe hasta Ecuador y ha generado importantes sismos como el de 1983 cerca de Popayán, el de 1994 al occidente del Huila y, más recientemente, el de 1999 en el departamento del Quindío. El sistema de fallas en el valle del río Magdalena constituido por las fallas La Plata-Chusma, La Dina, Suaza y Garzón-Pitalito, atraviesa el borde occidental del valle del río Magdalena, sismos de intensidad intermedia como los de 1805, 1816, 1824 y 1942 pueden relacionarse con este sistema de fallas. Y el sistema de fallas del Borde Llanero, constituido en esta zona por las fallas Servitá-Santa María y Algeciras, considerado como muy activo, ha generado grandes sismos como el de 1827 en el Huila, el de 1834 en Nariño y el macrosismo del Huila en 1967 (Ramírez, 1967).

De los sismos ocurridos en la zona, tres de ellos han causado daños importantes en la ciudad de Neiva como son: el sismo del 16 de noviembre de 1827, el sismo del 9 de abril de 1967 y el sismo del 6 de junio de 1994. Durante el sismo de 1827 el río Suaza quedó represado durante 55 días debido a derrumbes, la ruptura del represamiento generó inundaciones y devastación en Neiva. El sismo de 1994 tuvo una magnitud MS de 7,6 que causó una avalancha por la cuenca del río Páez y dejó un saldo aproximado de 1000 muertos y 30.000 damnificados.








A nivel de amenaza sísmica se han realizado, entre otros, los estudios de Estrada y Ramírez (1977), AIS (1984), AIS (1996), Gallego (2000), Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana (2000), Pinto (2000), Bohórquez (2007), Bohórquez y Alfaro (2008), AIS (2009) y Alfaro y Bohórquez (2011), los cuales presentan valores de aceleración pico y espectros de diseño. En este estudio se presenta el análisis probabilístico utilizando la metodología de Hanks y Cornell (1994) y el análisis determinista con la metodología de Stirling, Rhoades y Berryman (2002), mediante la ayuda de la hoja de Excel de Al Atik (2009). Por otro lado, Stein, Geller y Liu (2011) enfatizan en la necesidad de revisión y actualización de los estudios de amenaza sísmica.

Evaluación probabilista de la amenaza sísmica

Para el análisis probabilista en este estudio se siguió la metodología de Hanks y Cornell (1994). Este método consiste en analizar los sismos que ocurrieron en el área de estudio desde 1766 hasta el 2012. Se consultaron los catálogos de Ramírez (1975), del U.S. Geological Survey (USGS, 2013), este catálogo contiene datos del Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina (SISRA) para el periodo comprendido entre 1766 a 1981, y los datos del Preliminary Determination of Epicenters (PDE) para el periodo de 1973 a 2012. Adicionalmente se consultó el catálogo del International Seismological Centre (ISC) (2012). Es importante anotar que dichos catálogos incluyen la información suministrada por el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos y de la Red Sismológica de Colombia de Ingeominas. Los mecanismos focales provienen de Ekström (2012) y corresponden al CMT Project y al USGS (2012), la explicación de estos se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Mecanismos focales en el área de estudio

FUENTE	FECHA	LAT [°]	LONG [°]	PROF [KM]	Mw	STRIKE [°]	DIP [°]	SLIP [°]	STRIKE [°]	DIP [°]	SLIP [°]	MEC
CMT	1994/ 6/6	2,93	-75,94	15,0	6,8	206	76	170	299	80	14	
NEIC		2,917	-76,06	20,0	6,7	123	79	-3	214	87	-169	
CMT	1997/ 9/2	4,00	-75,57	213,2	6,7	256	48	62	115	49	117	
PDE		3,85	-75,75	211,0	6,8	525	44	49	123	58	122	

FUENTE	FECHA	LAT [°]	LONG [°]	PROF [KM]	Mw	STRIKE [°]	DIP [°]	SLIP [°]	STRIKE [°]	DIP [°]	SLIP [°]	MEC
CMT	1997/ 12/11	4,11	-75,84	189,5	6,4	249	53	31	140	66	139	
NEIC		3,93	-75,78	183	6,4	254	47	38	136	63	130	
NEIC	2001/ 09/22	3,87	-75,97	178,6	5,9	249	49	37	133	63	133	
HRVD		4,03	-76,17	178	5,9	247	53	31	137	65	139	
HRVD	2002/ 11/23	3,73	-74,05	67,1	5,1	195	48	159	299	75	44	
CMT	2009/ 12/18	3,08	-76,30	169,2	5,1	110	46	-172	14	84	-44	
CMT	2010/ 7/29	3,98	-75,09	33,1	5,1	37	54	138	155	57	45	

CMT = Centroid Moment Tensor Project (Ekström, 2012); HRVD = Centroid Moment Tensor Project (Ekström, 2012); PDE = Preliminary Determination of Epicenters (USGS, 2013); NEIC = National Earthquake Information Center (USGS, 2013).

Inicialmente se observó la sismicidad histórica e instrumental en un área de 40.000 km² comprendida entre las coordenadas 2,0° y 4,0° de latitud y entre 76,3° y 74,3° de longitud oeste. Después esta área se redujo a 33.400 km² debido a que en una zona al suroriente hay un bajo registro de sismos, como se observa en la figura 1. Las diferentes magnitudes se unificaron a MS utilizando las correlaciones de Utsu (2002). En Alfaro y Bohórquez (2011) se realizó la completitud del catálogo con la metodología de Stepp (1972); en esta se complementa el catálogo mediante un análisis estadístico de los datos de tal forma que estos se ajusten a la distribución de Poisson.

Actualización y análisis del catálogo sísmico

El catálogo se actualizó con la información contenida en la figura 1; es importante resaltar que no se incluyeron en el análisis los sismos profundos, a saber: 04/03/2008, 18/12/2009; 09/07/2011 y 07/10/2011. Las magnitudes de los eventos restantes se convirtieron a Mw utilizando los estudios de Utsu (2002).

Adicionalmente se hizo análisis estadístico de los datos con eventos con magnitudes mayores a 4,0; la figura 2 muestra los eventos registrados y los eventos que según la distribución de Poisson han debido presentarse (o registrarse) en el área de interés

en la ventana de tiempo analizada correspondiente a 1944-2013. Se realizaron dos análisis: uno teniendo en cuenta únicamente los eventos registrados, que se han denominada reales, y otro con los eventos que teóricamente han debido ocurrir.

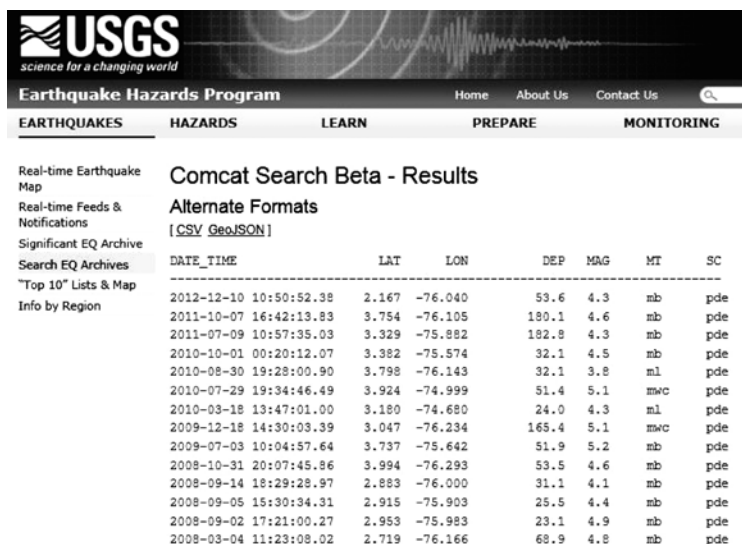


Figura 1. Sismos registrados en el área de interés entre el 1 de enero de 2008 y el 9 de mayo de 2013

Fuente: USGS (2013).

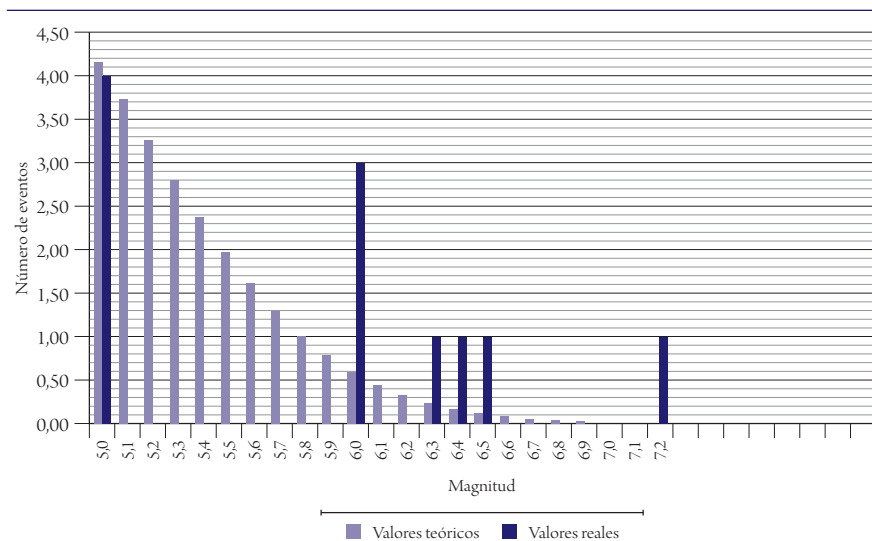


Figura 2. Análisis de los datos

En la figura 2 se muestra que el mejor ajuste es como distribución tipo Poisson, a pesar de ello se observa la diferencia entre el número de eventos esperados y el de eventos registrados para cada magnitud. El análisis se realizó para magnitudes mayores a 4,0.

Ecuaciones de atenuación

A fin de determinar las aceleraciones para cada magnitud de sismo es necesario estimar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo, Douglas (2001, 2002) recopiló más de 200 ecuaciones robustas determinadas en diferentes partes del mundo. En la actualidad no se cuenta con ecuaciones robustas de atenuación para Colombia, lo cual hace necesaria la utilización de ecuaciones desarrolladas en otras partes del mundo, es decir, en geologías y procesos tectónicos diferentes. En esta fase del estudio se utilizan las ecuaciones de Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008), correspondientes al Proyecto Nueva Generación de Ecuaciones de Atenuación.

Evaluación determinista de la amenaza sísmica

En esta actualización de los estudios se realiza una estimación de las posibles magnitudes que se presentarían en las fallas geológicas caracterizadas por Paris *et al.* (2000) mediante la utilización de las ecuaciones empíricas de Stirling *et al.* (2002).

Cada escenario está representado por la ocurrencia de un sismo en una fuente, con el foco situado a la mínima distancia del sitio. En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis determinista a partir de las ecuaciones empíricas de Stirling *et al.* (2002), ya que dan valores mayores que los de Wells y Coppersmith (1994), se presentan también los valores de aceleración pico del terreno en roca aplicando las ecuaciones de atenuación de Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008).

De acuerdo con la ecuación de Stirling *et al.* (2002) se estima que la máxima aceleración en roca que podría ocurrir en la ciudad de Neiva sería de 550, 355, 305, 400 y 375 gales, y sería causada por un sismo originado en la falla La Dina. El valor

determinado para este escenario correspondería al movimiento con consecuencias más severas sobre la ciudad y representa el sismo máximo creíble.

Tabla 2. Análisis determinista de la amenaza sísmica de Neiva

FALLA	LONGITUD EN KM	AZIMUT/BUZAMIENTO	SENTIDO DE MOVIMIENTO	TIPO	LONGITUD RUPTURA SUB-SUPERFICIAL (SUPUESTA)	DISTANCIA AL SITIO DE INTERÉS	MW PREINSTRUMENTALES (STIRLING ET AL., 2002)	ABRAHAMSON Y SILVA (2008)	BOORE Y ATKINSON (2008)	CAMPBELL Y BOZORGNI (2008)	CHOU Y YOUNGS (2008)	IDRISS (2008)
Unidades	[km]	[°]			[km]	[km]		[gales]	[gales]	[gales]	[gales]	[gales]
La Dina	206,9	N32.9°E ± 13°	I - dex- tral	Inv	206,9	15	7,7	550	355	305	400	375
Algeciras	156,5	N51.6°E ± 12°	D e x - tral	Rumbo	156,5	27	7,6	225	250	190	240	230
Servitá-Santa María	295,8	N42.3°E ± 15°	I - dex- tral	Inv	295,8	50	7,8	150	180	125	160	14

Discusión

Un tema que está siendo discutido con respecto a los estudios probabilistas de amenaza sísmica es la “increíble” precisión en los resultados (Güllkan, 2013), en los que se hacen aseveraciones para periodos de retorno de 475 años, con datos de tan solo 100 años; en el caso colombiano, el catálogo presenta una especie de comportamiento poissoniano a partir de 1960 (Alfaro, 2012). Sin embargo, en la medida que se reduce el tamaño de las áreas de estudio se filtran los datos para dejar eventos de corteza superficiales, el catálogo se convierte en algo extremadamente reducido.

En el caso de las ecuaciones de la NGA utilizadas en la investigación que se resume en este artículo, estas han sido desarrolladas para magnitudes mayores a 5,0. De acuerdo con la ley de recurrencia —producto de la observación de eventos sísmicos en todo el mundo—, las bajas magnitudes tienen mayor número de datos y el crecimiento es exponencial.

De otro lado, al analizar los datos con una distribución de Poisson es posible ver los vacíos y completar los mismos suponiendo el cumplimiento de las premisas de análisis. El cambio en los resultados es drástico, como se vio en el apartado anterior.

Tabla 3. Resultados del análisis probabilista para la ciudad de Neiva

ECUACIÓN DE ATENUACIÓN	REFERENCIA	PGA PARA UNA TR 475 AÑOS	OBSERVACIONES	
Ambraseys y Douglas (2000)	Bohórquez (2007)	130	Media	
	Bohórquez y Alfaro (2008)	425	Completitud GR-Media	
Sarma y Srbulov (1998)	Bohórquez (2007)	175	Media	
	Bohórquez y Alfaro (2008)	515	Completitud GR-Media	
Sarma y Srbulov (1996)	Bohórquez (2007)	170	Media	
	Bohórquez y Alfaro (2008)	510	Completitud GR-Media	
Fukushima y Tanaka (1990)	Bohórquez (2007)	250	Media	
	Bohórquez y Alfaro (2008)	355	Completitud GR-Media	
	Alfaro y Bohórquez (2011)	272	Completitud Stepp-Media	
Patwardhan <i>et al.</i> (1978)	Bohórquez (2007)	185	Media	
	Bohórquez y Alfaro (2008)	425	Completitud GR-Media	
Abrahamson y Silva (2008)	Este estudio	200	Media más una desviación estándar	
Boore y Atkinson (2008)		175		
Campbell y Bozorgnia (2008)		205		
Chiou y Youngs (2008)		225		
Idriss (2008)		230		
Abrahamson y Silva (2008)		280	Completitud Poisson y media más una desviación estándar	
Boore y Atkinson (2008)		230		
Campbell y Bozorgnia (2008)		280		
Chiou y Youngs (2008)		305		
Idriss (2008)		320		
NSR 98			294	
NSR (2010)			245	

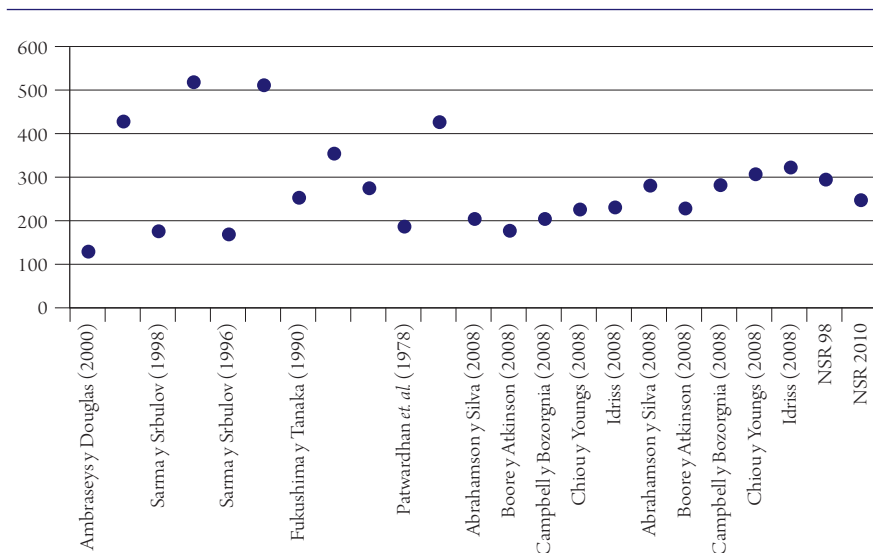


Figura 3. Análisis comparativo de las aceleraciones del PHSA

Las aceleraciones de PHSA (figura 3) se obtuvieron de las investigaciones de Bohórquez (2007), Bohórquez y Alfaro (2008), Alfaro y Bohórquez (2011) y de este estudio.

La tabla 3 presenta las observaciones acerca de si el resultado tenía o no completitud y se reporta la media o la media más una desviación estándar.

Conclusiones

La ciudad de Neiva está situada en una zona de amenaza sísmica importante, con evidencia de sismos que han causado daños y víctimas. Los más recientes el 9 de febrero de 1967 y el del 6 de junio de 1994. Las normas sismo-resistentes de 1984 y 1998 (AIS, 1984, 1996) exigían para los análisis y diseños una aceleración en roca del 30 % g, valor de alguna manera coherente con la información disponible; sin embargo, inexplicablemente la norma de 2010 redujo este valor a 25 % g.

Los análisis probabilista y determinista se hicieron en un área comprendida entre las latitudes 2° a 4° norte, y entre las longitudes 74,3° y 76,3° oeste. La ventana de tiempo utilizada fue de 1940 a 2012.

Se realizó un análisis de completitud del catálogo sísmico suponiendo que cumplía con la distribución de Poisson. Para la evaluación determinista se tuvieron en cuenta las fallas de La Dina, Algeciras, Servitá-Santa María, Garzón-Pitalito, La Plata-Chusma, Irlanda, Guayuriba, Cucuana, Suaza, Paraíso, Piendamó, Mocoa y La Macarena.

El análisis probabilista muestra aceleraciones de 280, 230, 280, 305 y 320 gales para un periodo de retorno de 475 años. El análisis determinista presenta una aceleración máxima probable de 550, 355, 305, 400 y 375 gales debido a la falla La Dina. En este estudio se presentan los análisis probabilista y determinista con algoritmos desarrollados por el autor y el archivo de Excel de Al Atik (2009).

El reciente artículo de Stein *et al.* (2011) enfatiza en la necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a nivel mundial, en este caso utilizando las ecuaciones de la NGA de 2008.

Recomendaciones

Se ha de resaltar el hecho de que los resultados obtenidos son función básica de cuatro variables, a saber: dependencia total de la ecuación de atenuación utilizada, dependencia del análisis y tipo de completitud aplicada, variación importante debido a la utilización o no de la desviación estándar en el reporte de la p_g y, la más importante, el catálogo sísmico utilizado. Es de suma importancia mejorar la instrumentación sísmica en Colombia, de tal forma que se tenga una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos, tanto de los estudios probabilistas como de los deterministas de la amenaza sísmica.

Referencias

- Abrahamson N. y Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson y Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 67-97.
- Al Atik, L. (2009). *Calculation of Weighted Average 2008 NGA Models*. Recuperado de: <http://peer.berkeley.edu/>
- Alfaro, A. (2012). Difficulties on PSHA in Colombia Because of Data Scarcity. *Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 46, 145-152.

- Alfaro A. y Bohórquez, M. (2011). Probabilistic and Pseudo-Deterministic Seismic Hazard Assessment for Neiva, Colombia. *Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 45, pp. 139-146.
- Ambraseys, N. y Douglas, J. (2000). *Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response*. ESEE Report 00-4. London: Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1984). *Estudio general del riesgo sísmico de Colombia*. Bogotá: ASI.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: ASI.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: ASI.
- Bohórquez, M. (2007). Evaluación probabilística de la amenaza sísmica regional para Neiva (trabajo de Grado, Ingeniería Civil). Universidad de La Salle, Bogotá.
- Bohórquez M. y Alfaro, A. (2008). Análisis probabilístico de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia - 40 años del macrosismo del Huila (1967-2007). *Revista Épsilon*, 11: 41-48.
- Boore, D. M. y Atkinson, G. M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5 % Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 99-138.
- Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5 % Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 139-171.
- Chiou, S. J. y Youngs, R. R. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response. *Earthquake Spectra* 24 (1), 173-215.
- Douglas, J. A. (2001). *Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000)*. London: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Douglas, J. A. (2002). *Errata and additions to ESEE Report No. 01-1. "A comprehensive worldwide for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)"*. London: Imperial College of Science Technology and Medicine.
- Ekström, G. (2012). *Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project*. Recuperado de: <http://www.globalcmt.org/>
- Estrada, G. y Ramírez, J. E. (1977). *Mapa de riesgo sísmico para Colombia*. Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos. Pontificia Universidad Javeriana.

- Fukushima, Y. y Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of Seisological Society of America*, 80 (4), 757-783.
- Gallego, M. (2000). Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia (tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Gülkan, P. (2013). A Dispassionate View of Seismic-Hazard Assessment. *Seismological Research Letters*, 84 (3), 413-416.
- Hanks, T. y Cornell, C. (1994). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide. In *Proceedings of the Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*. Raleigh: North Carolina State University, I/1-1 to I/1-17.
- Idriss, I. M. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 217-242.
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A. (2000). *Microzonificación Sísmica Preliminar de Neiva, memoria técnica*. Bogotá.
- International Seismological Centre (2012). *On-line Bulletin*. Recuperado de: <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (1997). *NSR-98. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente NSR-98. Ley 400 de 1997*. Bogotá: MAVDT.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). *NSR-10. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente NSR-10. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010*. Bogotá: MAVDT.
- Paris, G., Machette, M., Dart, R. y Haller, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions*. USGS.
- Patwardhan, K., Idriss, I. M. y Youngs, R. (1978). Attenuation of Strong Motion Effect of Site Conditions. Transmission Path Characteristics and Focal Depths. *Bulletin of Seisological Society of America*.
- Pinto, R. (2000). *Microzonificación sísmica preliminar de Neiva* (trabajo de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería Civil, Bogotá.
- Ramírez, J. E. (1967). Macrosismo del Huila. *Revista Javeriana*, 333.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Sarma, S. K. y Srbulov, M. (1996). A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 (8), 815-836.

- Sarma, S. K. y Srbulov, M. (1998). A uniform estimation of some basic ground motion parameters. *Journal of Earthquake Engineering*, 2 (2), 267-287.
- Stein, S., Geller, R. y Liu, M. (2011). Bad Assumptions or Bad Luck : Why Earthquake Hazard Maps Need Objective testing. *Seismological Research Letters*, 82 (5), 623-626.
- Stepp, J. C. (1972). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. *Proceedings on Microzonation Conference University of Seattle*, 2, 897-909.
- Stirling, M., Rhoades, D. y Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (2), 812-830.
- USGS (2013). *Global Earthquake Search*. Recuperado de: www.earthquake.usgs.gov.
- Utsu, T. (2002). Relationships between magnitude scales. In Lee, H. K., Kanamori, H. y Kisslinger, C. (eds.). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* (pp. 733-746). International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior Committee on Education, International Association for Earthquake Engineering, Academic Press.
- Wells, D. L. y Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974-1002.