Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, N.° 93
ISSN 0121-5132 Enero-marzo de 2014, pp. 45-56

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

Isoacceleration maps for Colombia using Next Generation Attenuation Models (NGA-2008)

DIANA MILENA DÍAZ HERNÁNDEZ[1] - ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO[2]

1. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniera Tipiel S.A.
2. Ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Posgrado en Sismología del International Institute on Seismology and Earthquake Engineering. Japón. Investigador del CIEES.

DiDiaz@tipiel.com.co - Alfaro@ciees.org

Recibido: 01/11/2013 Aceptado: 29/11/2013
Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm

Resumen

En este artículo se presentan mapas de isoaceleración de Colombia, para un periodo de retorno de 475 años, evaluados con la metodología probabilística de amenaza sísmica, con un catálogo sísmico de 1960 a 2012, utilizando cinco ecuaciones del "Next Generation of Attenuation Relation Project (NGA)" del año 2008.

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 claves: amenaza sísmica, NGA, Colombia, atenuación.

Abstract

This paper presents isoacceleration maps for Colombia for a 475 years return period. Values were assessed through probabilistic seismic hazard method, using an earthquake database from 1960 to 2012. Authors used five equations from "Next Generation of Attenuation Relation Project" – NGA (2008).

Obtained results for the following cities: Cali, Ibagué, Medellín, Pasto, Pereira, Popayán and Quibdó are larger than the current Colombian earthquake-resistant building code.

Keywords: seismic hazard; NGA; Colombia; attenuation.

INTRODUCCIÓN

Colombia está situada en una zona propensa a los sismos (Ramírez, 1933, 1971, 1975; Goberna, 1988; Salcedo, 1992), con una compleja tectónica debido a la interacción de cuatro placas (Suramérica, Caribe, Nazca y Cocos) que han formado el relieve del territorio. En este artículo se presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica del territorio colombiano, usando las ecuaciones de atenuación correspondientes al NGA (2008), como Abrahamson & Silva (2008), Boore & Atkinson (2008), Campbell & Bozorgnia (2008), Chiou & Youngs (2008), e Idriss (2008), respectivamente.

El objetivo principal es hacer un estudio probabilístico de la amenaza sísmica de Colombia utilizando las ecuaciones de atenuación del "Next Generation of Attenuation Relations Project", cuya primera fase terminó en el año 2008, y comparar los valores obtenidos con las normas NSR-84, NSR-98 y NSR-10.

ANTECEDENTES

En materia de amenaza sísmica para todo el territorio colombiano se han realizado los estudios de Estrada & Ramírez (1977); de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1984); Salcedo (1992, 1993); AIS (1996); Ceresis (1996); Aguiar & Haro (2000); Gallego (2000), AIS (2009), Alfaro (2011, 2012), en los cuales Estrada & Ramírez (1974), al igual que Salcedo (1992), registran valores de magnitudes esperadas, en tanto que los restantes presentan aceleraciones pico esperadas y espectros de diseño.

Los estudios de la AIS (1984, 1996) se sustentaron en modelos de línea fuente, asignándoles a ciertas fallas una sismicidad en un corredor de 60 km de ancho; de esta manera se caracterizaron las fuentes sismogénicas. En el caso de la AIS (1984), se analizaron tres ventanas de tiempo, a saber: 1566-1984, 1922-1984 y 1957-1984, determinando los parámetros de recurrencia para cada falla. La caracterización presenta un inconveniente debido a la gran escasez de datos. Por ejemplo, la falla de Boconó se caracterizó con nueve sismos; la Bolívar, con cuatro; la Bucaramanga-Santa Marta, con veintitrés; Cauca, con seis; Cimitarra, con seis; Cuiza, con cuatro; Espíritu Santo, con seis; Frontal de la cordillera Oriental, con sólo veintidós; Nátaga, con cinco; Oca, con cuatro; Palestina, con cinco; Romeral, con nueve; Salinas, con cuatro, y Sinú, con tres. Por su parte, Felzer (2006) dice que se requieren más de 2000 sismos de buena calidad para caracterizar una fuente.

La ventaja del estudio de Salcedo (1992, 1993) es que se incluyen otros parámetros geofísicos y no se limita a los sismos registrados. Dichos parámetros son los siguientes: tipo de corteza terrestre (continental, oceánica o de transición); fallas geológicas según su morfología y cinemática (inversas, normales, transcurrentes); módulo del gradiente de las anomalías de Bouguer; Anomalía de la gravedad en la reducción de Bouguer y valores de la altura de la superficie terrestre.

En el mapa de Salcedo (1992, 1993) se puede apreciar que los posibles sismos más fuertes con Mmáx > 7,5 se esperarían en la región del Chocó. Valores de la Mmáx > 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. Además, con el valor Mmáx > 6,0 Salcedo (1993) lo toma como el nivel de fondo de sismicidad fuerte a largo plazo en todo el territorio de Colombia. 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 Mw de hasta 8,6 en 1906. También existe el mapa probabilístico para Suramérica realizado por Ceresis (1996), cuyos valores son en general mayores que los de la NSR 10.

La recomendación de Stein et al. (2011), de dar una mirada retrospectiva y comparar el mapa de aceleraciones de pronóstico con las aceleraciones registradas, tiene básicamente dos problemas en el caso de Colombia: baja instrumentación de movimiento fuerte y que la mayoría de los acelerógrafos están colocados en suelo, sin que tengan estación de referencia en roca. 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, 2010).

En el sismo del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales a 13 km del epicentro (Sugito & Taniguchi, 1999), por lo que se hicieron estimaciones de la aceleración en roca y se obtuvo el valor de 217 gales.

SISMOS EN COLOMBIA

Sismicidad instrumental

El primer sismógrafo en territorio colombiano se puso en funcionamiento en el año 1922, lo que dio inicio a una red sismográfica que, con el paso del tiempo, se ha ido mejorando y se ha vuelto más densa. Solamente hasta el año de 1993 se puso en funcionamiento la Red Sismológica Nacional, que cuenta ahora con 18 estaciones de corto periodo y 13 de banda ancha operadas por el Servicio Geológico Colombiano (antes Ingeominas). El catálogo sísmico utilizado en esta investigación corresponde a eventos del USGS (2012), que incluye datos de Sisra y PDE, del Sisra de 1960 a 1981 y del PDE de 1981 a 2012. En el catálogo del PDE se incluyen datos de la Red Sísmica Nacional de Colombia, operada por el Servicio Geológico Colombiano, así como las siguientes variantes:

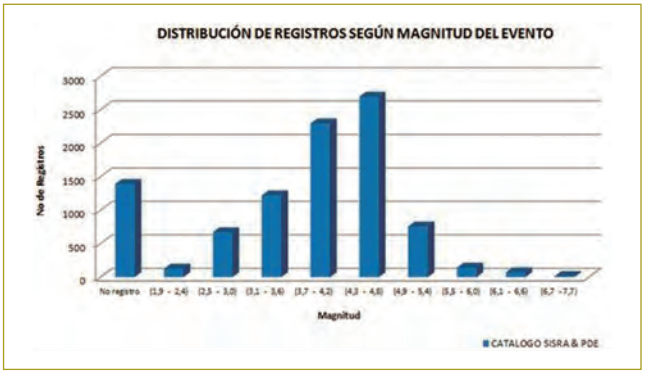

Figura 1. Magnitud vs. número de registros, catálogos Sisra y PDE (Díaz-Hernández, 2013).

Como se puede apreciar (figura 1), el mayor número de registros se ubica entre eventos de magnitudes de 3,7 a 4,8. Esto significa que en el territorio colombiano se presentan sismos menores y ligeros, perceptibles pero con daños poco probables a seres vivos y edificaciones.

A continuación se muestra el número de sismos para los catálogos compilados entre 1960 y 2012, al igual que los valores promedio de la sismicidad en Colombia durante este periodo (figuras 2 y 3). Los datos más representativos son 406 sismos en el año 1979, con magnitudes entre 2 y 7,7; 464 sismos en el año 1991 con magnitudes entre 1,9 y 7,2; 101 sismos con magnitudes iguales o superiores a 6,0; 1 sismo de magnitud igual o superior a 7,5 ocurrido el 12 de diciembre de 1979, con una magnitud de 7,7.

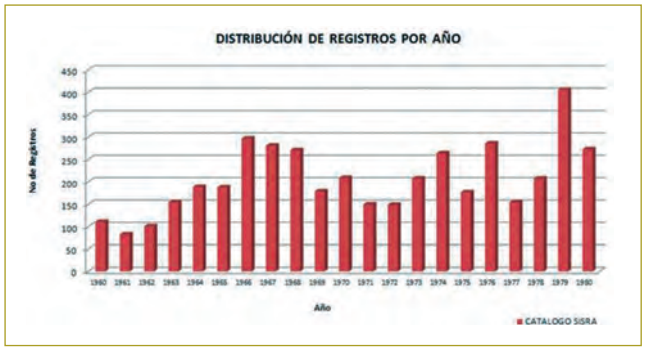

Figura 2. Año vs. número de registros, catálogo Sisra (Díaz-Hernández, 2013).

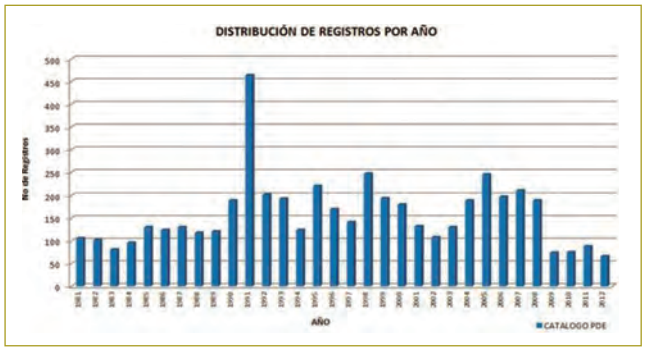

Figura 3. Año vs. número de registros, catálogo PDE (Díaz-Hernández, 2013).

Así mismo, se muestra un comportamiento constante de eventos por año, con excepción de 1979 y 1991, ya que tuvieron 406 y 464 registros, respectivamente (figuras 2 y 3).

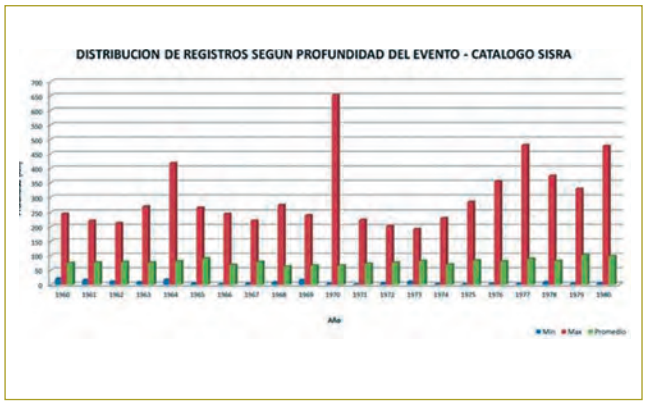

Figura 4. Año vs. profundidad de registros, catálogo Sisra (Díaz-Hernández, 2013).

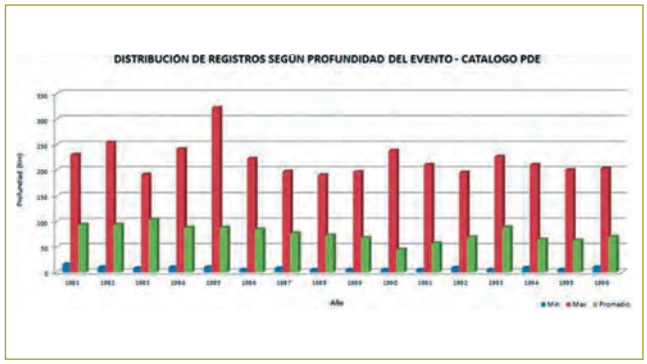

Figura 5. Año vs. profundidad de registros, catálogo PDE (1981-1996).

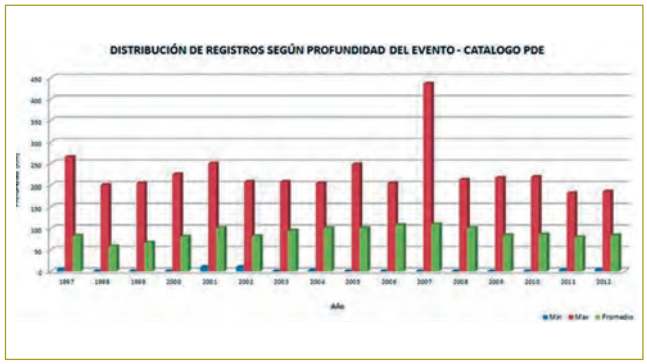

Figura 6. Año vs. profundidad de registros, catálogo PDE (1997-2012) (Díaz-Hernández, 2013).

ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Es la capacidad del terreno para amortiguar el movimiento generado por las ondas sísmicas conforme éstas se alejan del foco sísmico. Cuando se produce un sismo, mientras más lejos se está del epicentro la intensidad del movimiento disminuye, lo que se denomina atenuación del movimiento del suelo, en tanto que mientras más grande sea la distancia hipocentral (sismos profundos), la amplitud del movimiento sísmico decaerá. Las leyes de atenuación sísmica se construyen para estimar Amáx en función principalmente de la magnitud y distancia, lo que implica el cálculo de un conjunto de coeficientes a través de métodos de regresiones. Recientemente se elaboró un proyecto denominado "Next Generation of Attenuation (NGA)" y como parte de éste varios autores desarrollaron ecuaciones de atenuación en términos de la velocidad: Abrahamson & Silva (2008), Campbell & Bozorgnia (2008), Chiou & Youngs (2008), Idriss (2008), Boore & Akinson (2008). Parte de los cálculos se hizo con los programas de Al Atik (2009).

Modelo Abrahamson & Silva (2008)

Este modelo empírico se aplica en sismos que tengan magnitud de 5 a 8,5, distancias entre 0 y 200 km y periodos espectrales de 0-10 s. El sitio se parametriza con la velocidad de corte a 30 m de profundidad (Vs30) y la profundidad de la roca a una Vs de 1000 m/s.

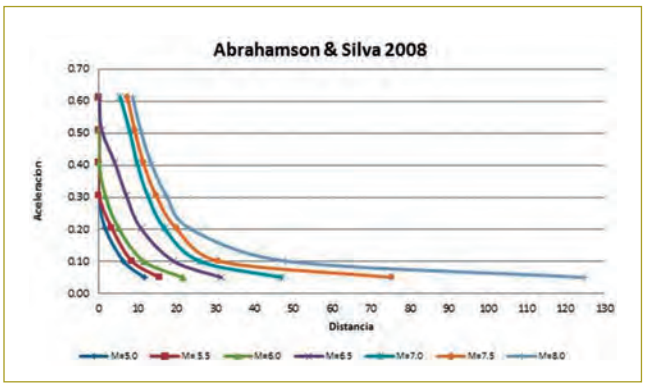

Figura 7. Ecuación de atenuación de Abrahamson & Silva (2008) (Díaz-Hernández, 2013).

Modelo de Campbell & Bozorgnia (2008)

La generación de este modelo se fundamentó en una base de datos mundial de registro de movimientos fuertes.

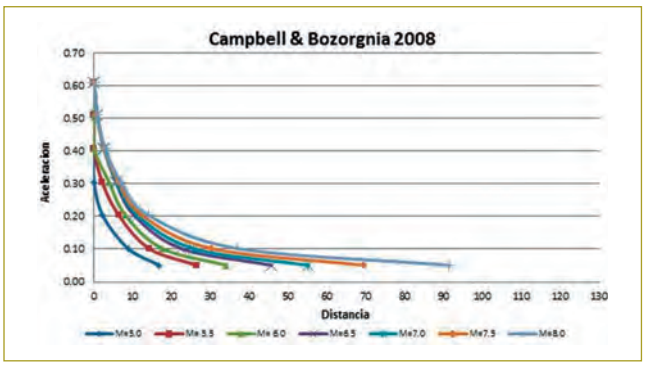

Figura 8. Ecuación de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2008) (Díaz-Hernández, 2013).

Modelo Chiou & Youngs (2008)

Este modelo empírico provee aceleraciones pico, velocidad pico y 5 % de amortiguamiento para periodos espectrales de 0,01 a 10 segundos. La magnitud debe estar comprendida entre 5 y 8,5 para sismos generados

en fallas transcurrentes. La Vs30 debe estar comprendida entre 150 y 1500 m/s, y la distancia a la zona de ruptura debe ser menor de 200 kilómetros.

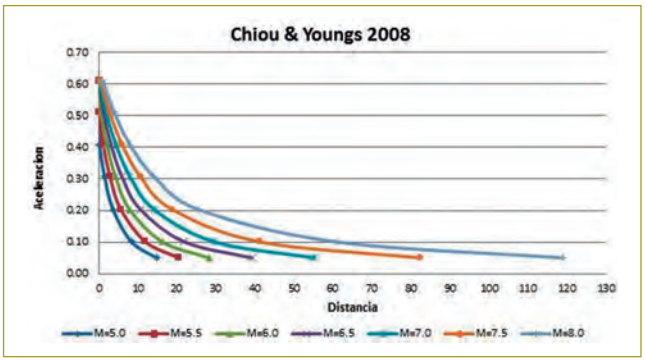

Figura 9. Ecuación de atenuación de Chiou & Youngs (2008) (Díaz-Hernández, 2013).

Modelo Idriss (2008)

Este modelo empírico usado en roca se basa en estimar la aceleración pico horizontal promedio (PGA, por su sigla en inglés) y los valores horizontales promedio de la pseudoabsoluta aceleración para periodos de 0,02; 0,03; 0,04; 0,2; 1 y 3 s. El objetivo de estas curvas NGA es derivar dichos estimados para periodos de 0,01 a 10 s. Este modelo, que toma en cuenta Vs30 en el rango de 450-900 m/s y profundidades en roca, se basa en la aceleración pico promedio y valores medios horizontales para periodos espectrales de 0,01 a 10 segundos. La Vs30 debe estar comprendida entre 450 y 900 m/s.

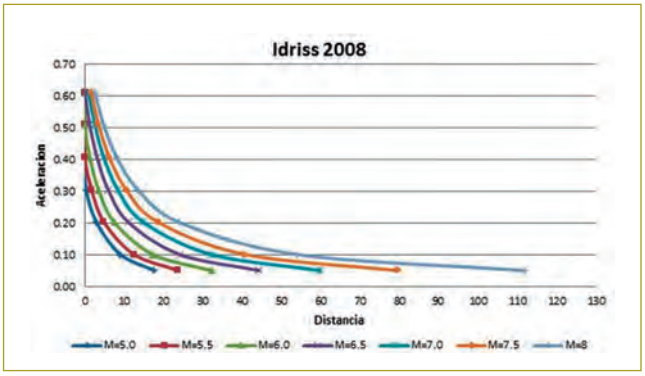

Figura 10. Ecuación de atenuación de Idriss (2008) (Díaz-Hernández, 2013).

Boore & Atkinson (2008)

Estas ecuaciones se desarrollaron por un análisis de regresión del conjunto de datos PEER-NGA, que contiene datos recopilados por sismos fuertes someros en regiones tectónicamente activas en todo el mundo. Los datos de movimientos fuertes son relativamente escasos para eventos con magnitud < 5,5. El estudio por separado de las relaciones de movimientos de suelo que ocurren en las zonas de subducción es importante debido a la alta actividad.

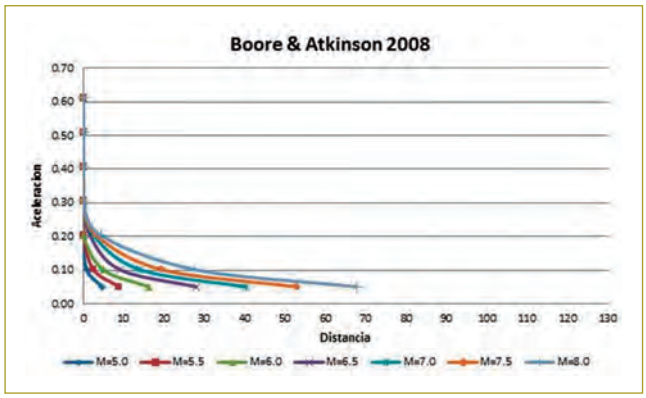

Figura 11. Ecuación de atenuación de Boore & Atkinson (2008) (Díaz-Hernández, 2013).

Para curvas de atenuación de los 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 Boore & Atkinson (2008) se alejan de los otros modelos.

Se presenta mayor atenuación sísmica en los modelos presentados por Campbell & Bozorgnia (2008) e Idriss (2008), a medida que aumenta la magnitud del sismo. Por el contrario, el modelo de Boore & Atkinson (2008) presenta una mayor disipación de energía para cortas distancias, lo que implica que este modelo tiene una tendencia menos conservadora.

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 *a* dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes (Hanks & Cornell, 1994). Las figuras siguientes son del periodo 1960-2012 (figuras 12 a 17). En las abscisas la aceleración es en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años y elaboración propia a través del *software* Gnuplot (Williams & Kelley, 2007).

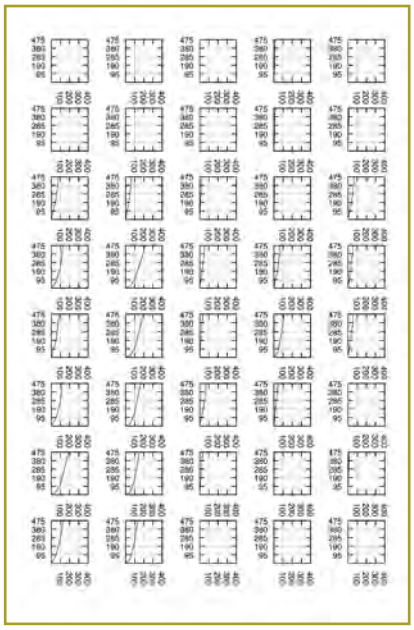

Figura 12. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo AS08 (Díaz-Hernández, 2013).

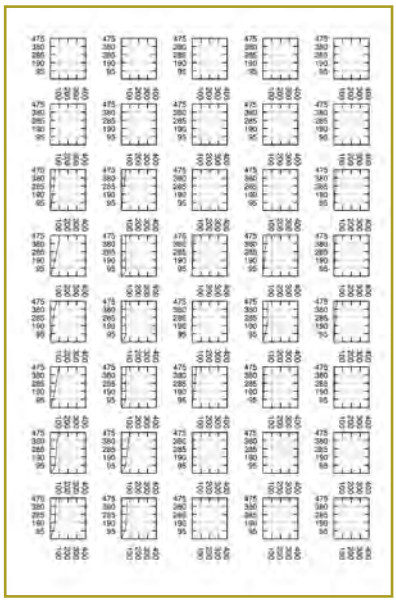

Figura 13. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo BA08 (Díaz-Hernández, 2013).

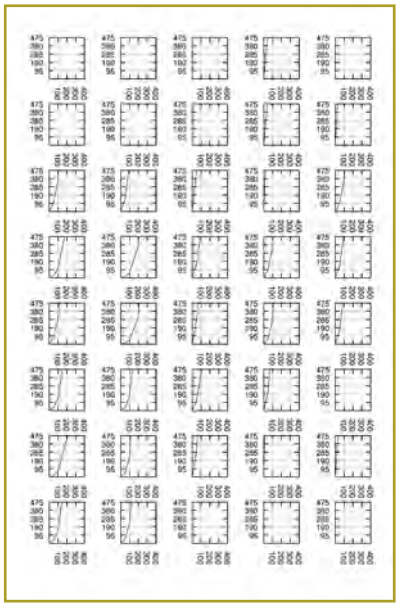

Figura 14. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo CB08 (Díaz-Hernández, 2013).

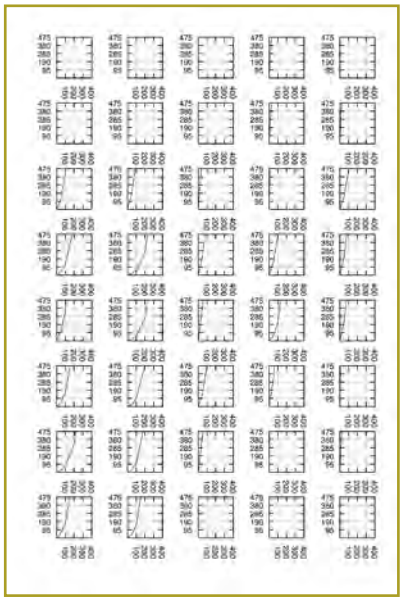

Figura 15. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo CY08 (Díaz-Hernández, 2013).

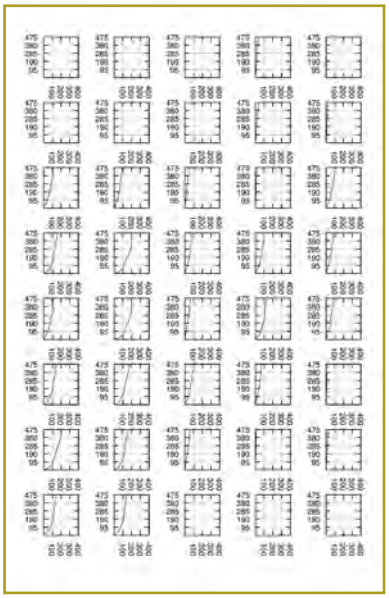

Figura 16. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo I08 (Díaz-Hernández, 2013).

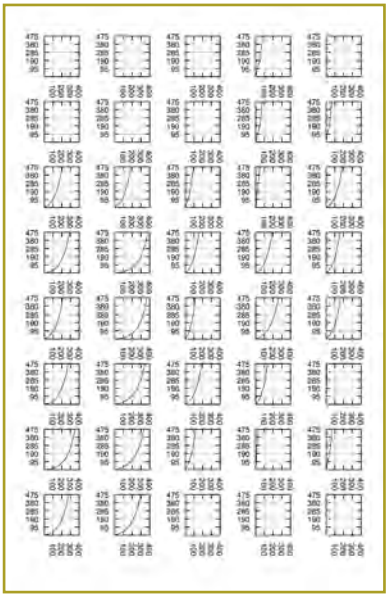

Figura 17. Curva de amenaza sísmica para Colombia, modelo FT 1990 (Díaz-Hernández, 2013).

DETERMINACIÓN DE LAS 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 lo tanto, en este estudio se evaluaron las desviaciones estándar para las ecuaciones de Abrahamson & Silva (2008), Chiou & Youngs (2008) e Idriss (2008). En los casos de Boore & Atkinson (2008) y Campbell & Bozorgnia (2008) no es necesario hacerla, ya que la desviación estándar es independiente de la magnitud. Los cálculos se realizaron con los programas desarrollados por Al Atik (2009). A continuación se muestra la variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia (figuras 18-20) (Díaz-Hernández, 2013).

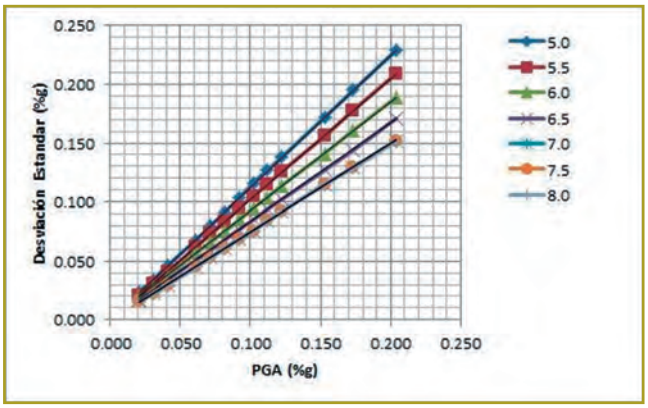

Figura 18. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia, AS08 (Díaz-Hernández, 2013).

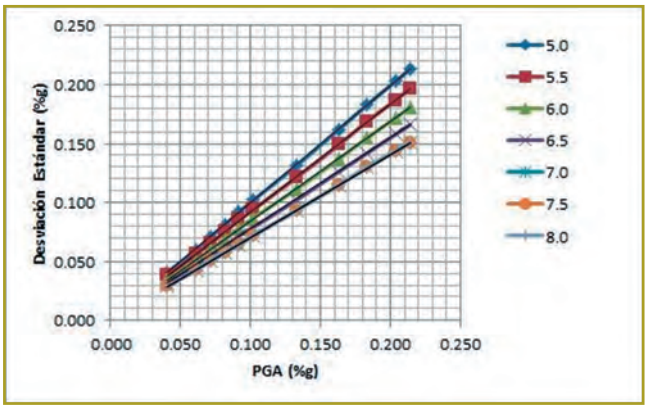

Figura 19. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia, CY08 (Díaz-Hernández, 2013).

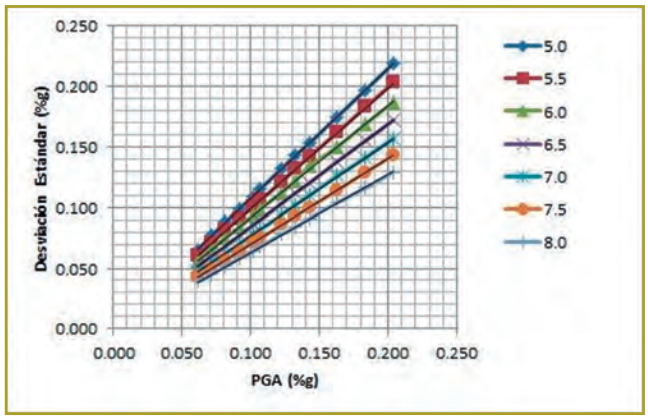

Figura 20. Variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la magnitud y de la distancia, I08 (Díaz-Hernández, 2013).

Curvas de isoaceleración

A renglón seguido se muestran los valores de isoaceleración para un periodo de retorno de 475 años, alcanzados teniendo en cuenta el 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, dado que el número de datos es bajo o nulo. Los resultados en cada uno de los nodos representan valores promedios de las aceleraciones predichas por el modelo de sismicidad y las leyes de atenuación aplicadas en cada zona sísmica, considerando los valores de la media más una desviación estándar (figuras 21 a 25).

Así mismo se muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de AS08 (figura 21). En el mapa es posible observar dos puntos de aceleración máxima:

- *Chocó*. La aceleración máxima presentada es de 400 gales.
- *Boyacá*. La aceleración máxima presentada es de 205 gales.

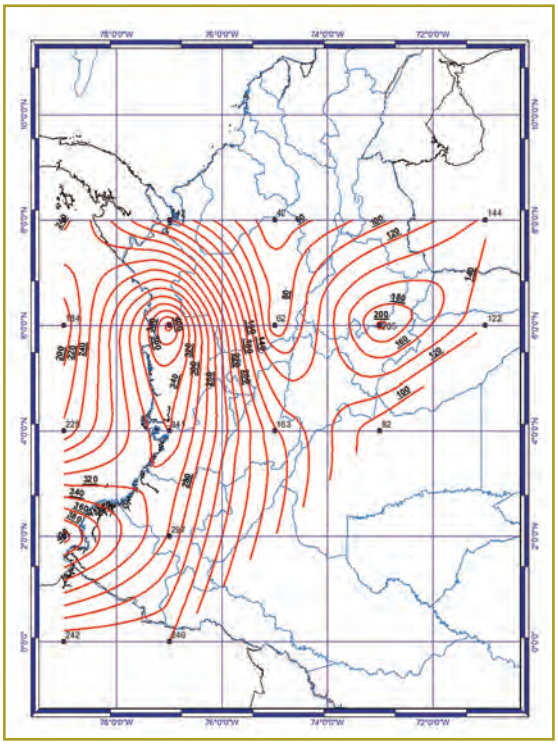

Figura 21. Curvas de isoaceleración para Colombia, modelo AS08 (Díaz-Hernández, 2013).

En esta figura se puede apreciar la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de BA08, elaborado a través del *software* GMT (Wessel & Smith, 2004), en un periodo entre 1960 y 2010 (figura 22). Es posible observar que el punto de aceleración máxima es de 280 gal en el oeste, atenuándose hacia el este de Colombia y afectando específicamente al departamento de Chocó. Las aceleraciones son mayores en el occidente, hasta el punto de que se presentan valores de 281 gales.

En Nariño, ubicado en el extremo suroeste de Colombia, se registra una aceleración de 250 gales.

En Cauca, localizado hacia el suroccidente de Colombia, la curva de isoaceleración tiene un valor de 220 gales.

Las curvas de isoaceleración generadas por el modelo de CB08 presenta valores inferiores o iguales a 320 gales, ubicados en la zona oeste de Colombia (Chocó) y disminuyendo hacia el centro del País (figura 23).

Seguidamente se 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 24).

En la figura anterior es posible observar la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de 108 en un periodo entre 1960 y 2012. Se aprecia que el punto de aceleración máxima es de 380 gales, ubicado en los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó (figura 25).

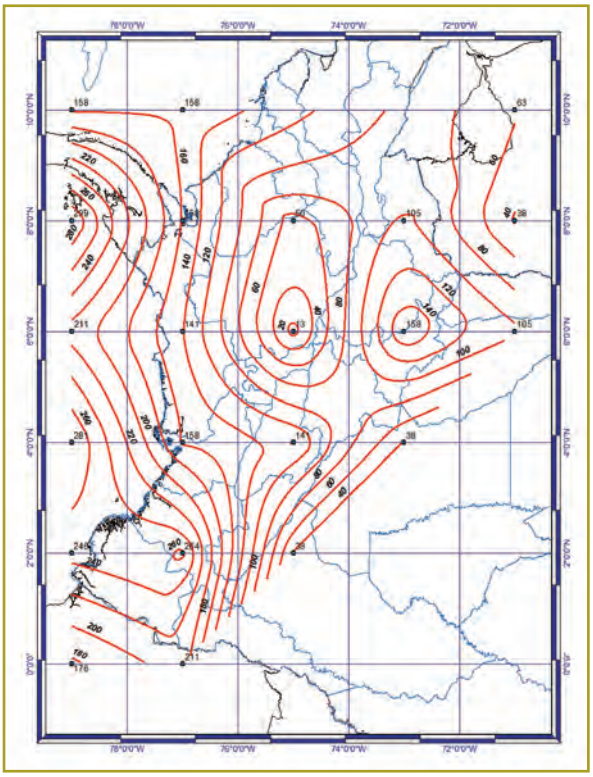

Figura 22. Curvas de isoaceleración para Colombia, modelo de BA08 (Díaz-Hernández, 2013).

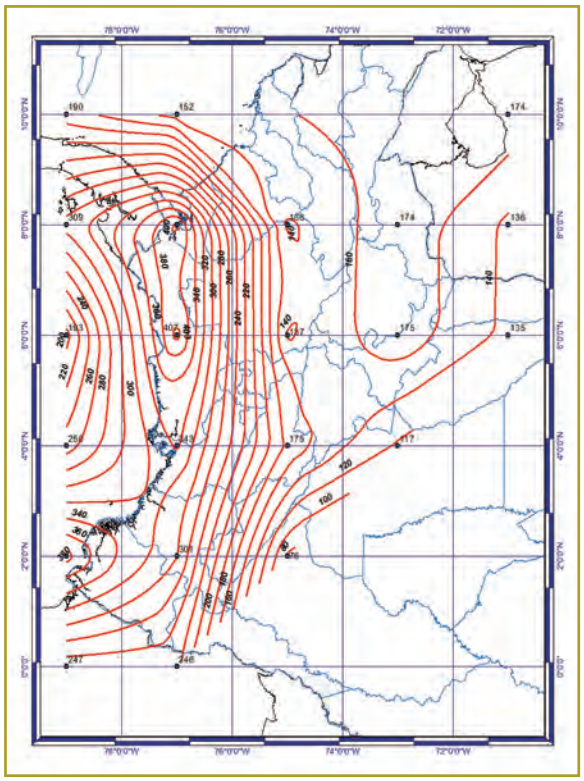

Figura 24. Curvas de isoaceleración para Colombia, modelo de CY08 (Díaz-Hernández, 2013).

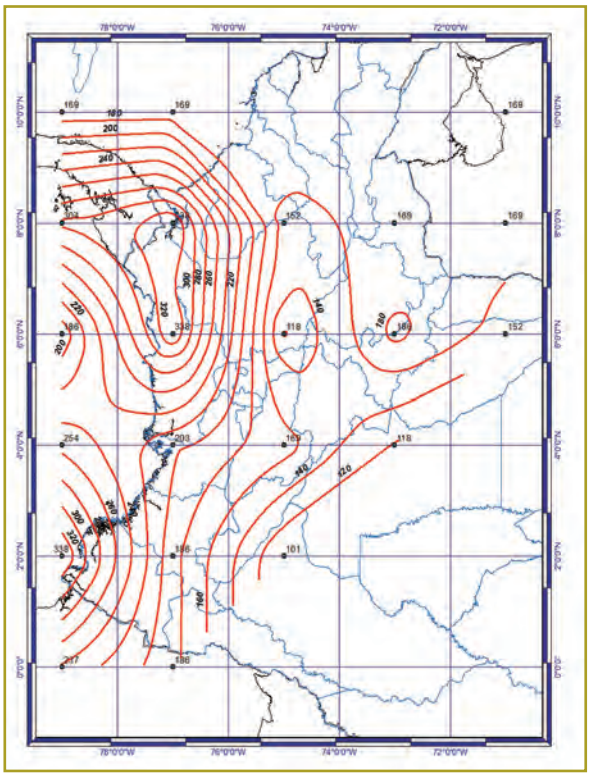

Figura 23. Curvas de isoaceleración para Colombia, modelo de CB08 (Díaz-Hernández, 2013).

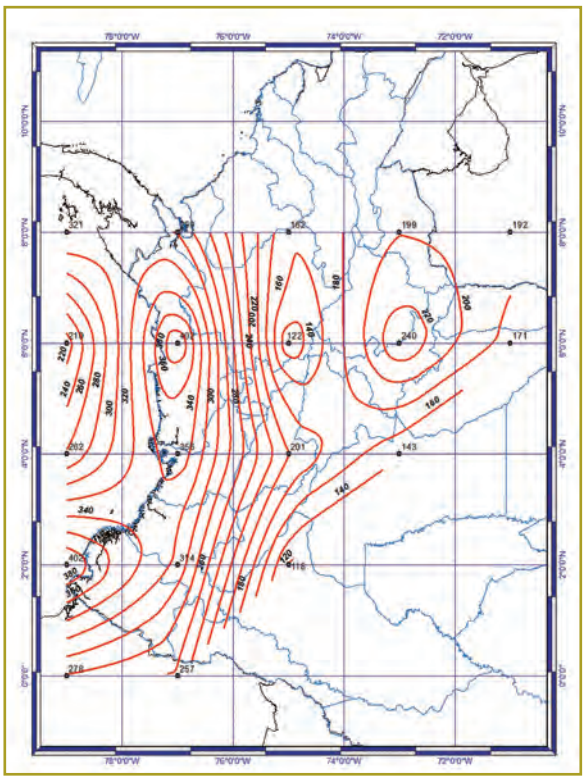

Figura 25. Curvas de isoaceleración para Colombia, modelo de I08 (Díaz-Hernández, 2013).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Más adelante se muestra la comparación para capitales de departamento, de la aceleración máxima (Aa) entre el Decreto 1400/84, NSR-98, NSR-10 y los resultados conseguidos a lo largo de este artículo (cuadro 1).

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 se usaron 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 NSR-98 y NSR-10, se tiene que para ciudades como Bogotá, Medellín, Neiva y Pasto el valor disminuyó 0,05 g pero sin cambiar la zona de amenaza sísmica, mientras que para las ciudades de Cúcuta, Quibdó y Yopal el Aa aumentó en 0,05 g, exceptuando Yopal, que aumentó 0,10 g y cambió de zona de amenaza sísmica al pasar de intermedia a alta.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desde los años setenta se han elaborado en Colombia varios mapas de amenaza sísmica con diversas aproximaciones, como los de Estrada y Ramírez (1977); AIS (1984, 1996, 2009); Salcedo (1992, 1993); Ceresis (1996), Alfaro(2011, 2012), todos ellos con sus fortalezas y debilidades. A la luz de eventos catastróficos relativamente recientes, como el sismo de Haití de 2010 y el sismo de Tohoku (Japón) del 2011, y atendiendo la sugerencia de Stein et al. (2011) de dar una mirada retrospectiva y objetiva a los pronósticos, resulta importante ver cómo la norma sismorresistente vigente parece que hiciera caso omiso de las evidencias instrumentales e históricas de los sismos del Eje Cafetero de 1999 y de Quetame de 2008.

La aproximación probabilística de la amenaza presenta limitaciones en Colombia, principalmente por escasez de datos, como se muestra en este estudio, en el cual se analizaron los cuadrantes de 2° por 2° en el área comprendida entra las longitudes 80° W y 70° W y entre las latitudes 1° S y 15° N, que corresponden al territorio colombiano. Los datos analizados corresponden al periodo 1960-2012, ya que presentan una distribución temporal aproximadamente de tipo Poisson. Los sismos corresponden a profundidades menores de 100 km y magnitudes Ms mayores de 5. La unificación de escalas de magnitud se realizó con los estudios de Utsu (Hung, 2002).

Cuadro 1

Comparación de los valores de la aceleración pico efectiva para diseño [Aa] para ciudades capitales de departamento de Colombia (Díaz-Hernández, 2013)

	DECRETO 1400/84	NSR-98	NSR-2010	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	0,3
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

A causa de la escasez de datos, los valores en el piedemonte llanero se presumen poco realistas, ya que subestiman los niveles de amenaza. Adicionalmente, hay un vacío de información en todos los departamentos de la costa caribe.

En el sismo 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 el valor de 217 gales. De acuerdo con las observaciones de campo y las fotografías aéreas, se puede deducir que se presentaron aceleraciones mayores a una gravedad. A pesar de esto, los estudios de AIS (2009) no registran ningún cambio en el valor de aceleración de Armenia.

En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008, se registraron aceleraciones de 605 g en roca a 9 km del epicentro. El estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio AIS (2009) presenta 0,25 g. De ahí la importancia de revisar y actualizar los estudios de amenaza sísmica (Correa & Alfaro, 2011; Stein et al., 2011; Alfaro, 2011, 2012).

Se analizaron cinco ecuaciones de predicción de movimiento de suelo, las cuales se eligieron porque se encuentran dentro de proyectos científicos importantes; el catálogo para su generación es muy extenso, ya que se encuentran publicadas en revistas científicas reconocidas y se han usado para otros estudios a nivel internacional.

Algo que no estaba previsto fue la importancia de la inclusión de la desviación estándar en los resultados, y en tres de los cinco casos, ésta es función de la magnitud y de la aceleración, lo cual implicó cálculos adicionales. Por otra parte, las ecuaciones funcionan para magnitudes entre 5 y 8, de modo que el catálogo colombiano se redujo de manera considerable.

El modelo de movimientos de tierra presentado en este estudio, al igual que los otros modelos desarrollados para el proyecto NGA, representa un avance significativo en la predicción empírica de movimientos de tierra horizontal para uso en ingeniería.

De los mapas de aceleraciones se puede observar una regionalización de dichos parámetros, concentrándose los máximos valores sobre la parte de la costa pacífica y que van decreciendo hacia el centro del país; de la misma manera, la parte suroeste (Nariño) registra altos valores, que tienden a decrecer hacia la dirección este.

Por otro lado, 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 sólidas del mundo; se recomienda 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 se hicieron con la ayuda del estudiante de la maestría en Geotecnia de la Universidad Industrial de Santander, el ingeniero Jorge Alberto Armenta Jiménez.

REFERENCIAS

Abrahamson, N. & Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations. *Earthquake Spectra*, EERI, 24 (1), 67-97 pp.

Aguiar, R. & 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. Revista *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 probabilística y determinista de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. Remitido a la revista *Épsilon*, N.° 20, pp. 145-148.

Alfaro, A. & Van Hissenhoven, R. (2010, enero-junio). Sismo de Haití: aspectos Sismológicos. Revista *Épsilon,* 14, 113-120.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1984). Estudio general del riesgo sísmico de Colombia. Bogotá, 242 pp.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá, 220 pp.

Boore, D.M. & 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. & Bozorgnia, Y. (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damned linear elastic response spectra for periods ranking from 0.01 to 10 s.. *Earthquake Spectra*, EERI.

Ceresis (Centro Regional de Sismología para América del Sur) (1996). Mapa probabilístico de peligro sísmico de Sudamérica. J.C. Castaño y M.H. Millán (comps.). Escala 1:5.000.000.

Chiou, B. & Youngs, R. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthq. Spectra,* 24, 173-215.

Correa, M. & Alfaro, A. (2011). Necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a raíz del sismo de Tohoku del 2011. Revista *Tecnura*, 15(30), 82-92.

Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N. & Allen, T. (2012, abril) Testing the Global Applicability of Ground Motion Prediction Equations for Active Shallow Crustal Regions. *Bull Seism Soc Am*., 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 maestría. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Estrada, G. & Ramírez, J.E. (1977). *Mapa de riesgo sísmico para Colombia*. Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos-Pontificia Universidad Javeriana.

Felzer, K. (2006). Calculating the Gutenberg-Richter *b* value. *Proceedings of American Geophysical Union Meeting*.

Fukushima, Y. & Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 757-783.

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: W.H.K. Lee, H. Meyers & K Shimazaki. Academic Press, Inc.

Hanks, T.C. & 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, Raleigh.

Idriss, I. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthq. Spectra,* 24, 217-242.

International Seismological Centre (2012). Online Bulletin. Recuperado de http://www.isc.ac.uk, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.

NSR-10 Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente NSR-10. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.

NSR-98 Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente NSR-98. Ley 400 de 1997.

PEER Berkeley Database. Disponible en www.peer-berkeley.edu.

Ramírez, J.E. (1933). Earthquake history of Colombia. *Bull. Seism. Soc. Am*, 23, 13-22.

Ramírez, J.E. (1971). The destruction of Bahia Solano, Colombia, on September 26, 1970 and the rejuvenation of a fault. *Bull. Seism. Soc. Am*., 61. 1041-1049.

Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: IGAC.

Ramírez-Landínez, A.C. (2009). Análisis sismológico del evento del 24 de mayo de 2008 en Quetame (Cundinamarca) y sus réplicas. Tesis Ingeniería Civil. Bogotá: Universidad de La Salle.

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. & Liu, M. (2011). Bad Assumptions or Bad Luck: Why Earthquake Hazard Maps Need Objective Testing. *Seismological Research Letters*, 82(5), 623-626.

Stein, S. & Okal, E. (2011). The Size of the 2011 Tohoku Earthquake Need Not Have Been a Surprise. *EOS*, 92(27), 227-228.

Sugito, M. & Taniguchi, H. (1999). Simulation of strong ground motion for the Quindio earthquake. Reconnaissance Report on the 1999 Quindio, Central Western Colombia, Earthquake and its Disasters. Hiroshi Kagami, Graduate School of Engineering, Hokkaido University.

United States Geological Survey (USGS) (2012). Disponible en http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html

Utsu, T. (2002). Relationships between magnitude scales. En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior Committee on Education, International Association for Earthquake Engineering. W.H.K. Lee, H. Kanamori & C. Kisslinger (eds.). Academic Press, 733-746.