

Mapas de amenaza sísmica para Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA-2008)

DIANA MILENA DÍAZ HERNÁNDEZ¹
ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO²

RESUMEN

Este artículo presenta mapas de amenaza sísmica de Colombia para un periodo de retorno de 475 años. Estos mapas son evaluados con la metodología probabilista de amenaza sísmica, con un catálogo sísmico de 1960 a 2012, para lo cual se utilizan cinco ecuaciones del Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA) del 2008. Las ecuaciones del NGA generan resultados con grandes variaciones, a pesar de utilizar el mismo esquema de relación y la misma base de datos del PEER, la cual fue filtrada dependiendo de los criterios de cada grupo. Adicionalmente, las desviaciones estándares desempeñan un papel importante en la evaluación, ya que, en algunos casos, el valor supera la media. A pesar de no haber realizado análisis de completitud, los valores obtenidos para las ciudades de Cali, Ibagué, Medellín, Pasto, Pereira, Popayán y Quibdó son mayores que los de la norma sismorresistente vigente.

Palabras clave: amenaza sísmica, Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA), desviación estándar, Colombia, atenuación.

¹ Magíster en Geotecnia por la Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Ingeniera civil por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Especialista en obras civiles en Tipiel, S. A. Correo electrónico: DiDiaz@tipiel.com.co

² Magíster en Ingeniería Sísmica por la Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España. Ingeniero civil por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Especialista en Sismología por el International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Japón. Correo electrónico: alfaro@ciees.org

FECHA DE RECEPCIÓN: 1 DE NOVIEMBRE DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 4 DE ABRIL DE 2014

Cómo citar este artículo: Díaz Hernández, D. M. y Alfaro Castillo, A. J. (2014). Mapas de amenaza sísmica para Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA-2008). *Épsilon* (22), 55-79.

Seismic Hazard Maps for Colombia Using the New Generation of Attenuation Equations (NGA-2008)

ABSTRACT

This paper presents seismic hazard maps of Colombia for a return period of 475 years. These maps are evaluated with probabilistic seismic hazard methodology, with a seismic catalog for 1960-2012, for which five equations of the 2008 Next Generation Attenuation Relation Project (NGA) were used. The NGA equations generate results with large variations, despite using the same relation scheme and the same PEER database, which was filtered depending on the criteria of each group. Additionally, standard deviations play an important role in the evaluation, because, in some cases, the value exceeds the average. Although we did not perform an analysis of completeness, the values obtained for the cities of Cali, Ibagué, Medellín, Pasto, Pereira, Popayán and Quibdó are greater than the current seismic standard.

Keywords: seismic hazard, Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA), standard deviation, Colombia, attenuation.

Mapas de ameaça sísmica para Colômbia utilizando a nova geração de equações de atenuação (NGA-2008)

RESUMO

Este artigo apresenta mapas de ameaça sísmica da Colômbia para um período de retorno de 475 anos. Estes mapas são avaliados com a metodologia probabilista de ameaça sísmica, com um catálogo sísmico de 1960 a 2012, para o qual se utilizam cinco equações do Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA) do 2008. As equações do NGA geram resultados com grandes variações, apesar de utilizar o mesmo esquema de relação e a mesma base de dados do PEER, a qual foi filtrada dependendo dos critérios de cada grupo. Adicionalmente, os desvios padrões desempenham um papel importante na avaliação, já que, em alguns casos, o valor supera a média. Apesar de não haver realizado análise de completude, os valores obtidos para as cidades de Cali, Ibagué, Medellín, Pasto, Pereira, Popayán e Quibdó são maiores que os da norma sísmo resistente vigente.

Palavras chave: ameaça sísmica, Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA), desvio padrão, Colômbia, atenuação.

Introducción

Colombia está situada en una zona propensa a los sismos (Ramírez, 1933, 1971, 1975; Ramírez y Goberna, 1980; Goberna, 1988; Salcedo, 1992, 1993), con una compleja tectónica debido a la interacción de cuatro placas: de Suramérica, del Caribe, Nazca y Cocos, que han formado el relieve del territorio y han generado fallas geológicas y una zona de subducción. Este artículo presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica del territorio colombiano, usando las ecuaciones de atenuación correspondientes al NGA (2008), como son Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008). Los resultados comparan los valores obtenidos con las normas colombianas NSR-84, NSR-98 y NSR-10.

En cuanto a la amenaza sísmica para todo el territorio colombiano, se han realizado varios estudios: Estrada y Ramírez (1977), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1984, 1996, 2009), Salcedo (1992, 1993), Centro Regional de Sismología para América del Sur (Ceresis, 1996), Aguiar y Haro (2000), Gallego (2000), Alfaro (2011, 2012) y Díaz-Hernández (2013).

Los estudios de AIS (1984, 1996) se basaron en modelos de línea fuente, asignándole a ciertas fallas una sismicidad en un corredor de 60 km de ancho y determinando los parámetros de recurrencia para cada falla. La caracterización presentó un inconveniente debido a la escasez de datos; por ejemplo, la falla de Boconó se caracterizó con nueve sismos; la Bolívar, con cuatro; la Bucaramanga-Santa Marta, con veintitrés; la del Cauca, con seis; la de Cimitarra, con seis; la de Cuiza, con cuatro; la del Espíritu Santo, con seis; la Frontal de la Cordillera Oriental, con solo veintidós; la de Nátaga, con cinco; la de Oca, con cuatro; la de Palestina, con cinco; la de Romeral, con nueve; la de Salinas, con cuatro, y la del Sinú, con tres. Por su parte, Felzer (2006) dice que se requieren más de 2000 sismos de buena calidad para caracterizar una fuente en forma confiable.

Los estudios de Salcedo (1992, 1993) tienen como ventaja incluir varios parámetros geofísicos, como el tipo de corteza terrestre (continental, oceánica o de transición), las fallas geológicas según su morfología y cinemática (inversas, normales, rumbo), el gradiente de las anomalías de Bouguer, la anomalía de la gravedad en la reducción de Bouguer y los valores de la altura de la superficie terrestre.

El mapa de Salcedo (1992, 1993) muestra que los posibles sismos más fuertes, con $M_{\text{máx}} > 7,5$, se esperarían en la región del Chocó. Con valores de la $M_{\text{máx}} > 7,0$ se esperarían al este de la zona del Chocó, en la Cordillera Occidental, en la región de Nariño y en la zona norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Sin embargo, el mapa no muestra las altas magnitudes que ya se han presentado en la zona de Tumaco y en la frontera con Ecuador, con magnitudes M_w de hasta 8,6 en 1906 (Alfaro, 2011, 2012).

La recomendación de Stein *et al.* (2011) es hacer una mirada retrospectiva y comparar los mapas de aceleraciones de pronóstico con las aceleraciones registradas, que no es otra cosa que aplicar el método científico, en el que se compara el valor del modelo con los datos registrados. En el caso de Colombia, se presentan básicamente dos problemas: baja instrumentación de movimiento fuerte y la mayoría de los acelerógrafos están colocados en suelo (Alfaro, 2012). Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido el del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame, Cundinamarca (Ramírez-Landínez, 2009).

El del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales a 13 km del epicentro. Sugito y Taniguchi (1999) realizaron estimaciones de la aceleración en roca y obtuvieron un valor de 217 gales. En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008, se registraron aceleraciones de 605 gales en roca a 9 km del epicentro. Sin embargo, el estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio de AIS (2009) presenta 0,25 g; por lo tanto, el mapa de pronóstico pareciera no reflejar la evidencia instrumental.

Sismicidad instrumental en Colombia

El primer sismógrafo en territorio colombiano fue puesto en funcionamiento en 1922, en el Colegio Mayor de San Bartolomé, Plaza de Bolívar en Bogotá. Ello dio inicio a una red sismográfica que, con el paso del tiempo, ha ido mejorando y se ha vuelto más densa. En 1941 se inauguró el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, que tuvo siete estaciones: Bogotá, Fúquene, Pasto, Chinchiná, Bucaramanga, Galerazamba y Medellín (Ramírez, 1975). Solamente hasta 1993 se puso en funcionamiento la Red Sismológica Nacional, que actualmente cuenta con 18 estaciones de corto periodo y 13 de banda ancha operadas por Ingeominas.

El catálogo sísmico utilizado en esta investigación corresponde a eventos del US Geological Survey (USGS, 2012) y del International Seismological Center (ISC, 2012). El catálogo incluye datos de la Red Sísmica Nacional de Colombia (Díaz-Hernández, 2013).

Ecuaciones de atenuación

Las ecuaciones de atenuación sísmica se desarrollan para estimar la aceleración en función de la magnitud y distancia. Recientemente, se realizó un proyecto denominado Next Generation of Attenuation (NGA). Varios autores desarrollaron ecuaciones de atenuación: Abrahamson y Silva (2008), Boore y Akinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008).

Modelo de Abrahamson y Silva (2008)

El modelo es aplicable para magnitudes entre 5,0 y 8,5, distancias de 0 a 200 km y periodos espectrales entre 0 y 10 s. En lugar de diferenciar entre suelo y roca, el sitio se parametrizó con una velocidad de corte promedio de los 30 m superficiales (V_{s30}) y la profundidad en roca en ingeniería (profundidad para $V_s = 1000$ m/s).

Adicional a la magnitud y el tipo de falla, el término de la fuente depende también de la profundidad de la ruptura: con la misma magnitud y distancia de ruptura, las que son más profundas generan movimientos con periodos cortos más largos que rupturas superficiales. La desviación estándar depende de la magnitud, en la que las magnitudes más pequeñas llevan a desviaciones estándares mayores.

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(\hat{PGA}_{1100}, V_{s30}) + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30})$$

Donde:

$f_1 M$ es una función que depende de la magnitud y la distancia del sismo.

R_{jb} es la distancia mínima horizontal a la superficie de la proyección de ruptura en km.

R_{rup} es la distancia más cercana al plano de ruptura en km.

R_x es la distancia horizontal desde el borde de la ruptura al sitio de interés.

Z_{TOR} es la profundidad desde el borde de la ruptura.

W es la longitud inclinada del ancho de la ruptura.

M es el momento de magnitud.

F_{RV} es una variable indicadora que representa fallas inversas e inversas oblicuas.

F_{NM} es una variable indicadora para fallas normales y normales oblicuas con ángulo Rake entre -150° y -30° . Si es cualquiera de las dos fallas, vale 1.

F_{AS} es un indicador de una réplica o del evento sísmico principal. Si es réplica, vale 1; en caso contrario vale 0.

PGA_{1100}, V_{S30} es la aceleración máxima del suelo con $V_{S30} = 1100ms$; V_{S30} es la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad del sitio de interés y expresada en m/s.

$f4(R_{ip}, Z_{TOR}, M)$ es una función que tiene en cuenta el efecto de *hanging wall*, que es bloque levantado, bloque alzado o bloque colgante. Corresponde a la ladera que está por encima de una falla inclinada. En contraste, se tiene lo que se denomina *footwall*.

$f6(Z_{TOR})$ es un factor que tiene en cuenta la profundidad desde el borde hasta la cima (ver figura 6.1). Viene expresada en la ecuación (6-8) o (6-9), dependiendo del valor de Z_{TOR}

$f8 R_{rup}$ es una función de escalamiento para grandes distancias al lugar de ubicación de la falla.

$f10(Z_{1.0}, V_{S30})$ es un factor que toma en cuenta el tipo de suelo del sitio de interés, donde $Z_{1.0}$ es la profundidad en la cual se tiene una velocidad de onda de corte de $V_S = 1000 m/s$.

Modelo de Boore y Atkinson (2008)

El modelo es función de la magnitud, de la distancia, de la velocidad de corte promedio y del tipo de falla. Las ecuaciones dan como resultado la aceleración pico del terreno (PGA), la velocidad pico (PGV) y el pseudoespectro de aceleración absoluta (PSA) para periodos entre 0,01 y 10 segundos. Para periodos menores a 1 segundo, el análisis utilizó 1574 registros de 58 eventos en un rango de distancias entre 0 y 400 km. Las variables primarias son la magnitud momento M , la distancia más cercana de la proyección del plano de falla R_{JB} y la velocidad de corte de los últimos 30 metros (V_{s30}). Las ecuaciones son aplicables para $M = 5-8$, R_{JB} menor de 200 km y V_{s30} entre 180 y 1300 m/s:

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sat}$$

Donde f_{mag} es el término en el cual se relaciona a la magnitud y su valor depende del rango de magnitud por ser analizado. Así, se tiene:

$$f(mag) = \begin{cases} c_0 + c_1 M; & M \leq 5,5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5,5); & 5,5 < M \leq 5,5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5,5) + c_3 (M - 6,5); & M > 6,5 \end{cases}$$

El término que depende de la distancia está dado por f_{dist} :

$$f_{dis} = (c_4 + c_5 M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_6^2} \right)$$

El término que relaciona el estilo de falla está dado por:

$$f_{flt} = c_7 F_{RV} f_{flt,z} + c_8 F_{NM}$$

$$f_{flt,z} = \begin{cases} Z_{TOR}; & Z_{TOR} < 1 \\ 1; & Z_{TOR} \geq 1 \end{cases}$$

Donde:

$$F_{RV} = 1 \text{ si } 30^\circ < \tau < 150^\circ$$

$$F_{RV} = 0 \text{ otros valores de } \tau \text{ y}$$

$$F_{MN} = 1 \text{ si } -150^\circ < \tau < -30^\circ$$

$$F_{MN} = 0 \text{ otros valores de } \tau$$

El factor relacionado con la magnitud está dado por:

$$f(hmg, M) = \begin{cases} 0; M \leq 6,0 \\ 2(M-6,0); 6,0 < M < 6,5 \\ 1; M \geq 6,5 \end{cases}$$

La profundidad de ruptura está dada por la siguiente relacion:

$$f(hmg, Z) = \begin{cases} 0; Z_{TOR} \geq 20 \\ \frac{(20 - Z_{TOR})}{20}; 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{cases}$$

El factor relacionado con el promedio del ángulo de ruptura es:

$$f_{hmg, \delta} = \begin{cases} 1, \delta \leq 70 \\ \frac{(90 - \delta)}{20}, \delta > 70 \end{cases}$$

Modelo Campbell y Bozorgnia (2008)

Presentan un modelo para evaluar PGA, PGV, PGD y espectro de respuesta elástico con amortiguamiento del 5 % para un rango entre 0,01 y 10 s. Utilizaron un subconjunto de la base de datos, en la que excluyeron registros que no representaban adecuadamente movimientos de campo libre.

El rango de aplicación es para magnitudes entre 4,0 y 7,5 o 4,0 y 8,5, dependiendo del mecanismo de la fuente, para distancias entre 0 y 200 km. El modelo incluye los efectos de saturación de la magnitud, atenuación dependiente de la magnitud, tipo de falla, profundidad de la ruptura, geometría del bloque de falla (*hanging wall*), respuesta lineal o no lineal del sitio, respuesta 3D del valle y la variabilidad entre eventos:

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{ft} + f_{hmg} + f_{site} + f_{sed}$$

Donde f_{mag} es el término en el cual se relaciona la magnitud y su valor depende del rango de magnitud por ser analizado. Así, se tiene:

$$f(\text{mag}) = \left\{ \begin{array}{l} c_0 + c_1 M; M \leq 5,5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5,5); 5,5 < M \leq 6,5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5,5) + c_3 (M - 6,5); M > 6,5 \end{array} \right\}$$

El término que depende de la distancia está dado por f_{dist} :

$$f_{dis} = (c_4 + c_5 M) \ln(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_6^2})$$

El término que relaciona el estilo de falla está dado por:

$$f_{flt} = c_7 F_{RV} f_{flt,z} + c_8 F_{NM}$$

$$f_{flt,z} = \left\{ \begin{array}{l} Z_{TOR}; Z_{TOR} < 1 \\ 1; Z_{TOR} \geq 1 \end{array} \right\}$$

Donde:

$$F_{RV} = 1 \text{ si } 30^\circ < \tau < 150^\circ$$

$$F_{RV} = 0 \text{ otros valores de } \tau \text{ y}$$

$$F_{MN} = 1 \text{ si } -150^\circ < \tau < -30^\circ$$

$$F_{MN} = 0 \text{ otros valores de } \tau$$

El factor relacionado con la magnitud está dado por:

$$f(hng, M) = \left\{ \begin{array}{l} 0; M \leq 6,0 \\ 2(M - 6,0); 6,0 < M < 6,5 \\ 1; M \geq 6,5 \end{array} \right\}$$

La profundidad de ruptura está dada por la siguiente relacion:

$$f(hng, Z) = \left\{ \begin{array}{l} 0; Z_{TOR} \geq 20 \\ \frac{(20 - Z_{TOR})}{20}; 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{array} \right\}$$

El factor relacionado con el promedio del ángulo de ruptura es:

$$f_{hng,\delta} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \delta \leq 70 \\ \frac{(90 - \delta)}{20}, \delta > 70 \end{array} \right\}$$

Modelo Chiou y Youngs (2008)

Las ecuaciones proveen aceleración pico, velocidad pico y aceleración pseudoespectral para un amortiguamiento del 5% en un rango entre 0,01 y 10 s. El modelo es una actualización de la ecuación de Sadigh *et al.* (1997). Incluye efectos de sitio representados por funciones suavizadas de la velocidad de corte de los primeros 30 metros (V_{s30}) y del espesor del sedimento:

$$\ln(y) = c_2(T) \times M + c_3(T) * (m_c - M)^n$$

Donde los coeficientes C_3 y C_2 varían con el periodo espectral T , el exponencial n está en el rango de 2 a 3 y el coeficiente mc es independiente de T .

Los parámetros involucrados en la descripción del modelo son:

M : magnitud de momento.

R_{RUP} : distancia más cercana al plano de ruptura (km).

R_{JB} : distancia Joyner-Boore (km).

F_{HW} : factor de *hanging-wall*, 1 para $R_{JB} \geq 0$ y $R_{JB} < 0$

δ : ángulo de buzamiento de la falla.

Z_{TOR} : profundidad del tope del plano de ruptura (km).

F_{RV} : factor de fallamiento normal.

F_{NM} : factor de fallamiento inverso.

F_{AS} : factor de réplicas, 1 para las réplicas y 0 para las otras.

V_{s30} : velocidad promedio a una profundidad de 30 m (m/s).

Z_n : profundidad en la cual la velocidad de la onda alcanza n km/s (m).

C_n : valores de constantes predeterminadas.

Modelo Idriss (2008)

El modelo se aplica para sitios en los que V_{s30} está entre 450 y 900 m/s, para $V_{s30} > 900$ m/s y para $V_{s30} < 180$. Es decir, en el artículo de Idriss (2008) no está definida para el intervalo entre 180 y 450 m/s.

Los valores medios de PGA y PSA para cortos periodos son del orden de entre 15% y 20% más bajos para fallas de rumbo y entre 30% y 40% menores para eventos de fallas inversas que los calculados con ecuaciones anteriores a NGA. La diferencia disminuye significativamente para periodos largos. Los valores mínimos de los términos de error estándar (para magnitud momento $M \geq 7,5$) son aproximadamente de entre 15% y 30% mayores, y los valores máximos de los términos de error estándar (para $M \leq 5,0$) son aproximadamente de entre el 2% y el 12% mayores que los valores anteriores a NGA.

Las ecuaciones son aplicables para fallas de rumbo, inversas y normales; para magnitudes entre 5,0 y 8,5 (fallas de rumbo); para magnitudes entre 0,5 y 8,0 (para fallas inversas) y distancias entre 0 y 200 km:

$$\ln[PSA(T)] = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M - [\beta_1(T) + \beta_2(T)M] \ln(R_{rup} + 10) + \gamma(T)R_{rup} + \varphi(T)F$$

Las variables incluidas en la ecuación anterior son para definir la pseudoaceleración para un periodo T , cuyas variables son:

M : magnitud momento.

R_{RUP} : distancia más cercana al plano de ruptura (km).

$\gamma(T)$: factor de ajuste de la distancia en función (T).

$\varphi(T)$: factor de mecanismo de origen (o tipo de fallas).

F : se refiere al mecanismo de falla asignado.

$\alpha_n(T)$, $\beta_n(T)$: parámetros obtenidos de un proceso de regresión.

Para curvas de atenuación de los diferentes autores para una misma magnitud de sismo, se observan diferencias en cuanto a valores de aceleración en los primeros

10 km de distancia a partir del epicentro. Los resultados obtenidos por el modelo Boore y Atkinson (2008) se alejan de los otros modelos.

Se presenta mayor atenuación sísmica en los modelos presentados por Campbell y Bozorgnia (2008) e Idriss (2008), a medida que aumenta la magnitud del sismo. Por el contrario, el modelo de Boore y Atkinson (2008) presenta una mayor atenuación de energía para cortas distancias. Esto implica que este modelo tiene una tendencia menos conservadora (Díaz-Hernández, 2013). Es importante recordar las conclusiones de Alfaro (2013), debido a la gran dependencia del valor obtenido de PGA como función de la ecuación de atenuación utilizada.

Curvas de amenaza

Usando las ecuaciones de atenuación, se puede estimar la distancia a la cual se pueden producir aceleraciones dadas para magnitudes dadas. Para determinar la curva de amenaza sísmica, se procede a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por unidad de área. Finalmente, el total de la tasa media anual de ocurrencia del movimiento sísmico mayor que una aceleración dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes (Hanks y Cornell, 1994).

Es importante informar que en esta investigación no se realizó ningún tipo de análisis de completitud de los datos de los sectores analizados (40 en total para cada ecuación de atenuación). Efectos importantes en el valor de la PGA, teniendo en cuenta la completitud del catálogo, se pueden observar en Alfaro (2013) para la ciudad de Neiva.

Determinación de las aceleraciones pico del terreno (PGA)

La aceleración máxima del terreno es una medida de la aceleración del suelo y un parámetro de entrada importante para la ingeniería sísmica.

Desviación estándar

La evaluación de la PGA incluye generalmente la evaluación del valor medio más una desviación estándar. Por tanto, en este artículo se evaluaron las desviaciones estándar para las ecuaciones de Abrahamson y Silva (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008).

De acuerdo con la metodología de Hanks y Cornell (1994), en la evaluación de las curvas de amenaza sísmica, los valores corresponden a una sumatoria que depende directamente del número de sismos de cada magnitud, de la distancia al cuadrado, inversamente proporcional al área estudiada e inversamente a la ventana de tiempo. En esta investigación se evaluó la desviación estándar para cada aceleración y para cada zona de acuerdo con el número de sismos de cada magnitud, como muestra la ecuación (1):

$$\sigma = \frac{\sum n_i \sigma_i}{N} \quad (1)$$

En los casos de Boore y Atkinson (2008) y Campbell y Bozorgnia (2008) no es necesario, ya que en estos dos casos la desviación estándar es independiente de la magnitud. Los cálculos se realizaron con los programas desarrollados por Al Atik (2009). Las figuras 1 a 3 muestran la variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia (Díaz-Hernández, 2013). Esta forma ponderada de calcular la desviación estándar para determinar las curvas de amenaza sísmica es uno de los aportes importantes de esta investigación (Díaz-Hernández, 2013; Díaz-Hernández y Alfaro, 2014).

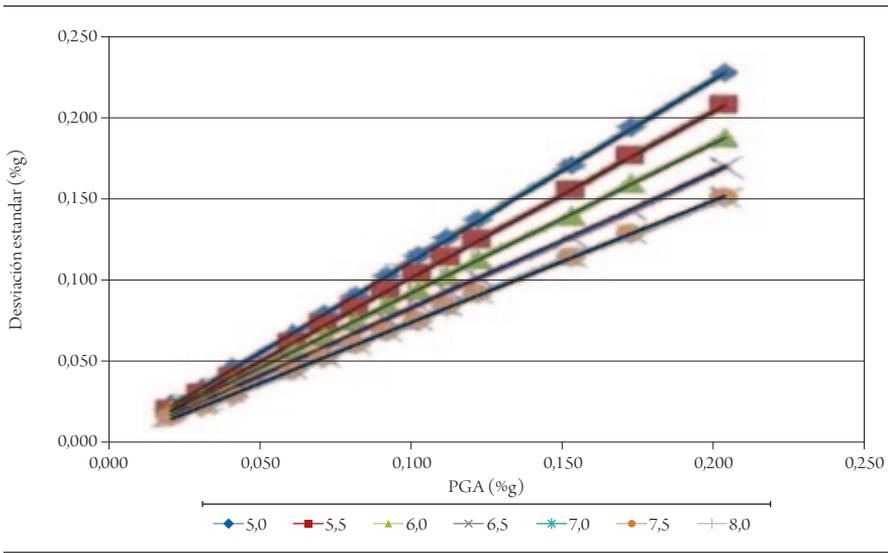


Figura 1. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia (modelo AS08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

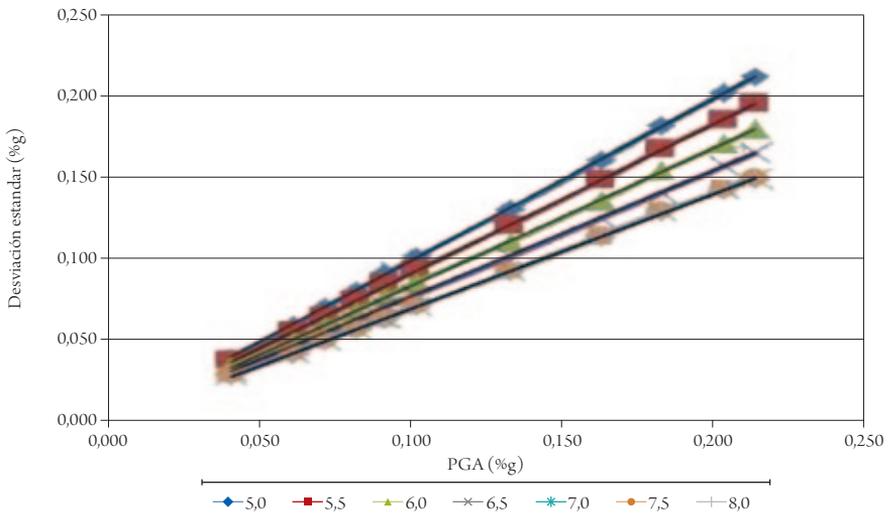


Figura 2. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia (modelo CY08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

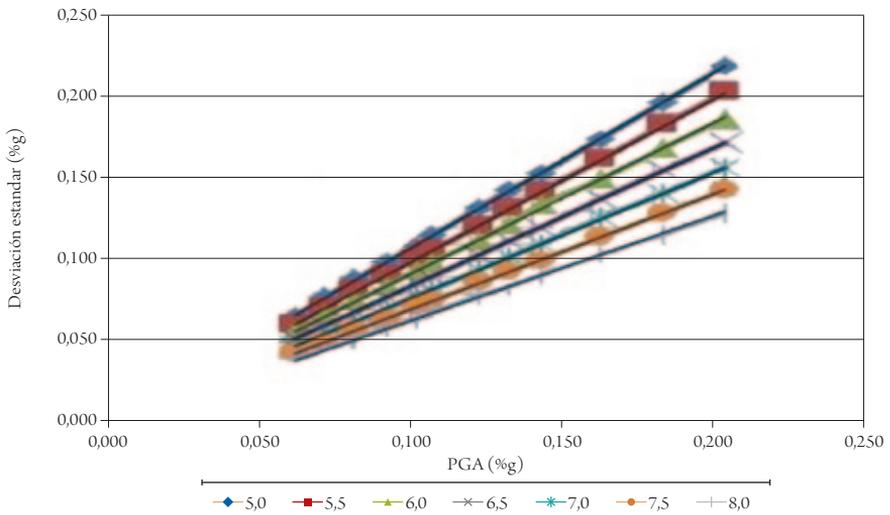


Figura 3. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia (modelo I08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

Como se puede observar, el papel de la desviación estándar es fundamental, ya que tiene un valor que puede ser igual o mayor que el valor de la PGA.

Análisis de resultados

Las figuras 4 a 8 muestran los valores de isoaceleración para un periodo de retorno de 475 años, obtenidos a partir del valor medio de PGA más una desviación estándar. Hay zonas a las que, desde el punto de vista probabilístico, no se les puede asignar ningún valor, porque el número de datos es bajo o nulo (Alfaro, 2011, 2012; Díaz-Hernández, 2013). Los resultados en cada uno de los nodos representan valores de las aceleraciones de acuerdo con el modelo de sismicidad y las ecuaciones de atenuación aplicadas en cada zona sísmica.

La figura 4 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de AS08. En el mapa es posible observar un punto de aceleración máxima, que es el Chocó, con una aceleración máxima de 400 gales.

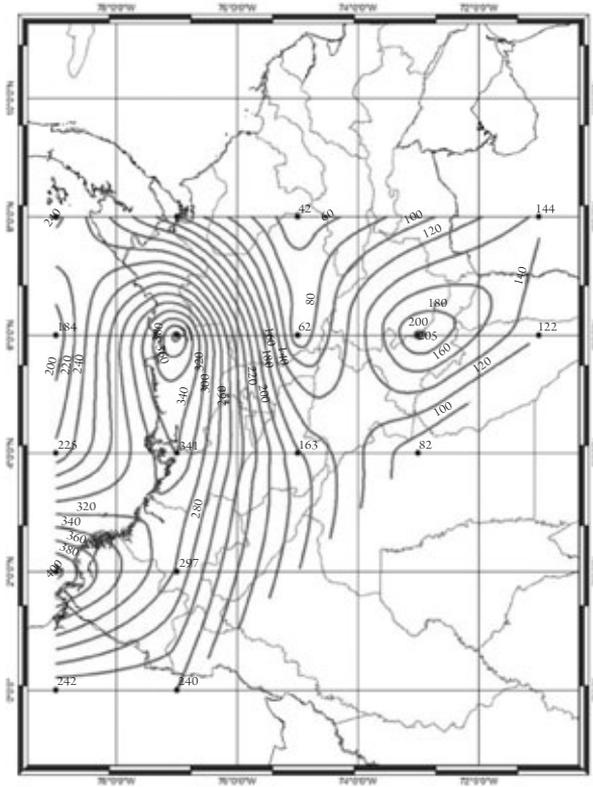


Figura 4. Curvas de isoaceleración para Colombia (modelo AS08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

La figura 5 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de BA08. Es posible observar que el punto de aceleración máxima es de 280 gal en el oeste, atenuándose hacia el este de Colombia afectando específicamente al departamento de Chocó. Las aceleraciones son mayores en el occidente, presentando valores de aceleración de 280 gales.

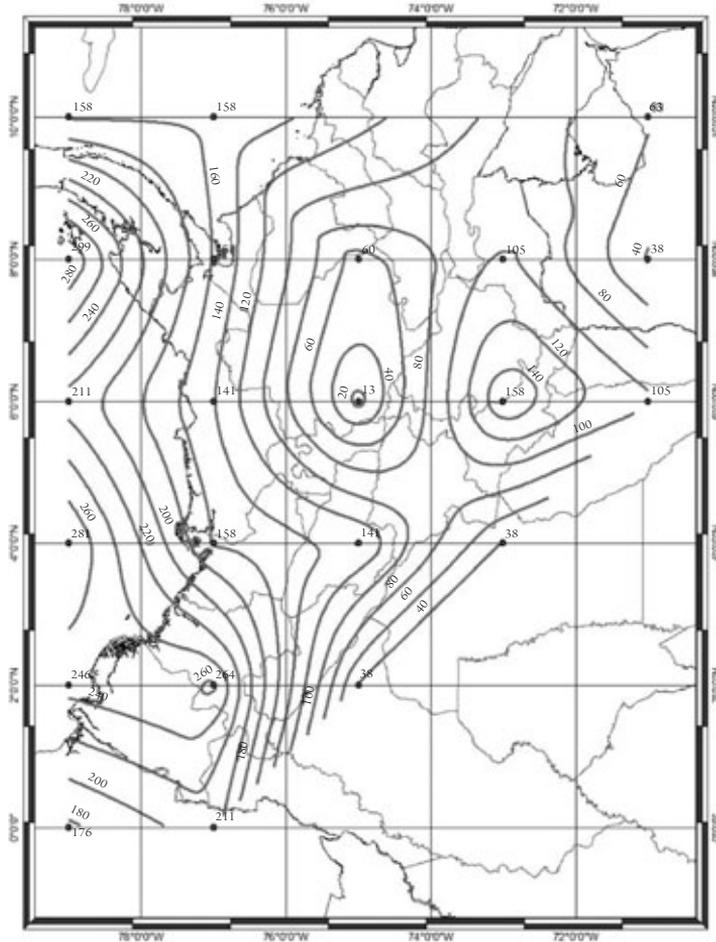


Figura 5. Curvas de isoaceleración para Colombia (modelo BA08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

En Nariño, ubicado en el extremo suroeste de Colombia, se produciría una aceleración de 250 gales. Y en Cauca, localizado hacia el suroccidente de Colombia, la curva de isoaceleración tiene un valor de 220 gales.

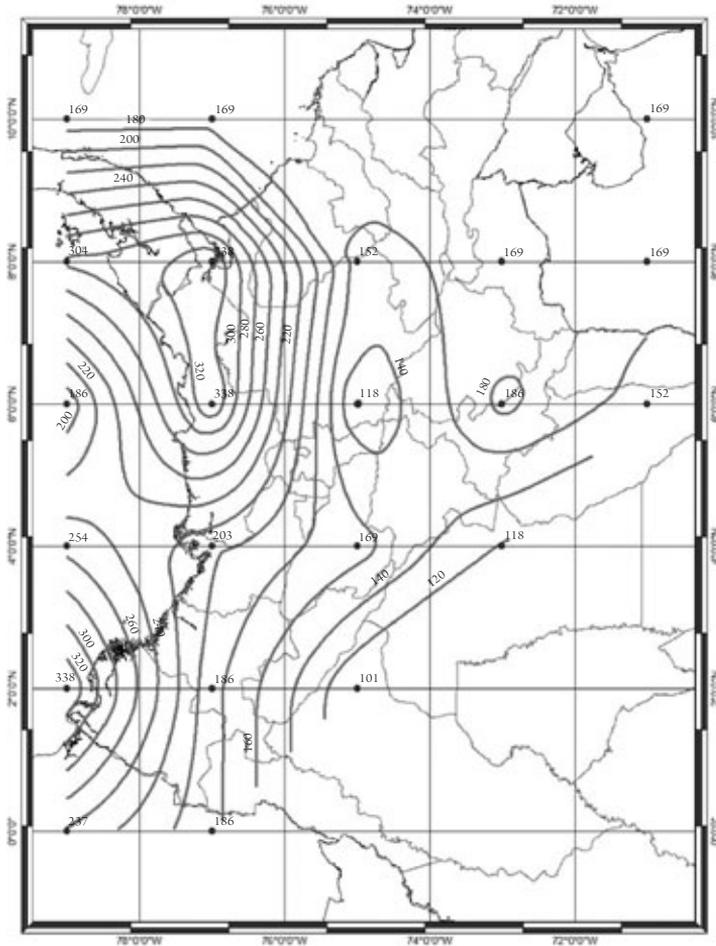


Figura 6. Curvas de isoaceleración para Colombia (modelo CB08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

Las curvas de isoaceleración generadas por el modelo de CB08 presentan valores menores o iguales a 320 gales, ubicados en la zona oeste de Colombia (Chocó), disminuyendo hacia el centro del país.

La figura 7 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de CY08. El mayor valor de aceleración está ubicado en el departamento del Chocó, con un valor de 400 gales.

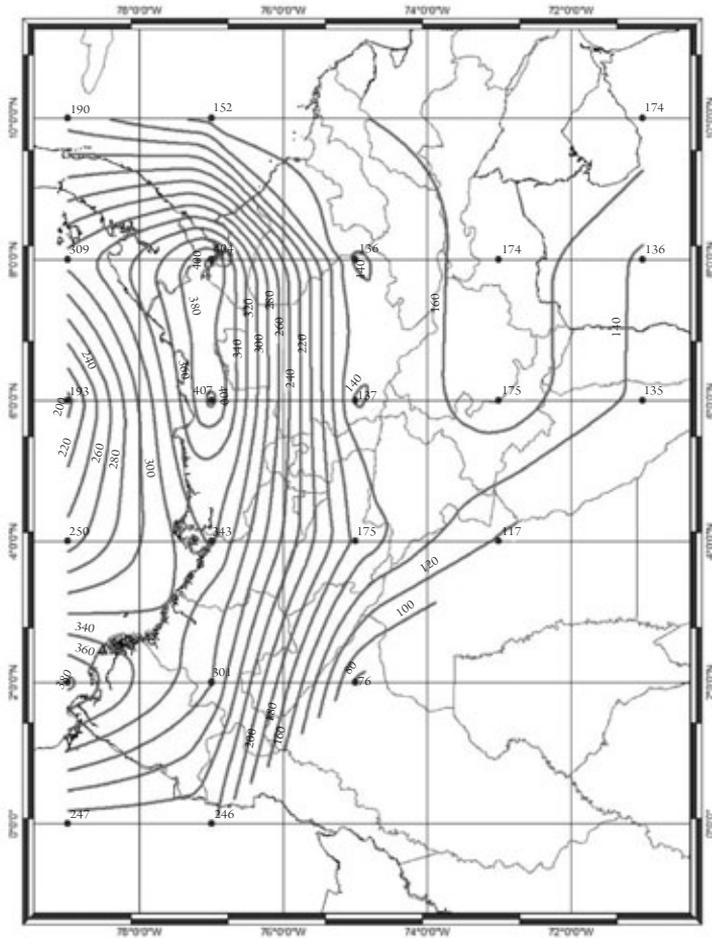


Figura 7. Curvas de isoaceleración para Colombia (modelo CY08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

La figura 8 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo IO8. Se observa que el punto de aceleración máxima es de 380 gales, ubicado en los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó. Las ciudades que se relacionan en la tabla 1 muestran la comparación de la aceleración máxima (A_a) con el Decreto 1400/84, la NSR 98, la NSR 10 y los resultados de este estudio (Díaz-Hernández, 2013).

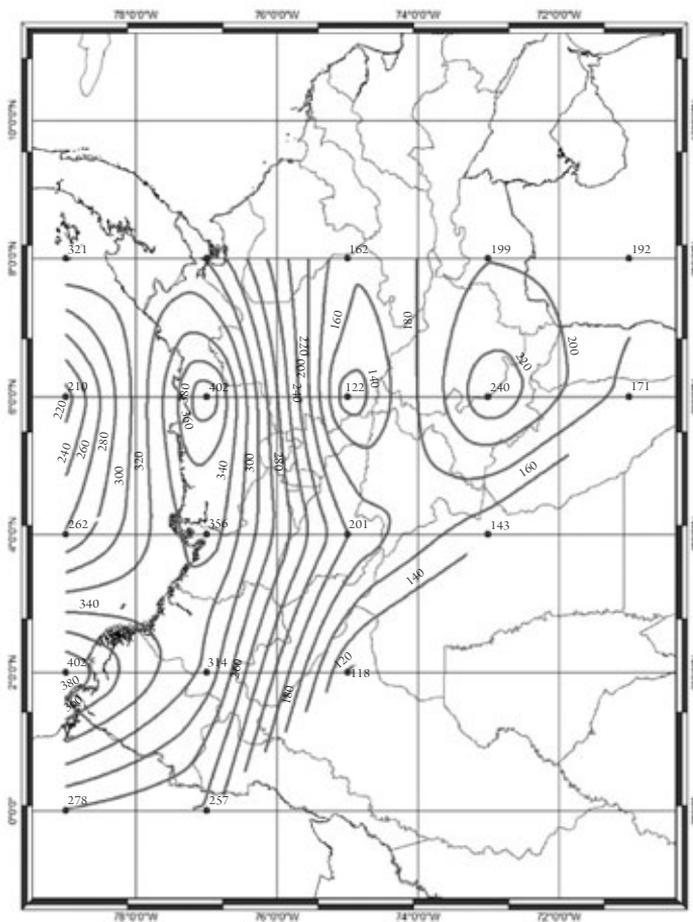


Figura 8. Curvas de isoaceleración para Colombia (modelo I08)

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

Es importante resaltar la dependencia tan grande que existe entre la ecuación de atenuación utilizada y el resultado obtenido. En el caso del Proyecto NGA (2008), los diferentes grupos de trabajo recibieron la misma base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER, 2009) y la sugerencia de la misma estructura de ecuación. A pesar de ello, las ecuaciones resultantes y los valores obtenidos en la práctica son bastante disimiles.

Tabla 1. Comparación de los valores de la aceleración pico efectiva para diseño (A_a) para ciudades capitales de departamentos de Colombia

CIUDAD DE COLOMBIA	DECRETO 1400/84	NSR 98	NSR 10	ESTE ESTUDIO				
				AS08	BA08	CB08	CY08	I08
Aa (% G)								
Arauca	0,15	0,15	0,15	0,14	0,10	0,16	0,14	0,18
Armenia	0,25	0,25	0,25	0,22	0,12	0,18	0,20	0,26
Bogotá	0,15	0,20	0,15	0,12	0,08	0,14	0,14	0,18
Bucaramanga	0,25	0,25	0,25	0,20	0,14	0,18	0,16	0,22
Cali	0,25	0,25	0,25	0,30	0,16	0,20	0,30	0,30
Cúcuta	0,25	0,30	0,35	0,14	0,10	0,16	0,17	0,20
Florencia	0,20	0,20	0,20	0,22	0,12	0,14	0,16	0,18
Ibagué	0,20	0,20	0,20	0,22	0,14	0,16	0,20	0,26
Manizales	0,25	0,25	0,25	0,20	0,08	0,18	0,22	0,26
Medellín	0,15	0,20	0,15	0,30	0,14	0,28	0,34	0,34
Mocoa		0,30	0,30	0,24	0,22	0,18	0,26	0,28
Neiva	0,20	0,30	0,25	0,24	0,16	0,16	0,20	0,26
Pasto	0,25	0,30	0,25	0,38	0,24	0,30	0,36	0,36
Pereira	0,25	0,25	0,25	0,26	0,10	0,18	0,26	0,28
Popayán	0,20	0,25	0,25	0,30	0,26	0,24	0,30	0,30
Quibdó	0,30	0,30	0,35	0,40	0,16	0,32	0,40	0,38
Tunja	0,15	0,20	0,20	0,20	0,14	0,18	0,16	0,22
Villavicencio	0,20	0,30	0,35	0,14	0,08	0,12	0,13	0,16
Yopal		0,20	0,30	0,14	0,10	0,16	0,14	0,18

Fuente: Díaz-Hernández (2013).

Adicionalmente, y a pesar de que el catálogo no fue completado, algunos de los resultados son mayores que los de la norma vigente. Variaciones drásticas se pueden observar, como es el caso de los resultados para Neiva (Alfaro, 2013).

Es importante prestar atención a los valores obtenidos para la ciudad de Medellín: la norma NSR-10 redujo los valores de 0,20 g a 0,15 g; sin embargo, en este estudio, y a pesar de no tener completitud del catálogo, los valores son de AS = 0,30 g; BA = 0,14 g; CB = 0,28 g; CY = 0,34 g e I = 0,34 g.

Como lo había presentado Alfaro (2011, 2012), hay zonas en las que no se puede hacer análisis probabilístico, debido a la escasez de datos. Para superar este vacío, Herrera (2013) propone una metodología novedosa para hacer una analogía geológica y sísmológica de fallas ampliamente conocidas, con el fin de utilizar la ley de recurrencia y llenar el vacío de información.

En la NRS-10 se realizó un análisis de la máxima aceleración horizontal en cada una de las capitales de departamento, inferida de la localización y magnitud de los sismos en el catálogo de eventos, empleando la metodología de Gallego (2000). Estos valores fueron utilizados posteriormente como parte de la información utilizada en la producción de los mapas definitivos que se incluyen en el reglamento NRS-10.

Al comparar los valores de Aa entre la NSR 98 y la NSR 10, se tiene que para las ciudades como Bogotá, Medellín, Neiva y Pasto, el valor disminuyó 0,05 g; mientras que para las ciudades de Cúcuta, Quibdó y Yopal, el Aa aumentó en 0,05 g, exceptuando Yopal, que aumentó 0,10 g.

Discusión y conclusiones

Desde los años setenta se han elaborado en Colombia varios mapas de amenaza sísmica con diferentes aproximaciones, como los de Estrada y Ramírez (1977), AIS (1984, 1996, 2009), Salcedo (1992, 1993), Ceresis (1996), Gallego (2000), Alfaro (2011, 2012) y Díaz-Hernández (2013), todos ellos con sus fortalezas y debilidades. A la luz de eventos catastróficos relativamente recientes, como el sismo de Haití del 2010 (Alfaro y Van Hissenhoven, 2010) y el sismo de Tohoku (Japón) del 2011 (Stein y Okal, 2011), y atendiendo la sugerencia de Stein *et al.* (2011) de realizar una mirada retrospectiva y objetiva a los pronósticos, resulta importante ver cómo la norma sismorresistente vigente NSR-10 pareciera hacer caso omiso de las evidencias instrumentales e históricas de los sismos del Eje Cafetero de 1999 y de Quetame de 2008 (Alfaro, 2011, 2012; Correa y Alfaro, 2011).

Los datos analizados fueron de 1960 al 2012, ya que presentan una distribución temporal aproximadamente de tipo Poisson. Los sismos corresponden a profundidades menores de 100 km y magnitudes M_s mayores a 5. La unificación de escalas de magnitud se realizó con los estudios de Utsu (2002).

Se realizó un análisis de cinco ecuaciones de predicción de movimiento de suelo, las cuales fueron elegidas porque se encuentran dentro de proyectos científicos importantes, el catálogo para su generación es muy extenso, se encuentran publicadas en revistas científicas reconocidas y han sido utilizadas para otros estudios internacionales.

Algo que no estaba previsto al inicio de la investigación fue la importancia de la inclusión de la desviación estándar en los resultados, y en tres de los cinco casos, esta es función de la magnitud y de la aceleración, lo cual implicó realizar cálculos adicionales (Díaz-Hernández, 2013). Como se observó previamente, los valores de la desviación estándar pueden ser iguales a los de la PGA, mostrando la gran incertidumbre en dicha evaluación. Por otra parte, las ecuaciones son válidas para magnitudes entre 5 y 8, de tal forma que el catálogo colombiano se redujo de manera importante.

De los mapas de aceleraciones se puede observar una regionalización de dichos parámetros: se concentran los máximos valores sobre la parte de la costa Pacífico y van decreciendo hacia el centro de Colombia. De la misma manera, la parte suroeste (Nariño) presenta altos valores y tiende a decrecer hacia la dirección este.

Como recomendación final es importante señalar que Delavaud *et al.* (2012) concluyeron que las ecuaciones de Kanno *et al.* (2006), Cotton *et al.* (2008) y Chiou *et al.* (2010) son las más robustas del mundo; por tanto, sería conveniente realizar el análisis con dichas ecuaciones y ver las variaciones que se presentan en los valores de PGA para Colombia.

Agradecimientos

Las figuras de isoaceleración fueron realizadas con la ayuda del estudiante de Maestría en Geotecnia de la Universidad Industrial de Santander, el ingeniero Jorge Alberto Armenta Jiménez. La herramienta computacional desarrollada por Al Atik (2009) fue invaluable en el desarrollo de este proyecto. Finalmente, agradecemos a los dos evaluadores anónimos que tuvieron la paciencia de leer el manuscrito inicial y hacer las recomendaciones para mejorarlo.

Referencias

- Abrahamson, N. y Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson y Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97.
- Aguiar, R. y Haro, A. (2000). Zonificación sísmica en países bolivarianos. *Boletín Técnico IMME*, 38(3), 27-41.
- Al Atik, L. (2009). Calculation of weighted average 2008 NGA models. Recuperado de <http://peer.berkeley.edu/>
- Alfaro, A. (2011). Dificultades en los estudios probabilísticos de amenaza en Colombia debido a la escasez de datos instrumentales. *Épsilon*, 17, 45-59.
- 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. (2013). Evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. *Épsilon*, 20, 145-158.
- Alfaro, A. y Van Hissenhoven, R. (2010) Sismo de Haití: aspectos sismológicos. *Épsilon*, 14, 113-120.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1984). *Estudio general del riesgo sísmico de Colombia*. Bogotá: Autor.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: Autor.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ASÍ) (1998). NSR-98. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente. Recuperado de <http://curadorunoibague.com.co/portal/attachments/article/231/tituloa.pdf>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: Autor.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2010). NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente. Recuperado de camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/NSR-10_diario_oficial_26marzo10.pdf
- 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, 99-138.
- Campbell, K. 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 ranking from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24, 139-171.
- Centro Regional de Sismología para América del Sur (Ceresis) (1996). *Mapa probabilístico de peligro sísmico de Sudamérica*. Autor.

- Chiou, B. y Youngs, R. (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24, 173-215.
- Correa, M. y Alfaro, A. (2011). Necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a raíz del sismo de Tohoku del 2011. *Tecnura*, 15(30), 82-92.
- Cotton F., G. Pousse, F. Bonilla, y F. Scherbaum (2008). On the Discrepancy of Recent European Ground-Motion Observations and Predictions from Empirical Models: Analysis of KiK-net Accelerometric Data and Point-Sources Stochastic Simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (5), 2244–2261, doi: 10.1785/0120060084
- Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N. y Allen, T. (2012). Testing the global applicability of ground motion prediction equations for active shallow crustal regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 707-721.
- Díaz-Hernández, D. M. (2013). *Incidencia de la utilización de la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA) en los valores máximos de aceleración sísmica pico (PGA) en Colombia* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Díaz-Hernández, D. y Alfaro, A. (2014). Mapa de isoaceleración para Colombia utilizando la Nueva Generación de Ecuaciones de Atenuación (NGA 2008). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 93, 45-56.
- Estrada, G. y Ramírez, J. E. (1977). *Mapa de riesgo sísmico para Colombia*. Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos y Pontificia Universidad Javeriana.
- Felzer, K. (2006). *Calculating the Gutenberg-Richter b value*. Recuperado de <http://pasadena.wr.usgs.gov/office/kfelzer/AGU2006Talk.pdf>
- Gallego, M. (2000). *Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia* (tesis de maestría). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goberna, J. R. (1988). The historical seismograms of Colombia. En *Historical seismograms of the World*. San Diego: Academic Press.
- Hanks, T. C. y Cornell, C. A. (1994). Probabilistic seismic hazard analysis: a beginner's guide. En *Proceedings of the Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*. Carolina del Norte: North Carolina State University.
- Herrera, P. (2013). *Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Idriss, I. (2008). An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 24, 217-242.
- International Seismological Centre (2012). On-line bulletin. Recuperado de: <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom

- Kanno T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, y Y. Fukushima (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (3), 879-897. doi: 10.1785/0120050138
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2008). Berkeley Database. Recuperado de www.peer-berkeley.edu.
- Ramírez, J. E. (1933). Earthquake history of Colombia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 23, 13-22.
- Ramírez, J. E. (1971). The destruction of Bahía Solano, Colombia, on September 26, 1970 and the rejuvenation of a fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61, 1041-1049.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ramírez J. E. y Goberna, J. R. (1980). *Terremotos colombianos noviembre 23 y diciembre de 1979* (informe preliminar). Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos.
- Ramírez-Landínez, A. C. (2009). *Análisis sísmológico del evento del 24 de mayo de 2008 en Quetame (Cundinamarca) y sus réplicas* (tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Sadigh, K., Chang, C. Y, Egan, J. A., Makdisi, F. I. y Youngs, R. R. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California Strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189.
- Salcedo, E. (1992). *Sismicidad y amenaza sísmica en Colombia* (tesis doctoral). Moscú: Universidad Estatal Lomonosov.
- Salcedo, E. (1993). Mapa de Mmx del territorio de Colombia. En *Memorias del Curso Construcción e Interventoría de la Mampostería Estructural de Colombia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- 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.
- Stein, S. y Okal, E. (2011). The size of the 2011 Tohoku earthquake need not have been a surprise. *EOS*, 92(27), 227-228.
- Sugito, M. y Taniguchi, H. (1999). *Simulation of strong ground motion for the Quindío earthquake. Reconnaissance report on the 1999 Quindío, Central Western Colombia, earthquake and its disasters*. Hiroshi Kagami: Hokkaido University.
- United States Geological Survey (USGS) (2012). Earthquake Hazards Program. Recuperado de http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html
- Utsu, T. (2002). Relationships between magnitude scales. En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* (pp. 733-749). San Diego: Academic Press.

