

ESTUDIO DE SISMICIDAD REGIONAL PARA EL ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA DE BOGOTÁ*

*Alexánder Caneva Rincón***

*Elkin de Jesús Salcedo Hurtado****

*René van Hissenhoven, S. J.*****

*Andrés José Alfaro Castillo******

Resumen: Se analiza la sismicidad regional en los alrededores de la ciudad de Bogotá para considerar la influencia que pueden tener futuros sismos en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana. En el estudio se amplió la información sismológica y se realizó un análisis más completo de la base de datos en el sentido de interpretación de la sismicidad regional, presentada en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá. Se utilizó una base de datos que contenía 34.920 registros sísmicos, y luego de su depuración finalmente se escogieron 7.539 eventos, a partir de los cuales se evaluó la magnitud máxima probable y la aceleración horizontal esperada para un período de retorno de 475 años en el campus. El cálculo de los valores de estos parámetros está basado en la estimación de la magnitud representativa M_{mn} , en el análisis de completitud del catálogo, en la estimación de b -value para la región, en la identificación de las fuentes sismogénicas con posible influencia en la zona considerada, así como en el lugar y el análisis de atenuación de la aceleración.

Palabras clave: sismicidad regional, magnitud representativa, fuentes sismogénicas, Bogotá.

* Fecha de recepción: 13 de mayo de 2003. Fecha de aceptación para publicación: 14 de agosto de 2003. Este artículo constituye la segunda parte del publicado bajo el nombre "Análisis de la amenaza sísmica y de la magnitud representativa para Bogotá" en el volumen 7, número 2, julio-diciembre de 2003.

** Investigador del Instituto Geofísico Universidad Javeriana. Correo electrónico: icaneva@javeriana.edu.co

*** Geofísico, MSc. y Ph. D. en Geofísica, Universidad Lomonosov, Moscú. Profesor del Departamento de Geografía, Universidad del Valle. Asesor del Instituto Geofísico, Universidad Javeriana. Correo electrónico: elsalcedo@mafalda.univalle.edu.co

**** Geofísico, doctor en Geofísica e investigador del Instituto Geofísico- Universidad Javeriana. Correo electrónico: revanhi@hotmail.com

***** Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana. Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad Politécnica de Cataluña. Correo electrónico: A.Alfaro01@westminter.ac.uk

Abstract: In this paper the results of the seismic regional hazard analysis for Bogotá and their influence in the local seismic hazard for the Javeriana University *Campus* are presented. The research includes update of seismological data and the analysis of the state-of-the-art of the seismological database. This includes 34920 seismic records; after a depuration process, only 7539 events were useful, which were used to estimate the maximum probable magnitude and peak ground acceleration likely to occur in a 475 year interval. The results were obtained from the analysis of representative magnitude M_{min} , from the database completeness, from regional b-value estimation, from seismic sources analysis and from the attenuation of peak ground acceleration.

Key words: regional seismicity, representative magnitude, seismic sources, Bogotá.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la ingeniería y la planificación territorial, es claro que en áreas propensas a la ocurrencia de sismos cualquier decisión debe basarse en el conocimiento adecuado de las características de la sismicidad regional y de los posibles sismos que en el futuro pueden presentarse. El conocimiento detallado de tales características se obtiene mediante los estudios comúnmente denominados *zonificación sísmica* o *amenaza sísmica regional*.

Es preciso recalcar que la zonificación sísmica no alude ni al estudio de la influencia de las condiciones locales del suelo, ni a los problemas de la interacción suelo-estructura, los cuales entran en el dominio de la microzonificación sísmica. En principio, se puede decir que la zonificación sísmica está relacionada con el análisis de la frecuencia de ocurrencia de los terremotos y las posibles magnitudes, intensidades o aceleraciones esperadas de los movimientos que pudieran provocar los sismos futuros en las cercanías del lugar que se elija para evaluación. Desde este punto de vista, para la zonificación sísmica se han desarrollado varias técnicas de análisis, fundamentalmente agrupadas en los denominados métodos determinista y probabilista.

El método determinista supone que la sismicidad futura será igual a la pasada, por ello el máximo terremoto ocurrido es el máximo previsible. Este método consta de las fases de definición de las fuentes sismogénicas, selección del terremoto de control, traslación del terremoto, determinación del movimiento del terreno en el lugar y evaluación de la amenaza.

Por otra parte, el método probabilista trata de calcular leyes de recurrencia a partir de la sismicidad registrada, con lo que resultan curvas de probabilidad para diferentes intensidades de movimiento. En su desarrollo se tienen en cuenta las fases de definición de las fuentes sismogénicas, caracterización de la actividad de las fuentes, evaluación de los efectos de los terremotos y, finalmente, la estimación de la amenaza.

Debido a la imposibilidad física de lograr una estricta predicción de los terremotos, es obvio pensar que, por su naturaleza, el método probabilista sea el de mayor aceptación; sin embargo, la validez de sus resultados depende en gran medida de la cantidad y calidad de los datos empleados. Es sabido que los datos sobre los terremotos abarcan períodos muy cortos de registros instrumentales, por lo cual la extrapolación hacia el futuro y la predicción en un corto plazo no sería muy confiable. A pesar de esto, un estudio probabilístico bien interpretado a la luz de la sismicidad histórica y con las condiciones geológicas y tectónicas válidas, acompañado de un tratamiento adecuado de la información, se constituye en un elemento valioso para evaluar la sismicidad futura y la amenaza sísmica de una región determinada.

Desde estas consideraciones y teniendo en cuenta varios aspectos como la importancia de muchas construcciones de la ciudad de Bogotá, en especial las ubicadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, el mejoramiento de datos sismológicos por cantidad y calidad de la red en Colombia y el hecho de que el último estudio publicado de microzonificación sísmica en Bogotá tiene datos hasta 1995 [Ingeominas-Uniandes, 1997], se procedió a realizar un estudio específico de la sismicidad regional, en el cual se incluyen datos de los últimos años y se consideran las técnicas de evaluación de la magnitud representativa, completitud del catálogo e identificación de las fuentes sismogénicas con posible influencia en la región en estudio, con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados y dar un aporte significativo en la evaluación de la amenaza sísmica. Como complemento al artículo publicado en el volumen anterior, derivado del estudio de Caneva, Salcedo, van Hissenhoven y Alfaro, [2003], en este artículo se presentan los resultados asociados con el análisis de la completitud del catálogo de sismos y los resultados de magnitud y aceleración de sismos.

1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El objeto de estudio en el presente trabajo es la zona central de Colombia, alrededor de la ciudad de Bogotá. La observación se realizó especialmente en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana. Éste se encuentra ubicado en la zona del piedemonte oriental de la ciudad (4,68 grados de latitud norte y 74,15 grados de longitud occidental), que corresponde a la zona de transición entre los cerros y la zona plana de la ciudad. Consta principalmente de depósitos coluviales y conos de deyección de materiales con una elevada capacidad portante en general, pero con estratigrafías heterogéneas con predominio de gravas, arenas, limos y depósitos ocasionales de arcilla de poco espesor.

2. ANÁLISIS DE COMPLETITUD DEL CATÁLOGO DE SISMOS

La concordancia entre el gráfico de recurrencia observado (experimental) y el esperado (teórico) sufre alteraciones sustanciales para valores de magnitud pequeña, lo cual se debe a la sensibilidad de la

red sismológica. Si se identifica el valor mínimo de magnitud tal que los registros con magnitud superior a dicho valor están completamente representados en el catálogo, será posible construir una *base de registros sísmicos artificial* que describirá el régimen sísmico de la región en estudio, como si *todos* los eventos de *todas* las magnitudes (sin importar su valor) figuraran en el catálogo. Para la construcción de la base artificial se lleva a cabo el análisis de completitud del catálogo de sismos empleado en el presente estudio.

El método utilizado es el propuesto por Stepp [1972], el cual consiste en identificar aquellos intervalos en los cuales determinado valor de magnitud puede ser considerado como completamente reportado, lo cual permite finalmente determinar a partir de qué magnitud de corte (para dichos intervalos) la relación de Gutenberg-Richter $\lg N = a - bM$, es decir, la ley de recurrencia sísmica está bien descrita por la regresión que toma como valor mínimo de magnitud justamente dicha magnitud de corte. El procedimiento está basado en la suposición de que una secuencia de sismos puede modelarse mediante un proceso de Poisson. Si la tasa de surgimiento de sismos $\lambda(M)$ puede ser descrita mediante un proceso de Poisson durante un intervalo de tiempo T , entonces su varianza y su desviación estándar son respectivamente:

$$\sigma_{\lambda}^2 = \frac{\lambda}{T} \text{ y } \sigma_{\lambda} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} \quad (1)$$

Si el proceso es estacionario, entonces para cualquier valor de magnitud σ_{λ} disminuirá con el aumento de la muestra (es decir, del intervalo de tiempo en estudio), pero siempre proporcional a $\frac{1}{\sqrt{T}}$. Un alejamiento

de σ_{λ} respecto a $\frac{1}{\sqrt{T}}$ implica, ya sea que el intervalo de tiempo de la muestra T no es suficiente para hacer un cálculo veraz de la tasa de ocurrencia de sismos o que hay subintervalos (del intervalo completo de la muestra) en los cuales no todos los datos fueron registrados.

En el presente estudio se abarcó el intervalo comprendido entre 1958 y 2002. Se consideraron diez intervalos de magnitud $\Delta M = 0,5$ a partir de $M_{\min} = 2$ hasta $M_{\max} \leq 6,5$. El incremento de la muestra se realizó añadiendo subintervalos $\Delta T = 5$ años. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos de σ_{λ} y $\lambda(M)$ para tres de los diez intervalos de magnitud $\Delta M = 0,5$.

Tabla 1. Desviación estándar σ_{λ} y tasa media de ocurrencia $\lambda(M)$ para tres intervalos de magnitud correspondientes a los intervalos de tiempo T

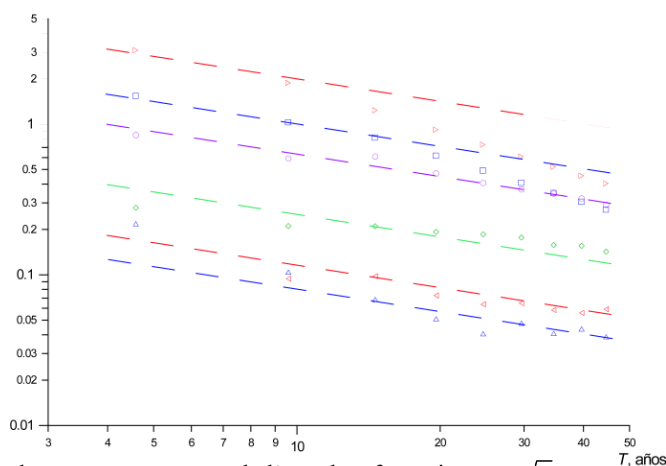
| Intervalo | T (años) | $1/\sqrt{T}$ | $2 \leq M < 2,5$ | $\lambda(M)$ | σ_{λ} | $3 \leq M < 3,5$ | $\lambda(M)$ | σ_{λ} | $5,5 \leq M < 6$ | $\lambda(M)$ | σ_{λ} |
|-----------|-------------|--------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------|
| 1998-2002 | 4,58 | 0,47 | 201 | 43,89 | 3,10 | 15 | 3,28 | 0,85 | 1 | 0,22 | 0,22 |
| 1993-1997 | 9,58 | 0,32 | 324 | 33,82 | 1,88 | 32 | 3,34 | 0,59 | 1 | 0,10 | 0,10 |
| 1988-1992 | 14,58 | 0,26 | 324 | 22,22 | 1,23 | 79 | 5,42 | 0,61 | 1 | 0,07 | 0,07 |
| 1983-1987 | 19,58 | 0,23 | 324 | 16,55 | 0,92 | 85 | 4,34 | 0,47 | 1 | 0,05 | 0,05 |
| 1978-1982 | 24,58 | 0,20 | 324 | 13,18 | 0,73 | 100 | 4,07 | 0,41 | 1 | 0,04 | 0,04 |
| 1973-1977 | 29,58 | 0,18 | 324 | 10,95 | 0,61 | 119 | 4,02 | 0,37 | 2 | 0,07 | 0,05 |
| 1968-1972 | 34,58 | 0,17 | 324 | 9,37 | 0,52 | 143 | 4,14 | 0,35 | 2 | 0,06 | 0,04 |
| 1963-1967 | 39,58 | 0,16 | 324 | 8,19 | 0,45 | 161 | 4,07 | 0,32 | 3 | 0,08 | 0,04 |
| 1958-1962 | 44,58 | 0,15 | 324 | 7,27 | 0,40 | 169 | 3,79 | 0,29 | 3 | 0,07 | 0,04 |

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1 se muestran las variaciones de la desviación estándar con el aumento de la muestra [Caneva, Microzonificación, 2002]. Obsérvese que para los intervalos de valores de magnitud $2,0 \leq M < 2,5$ y $2,5 \leq M < 3,0$ se presenta un alejamiento de σ_{λ} respecto a $1/\sqrt{T}$, en tanto que para los intervalos de magnitud restantes, es decir, a partir de $M \leq 3,0$ existe concordancia entre el valor esperado y el valor calculado. Esto permite asegurar que los registros de eventos con $M \approx 3,0$ están completamente consignados en el catálogo. Tomando como base este valor de magnitud (para el cual el catálogo está completamente representado) se construyó una base de datos artificial equivalente a un catálogo con todas las magnitudes representadas en su totalidad.

En la Figura 2 se muestra el gráfico de recurrencia acumulativa para la región en estudio correspondiente al periodo 1958-2002 [Caneva, Microzonificación, 2002]. Allí también se representa de manera esquemática el efecto del análisis de completitud (para magnitudes pequeñas). Cada barra del histograma representa el número anual de sismos (acumulativo) en función de la magnitud. Para magnitudes pequeñas cada barra es complementada en la parte superior (parte sombreada) con el número de eventos que le corresponde a dicha magnitud luego del análisis de completitud, es decir, el número de eventos que le correspondería a dicha magnitud si el catálogo fuera completo. Las líneas rectas (de trazos y continua) representan las regresiones del gráfico de recurrencia correspondientes al catálogo sin análisis de completitud (línea de trazos) y para la base artificial, es decir, la que incluye el análisis de completitud (línea continua).

Figura 1. Completitud. Desviación estándar σ del número anual medio de eventos en función de la extensión de la muestra.

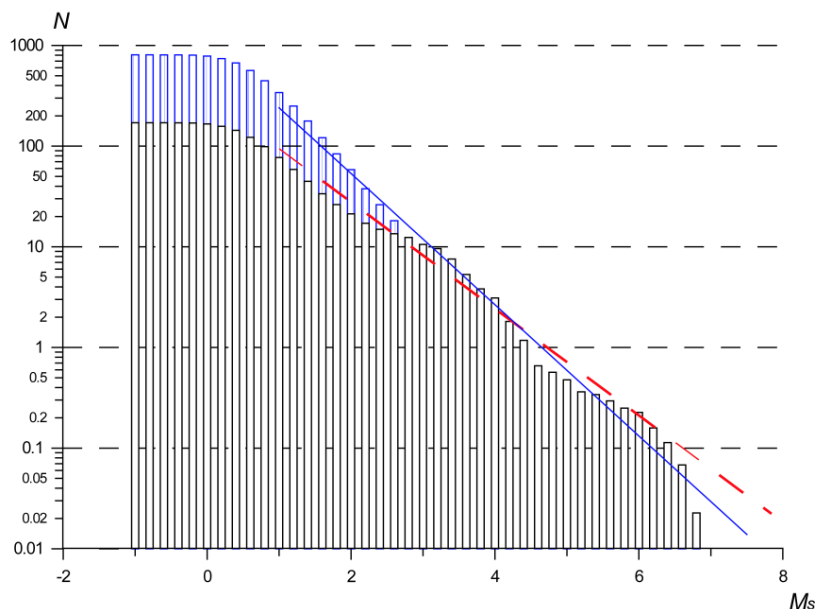


Las líneas de trazos representan la línea de referencia $\sigma = 1/\sqrt{T}$ respecto a la cual deben ser paralelas las regresiones:

Δ - $2,0$ $M_S < 2,5$; \square - $2,5$ $M_S < 3,0$; \circ - $3,0$ $M_S < 3,5$; \diamond - $4,0$ $M_S < 4,5$; ∇ - $4,5$ $M_S < 5,0$; \times - $5,5$ $M_S < 6,0$

Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

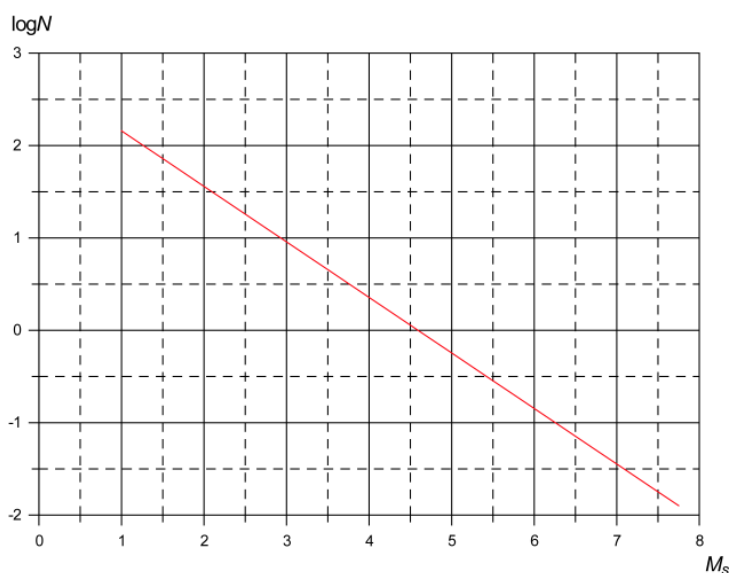
Figura 2. Gráfico de recurrencia acumulativa para la región en estudio, para el intervalo de tiempo 1958-2002



Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

El resultado del análisis de completitud llevado a cabo con el catálogo empleado en el presente trabajo, es decir, el gráfico de recurrencia acumulativa correspondiente a la base artificial, se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Regresión correspondiente al gráfico de recurrencia de la base de datos artificial. $\log N = -0.601M + 2.76$



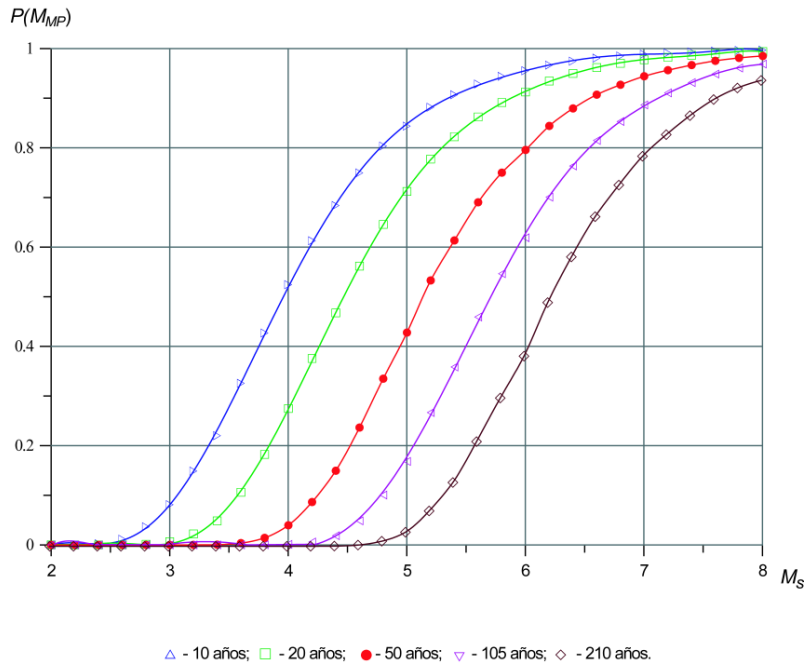
Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

3. MAGNITUD Y ACELERACIÓN

3.1 MAGNITUD MÁXIMA PROBABLE (M_{MP})

Según el análisis de completitud y considerando los valores de magnitud representativos, es decir, $M \geq 2,5$, se determina la magnitud máxima probable (M_{mp}) para un período de retorno $T_R = 475$ años. Siguiendo el algoritmo expuesto por Algermissen [1976] es posible determinar la probabilidad de excedencia en términos de M_{mp} . En la Figura 4 se muestra la probabilidad de no excedencia de magnitud $P(M_{mp})$ en función de la magnitud M_s para diferentes tiempos de exposición. Cabe recordar que $P(M_{mp})$ corresponde a la probabilidad de que M_{mp} no sea excedida por los valores de magnitud de los diferentes eventos sísmicos, es decir, que la región sobre cada una de las curvas corresponde a la probabilidad de *sí* excedencia; en tanto que la región bajo las curvas, a la probabilidad de *no* excedencia de M_{mp} . La magnitud para un período de retorno

Figura 4. Probabilidad de no-excedencia de magnitud máxima probable M_{mp} para los tiempos de exposición



Magnitud máxima probable correspondiente a un período de retorno de 475 años M_{mp} 6,6

Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

$T_R = 475$ años, que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% con un tiempo de exposición de 50 años, es de $M_s \approx 6,6$. Para períodos de retorno de $T_R = 1000$ y $T_R = 2000$ años los valores de magnitud obtenidos son $M_s \approx 7,1$ y $M_s \approx 7,5$, respectivamente [Caneva, Microzonificación, 2002].

3.2 ACCELERACIÓN ASOCIADA A UN $T_R = 475$ AÑOS

Para calcular los valores de aceleración correspondientes a un período de retorno $T_R = 475$ años en basamento rocoso para Bogotá es necesario identificar las fuentes sismogénicas (fallas activas y zonas sismogénicas de influencia) que determinan la sismicidad en la región (Figura 5 y Tabla 2).

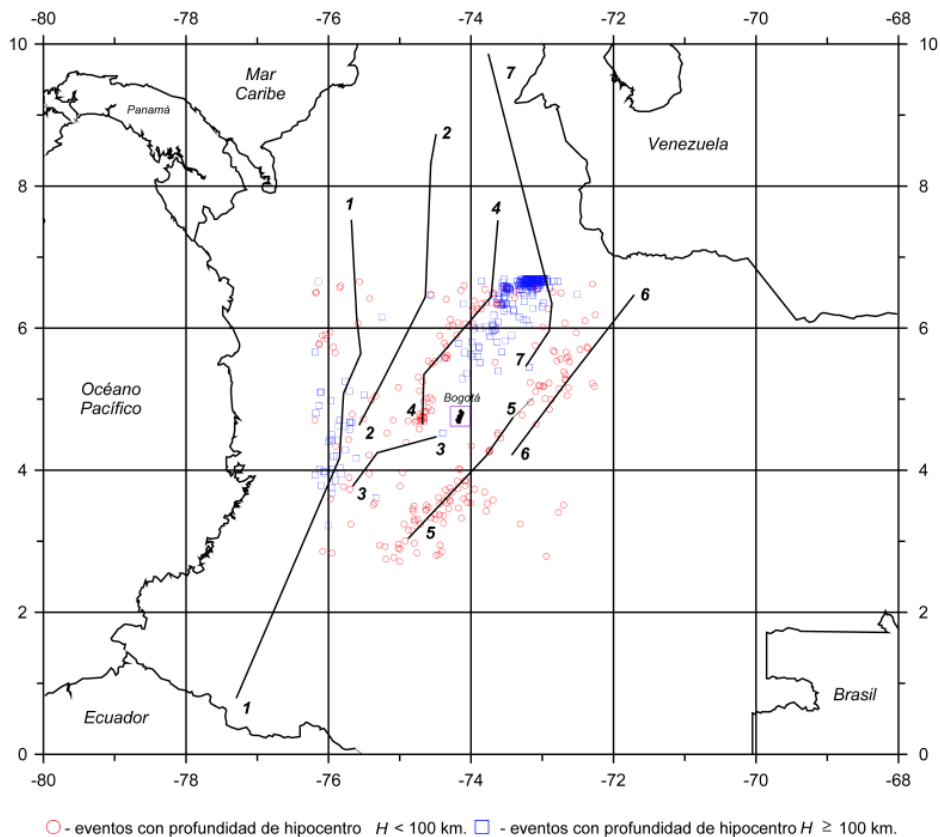
Las características de las fuentes sismogénicas Palestina e Ibagué no figuran en la Tabla 2, ya que el número limitado de datos no permite llevar a cabo estudio estadístico alguno. Ahora bien, basándose en los trabajos de París y Romero [1994], Vergara, Taboada, Romero y París [1995] y Lobo-Guerrero [2002] acerca de la distribución de fallas en la región objeto de estudio, fueron identificadas otras fuentes sismogénicas presentes. Lobo-Guerrero [2002] analiza algunas fallas secundarias en inmediaciones del sitio de interés (Tabla 3), por ejemplo, Lagartos, La Cajita, Balsillas, Facatativá, entre otras; sin embargo, al analizar la distribución de epicentros se observa que no hay eventos que pudieran ser asignados a dichas fallas (Figura 5), además, las tasas de actividad de estas fallas son extremadamente bajas.

Tabla 2. Fuentes sismogénicas. Fallas activas y zonas sismogénicas de influencia

| Fuente sismogénica | Magnitud última creíble (Mu) | Profundidad H (km) | Distancia R (km) |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Romeral | 7,0 | 22 | 180 |
| Palestina | ... | ... | ... |
| Ibagué | ... | ... | ... |
| Salinas Norte | 6,0 | 23 | 80 |
| Salinas Sur | 5,5 | 5 | 50 |
| Servitá | 6,0 | 8 | 80 |
| Guaicáramo | 7,0 | 6 | 100 |
| Caldas | 7,5 | 160 | 150 |
| Bucaramanga | 6,5 | 145 | 120 |

Fuente: Caneva [Microzonificación, 2002].

Figura 5. Principales fallas



1. Romeral; 2. Palestina; 3. Ibagué; 4. Salinas; 5. Servitá - Santa María; 6. Guicáramo; 7. Bucaramanga - Santa Marta

Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

Tabla 3. Fallas identificadas en la región objeto de estudio

| Falla | Long. (km) | Azimut/ Buzamiento | Tipo de falla* | Clasificación de la actividad | Tasa de actividad (mm/año) | Distancia al campus (km) |
|---------------|------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Servitá | 26 | 45/45 W | I-RD | Activa | Alta 1-10 | 62 |
| Campamento | 13 | 45/45 E | N | Incierta | ... | 63 |
| Restrepo | 12 | 45/45 W | I | Activa | Alta 1-10 | 64 |
| Cuatrocasas | 15 | 45/30 W | I | Activa | Alta 1-10 | 65 |
| Buenavista | 6 | 45/70 E | N | Incierta | ... | 65 |
| Mirador | 30 | 30-40/60 W | I-RD | Activa | Alta 1-10 | 67 |
| Buque | 11 | 100/90 | RS | Incierta | ... | 67 |
| Colepato | 15 | 50/30 W | I | Activa | Moderada 0,1-1 | 68 |
| Villavicencio | 50 | 10-45/45 W | I | Incierta | ... | 70 |

Continuación Tabla 3

| Falla | Long. (km) | Azimut/ Buzamiento | Tipo de falla* | Clasificación de la actividad | Tasa de actividad (mm/año) | Distancia al campus (km) |
|---------------------|---------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Cumara | 25 | 45/30 W | I | Activa | Alta 0,7-2,5 | 73 |
| Santa María | 15 | 45/60 W | I | Incierta | ... | 65 |
| El Volcán | 16 | 45/45 W | I | Incierta | ... | 66 |
| San Pablo | 18 | 60/45 W | I | Incierta | ... | 69 |
| El Paujil | 4 | 45/30 W | I | Incierta | ... | 71 |
| San Cristóbal | 8 | 70/45 W | I | Incierta | ... | 74 |
| Río Grande | 18 | 30-35/60 E | I | Incierta | ... | 75 |
| Orottoy | 13 | 60/60 E | N | Incierta | ... | 78 |
| San Juanito-Acacias | 16 | 40/45 W | I | Incierta | ... | 79 |
| Bituima | 90 | 0-20/E | I-RS | Pot. activa | ... | 59 |
| Prado | 110 | 5-35/E | I | Pot. activa | ... | 65 |
| Alto del Trigo | 90 | 0-35/E | I-RD | Pot. activa | ... | 60 |
| Viani | 40 | 60/90 | RD | Pot. activa | ... | 60 |
| Cambao Sur | 20 | 20-30/E | I-RD | Activa | Moderada | 77 |
| Cambao Norte | 30 | 10/E | I | Pot. activa | ... | 79 |
| Cambrás | 70 | 20/E | I-RS | Pot. activa | ... | 89 |
| Honda | 115 | 345-15/E | I | Pot. activa | ... | 79 |
| Ibague | 40 | 55-75/90 | RD | Activa | Moderada-alta 0,14-1,4 | 91 |
| Los Lagartos | 9 | 135/80 W | N | Activa | Muy baja 0,07 | 8 |
| Ubaque | 26 | 20/W | I | Pot. activa | ... | 16 |
| Siecha | 13 | 20/W | I | Incierta | ... | 28 |
| Cajitas | 18 | 0/E | I | Activa | Moderada 0,23 | 40 |
| Río Tunjuelito | 23 | 0/E | I | Activa | Extrem. baja 0,005 | 14 |
| Balsillas | 30 | 165/80 E | N | Incierta | ... | 20 |
| Bojacá | 4 | 165/E | I ? | Pot. activa | ... | 30 |
| Facatativá | 14 | 125/90 | N-RD | Pot. activa | ... | 37 |
| Pandi | 60 | 20/E | I | Pot. activa | ... | 52 |
| Aposentos | 13 | 160/90 | N | Activa | Extrem. baja | 32 |
| Barandillas | 14 | 45/90 | N | Activa | Extrem. baja | 50 |

Fuente: Lobo-Guerrero [2002].

* Tipo de falla: N: normal, I: inversa, RD: rumbo dextral y RS: rumbo sinistral.

El concepto de fuente sismogénica corresponde no necesariamente a una única falla, sino a un grupo de fallas que manifiestan efectos de sismicidad parecidos. La asignación de eventos a cada una de ellas se ha realizado tomando como base lo expuesto en Ingeominas-Uniandes [1997]. Algunos de los epicentros sísmicos de la región se

encuentran ubicados de tal forma que es difícil asignarlos a cualquiera de las principales fallas (Figura 5); sin embargo, es posible realizar la asignación de la mayoría de estos eventos a un sistema de fallas localizado en el espacio determinado por una falla principal. De esta manera, algunos eventos con hipocentros profundos que en estudios anteriores [Ingeominas-Uniandes, 1997] eran considerados como no asignados en el estudio [Instituto Geofísico, 2002] y pasan a hacer parte de una fuente definida.

Ahora, de acuerdo con la información acerca de las fuentes sismogénicas se calcularon los valores de probabilidad de excedencia en términos de la aceleración $a_{máx}$ sobre terreno firme para diferentes tiempos de exposición. Los relativamente pocos datos suministrados directamente por redes de acelerógrafos en Colombia han significado tener que utilizar funciones de atenuación del valor de aceleración con distancias foráneas. Para efectuar este cálculo el Instituto Geofísico [2002] utilizó once funciones de atenuación hechas con registros de diferente índole [Douglas, 2001] con lo que se buscó incluir diferentes efectos de la sismicidad.

3.3 ECUACIONES DE ATENUACIÓN

De las 197 ecuaciones de atenuación recopiladas por Douglas [2001] se seleccionaron las obtenidas en otras regiones del mundo y que incluyen un amplio espectro de condiciones del medio geofísico, por haber sido utilizados en su determinación registros de regiones de subducción (de las costas de Norte, Centro o Suramérica), registros mundiales, entre otros. Sería deseable y recomendable contar con ecuaciones propias que respondan a las fuentes sismogénicas, a los mecanismos de falla y a la geología de los Andes colombianos. Mientras ello no ocurra se seguirán utilizando ecuaciones provenientes de otras latitudes, con las limitaciones que ello supone. A continuación se presenta una breve descripción de las ecuaciones utilizadas:

- Esteva [1993] utiliza registros del occidente de Norteamérica:

$$a = 1230e^{0,80M} (R + 25)^{-2,00} \quad (2)$$

donde R es la distancia epicentral en km y la aceleración a se expresa en cm/s^2 .

- Donovan [1973] utiliza registros del occidente de Estados Unidos:

$$a = [1.320 e^{0.58M} (R + 25)^{-1.52}] \times 1.55 \quad (3)$$

donde R es la distancia epicentral expresada en km. La aceleración a se expresa en cm/s^2 .

- MacGuire [1974] no define el mecanismo de la fuente; utiliza registros del occidente de Estados Unidos:

$$a = 472,3e^{0,640M} (R + 25)^{-1,301} \quad (4)$$

donde R es la distancia epicentral en km y la aceleración a se expresa en cm/s^2 .

- Goldsack *et al.* [1976] utilizaron registros de Chile y Perú:

$$a = 4290e^{0,8M_s} \left((R^2 + 20^2)^{0,5} + 25 \right)^{-2} \quad (5)$$

donde R es la distancia epicentral en km y la a aceleración se expresa en cm/s^2 .

- Aptikaev y Kopnichev [1980] utilizan registros de Hawaii, Guatemala, Nicaragua, Chile, Perú, Argentina, Italia, Grecia, Rumania, Asia Central, India y Japón:

$$\log a = \alpha_1 M + \alpha_2 \log R + \alpha_3 \quad (6)$$

donde la aceleración se expresa en gales y la distancia R en km.

- Joyner y Boore [1981] utilizan registros del occidente de Norteamérica:

$$\log y = \alpha + \beta M - \log r + br \quad (7)$$

donde y está dada en g . La distancia r está expresada en km. M es la magnitud M_w [Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979, y Tanner y Shepherd, 1997].

- Dahle, Bungum y Kvamme [1990] utilizaron registros en sitios de roca y ecuación representativa de sismos intraplaca:

$$\ln a = C_1 + C_2 M + C_4 R + \ln G(R, R_0) \quad (8)$$

donde la aceleración se expresa en m/s^2 y la distancia R en km.

- Crouse [1991] utilizó datos de zonas de subducción:

$$\ln a = 6,36 + 1,76M - 2,73 \ln(R + 1,5e^{0,608M}) + 0,00916h \quad (9)$$

donde M es la magnitud M_w [Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979, y Tanner y Shepherd, 1997], h es la profundidad focal expresada en kilómetros, R es la distancia epicentral expresada en km y la aceleración se expresa en cm/s^2 .

- Taylor Castillo, Santos López, Dahle y Bungum [1992] generaron una ecuación de atenuación con datos de sismicidad de Nicaragua, El Salvador y Costa Rica:

$$\ln(A) = 0,339 + 0,455M - 0,67 \ln(R) - 0,00207R \quad (10)$$

donde A se expresa en m/s^2 y R se expresa en km.

- Ambraseys y Bommer [1996] utilizan registros de Europa y de Asia Central:

$$\log y = C'_1 + C_2 M + C_4 \log r + C_A S_A + C_S S_S \quad (11)$$

donde y se expresa en g y r en km.

- Boore, Joyner y Fumal [1997] utilizan registros del occidente de Norteamérica:

$$\log Y = b_1 + b_2 (M - 6) + b_3 (M - 6)^2 + b_4 r + b_5 \log r + b_6 (\log V_S - \log V_A) \quad (12)$$

donde y se expresa en g , R se expresa en km y M es la magnitud M_w [Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979, y Tanner y Shepherd, 1997].

En la Figura 6 se muestran los valores de la aceleración en función del periodo de retorno obtenidos a partir de las gráficas de probabilidad de no excedencia en función de $a_{m\acute{a}x}$ para diferentes tiempos de exposición. En la Figura 7 se muestra el valor medio de aceleración para diversos valores de periodo de retorno (las líneas de trazos representan el intervalo de confianza de 90% para la media).

Para el periodo de retorno de $T_R = 475$ años, que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% con un tiempo de exposición de 50 años, se obtiene (en los límites del intervalo de confianza del 90%) un valor de aceleración máxima de 180 cm/s².

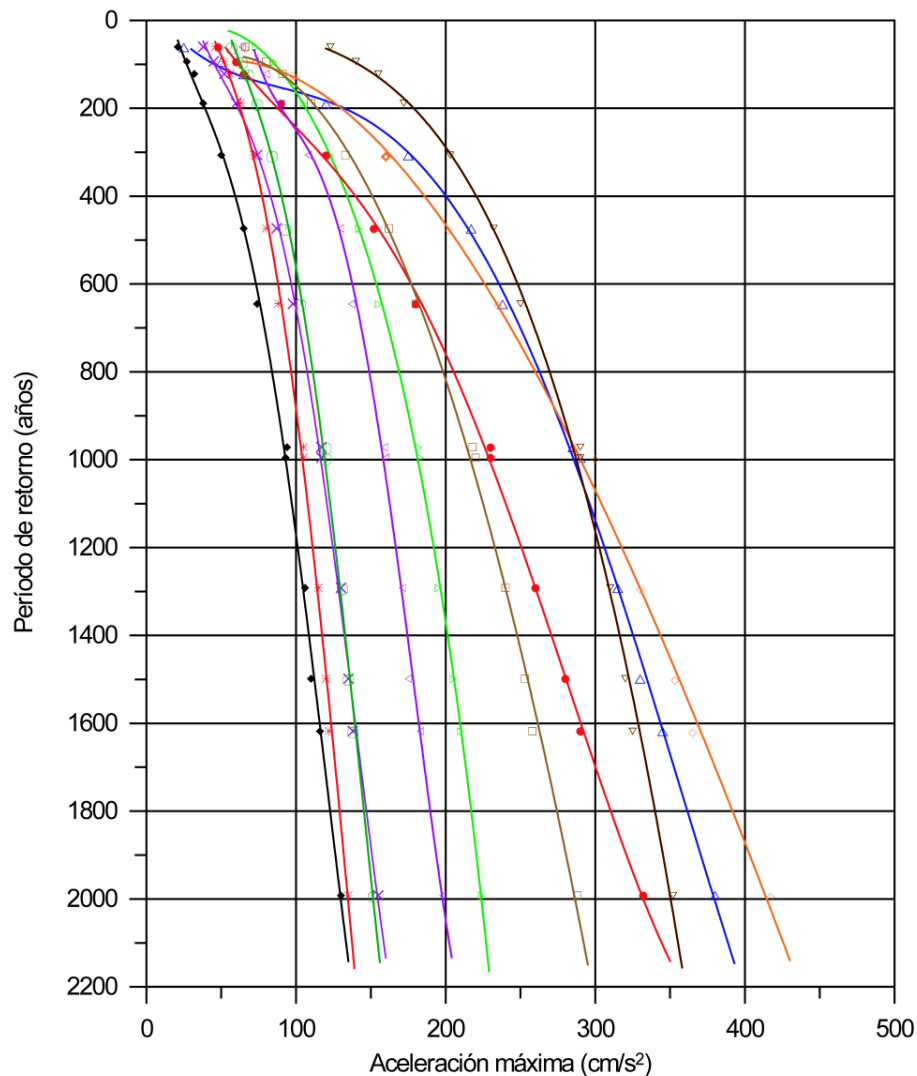
4. CONCLUSIONES

Este artículo, como complemento a Caneva, Salcedo, van Hissenhoven, Alfaro, 2003], resume los aspectos más importantes de la evaluación de la amenaza sísmica regional elaborada para los estudios de microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá. En el estudio sismológico se utilizó el catálogo de registros sísmicos de Colombia, unificado en magnitud M_s , con información de eventos desde el siglo XVI y actualizado a julio de 2002.

Se presentan los resultados del estudio de fallas identificadas en la región de interés, que corresponde a una recopilación de información geológica que abarca la zona desde el valle del río Magdalena hasta el piedemonte llanero. A pesar de ser ésta una de las clasificaciones más completas que se hayan hecho para Bogotá, se recomienda hacer estudios adicionales de campo para mejorar aún más la caracterización geométrica y la actividad de dichas fallas. Se debe incentivar la realización de trincheras en las fallas que muestran mayor actividad para determinar con mayor fiabilidad sus tasas de actividad.

En Caneva, Salcedo, van Hissenhoven, Alfaro [2003] se llevó a cabo el cálculo de la magnitud representativa para el catálogo de eventos sísmicos de la región en estudio, y se obtuvo que son realmente representativos los registros con valores de magnitud $M_s \geq 2,5$. Además, se analizaron las variaciones de la magnitud representativa en el tiempo y se demostró que hasta 1993, año en que entra en operación la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), eran representativos úni-

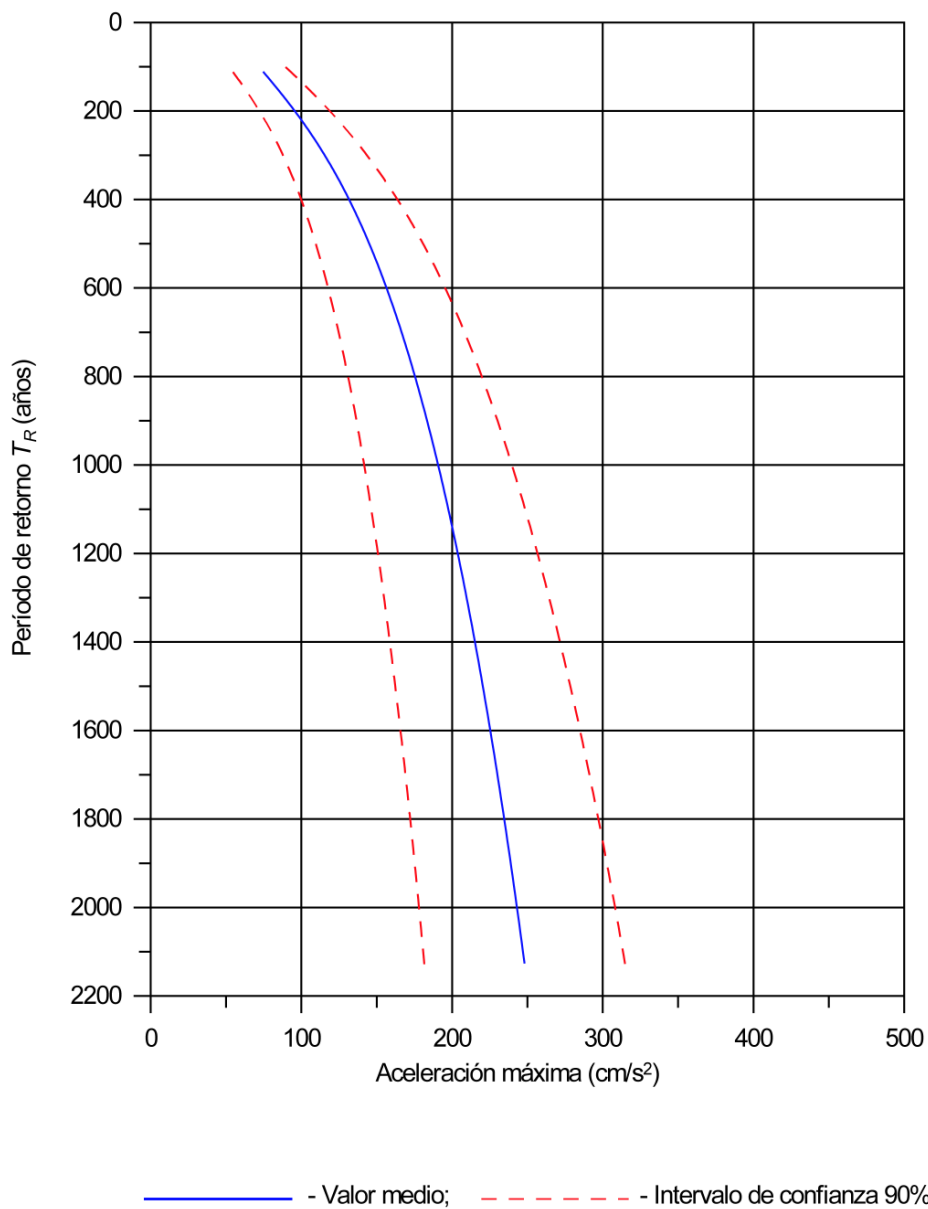
Figura 6. Aceleración máxima probable $a_{máx}$ para diversos valores del periodo de retorno promedio T_R



Ecuaciones de atenuación: \times - Ambraseys; \triangle - Aptikaev;
 \odot - Boore; \triangleright - Crouse; \bullet - Dahle; \triangleleft - Donovan; \blacklozenge - Esteva;
 \diamond - Goldsack; $*$ - Joyner; \square - Mac Guire; ∇ - Taylor.

Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

Figura 7. Aceleración máxima probable $a_{m\acute{a}x}$ (valor medio) para diversos valores de periodo de retorno promedio T_R



Fuente: Caneva, Microzonificación, 2002.

camente los registros con $M_s \geq 4$. La evaluación de la magnitud representativa es un aporte importante para la sismología en Colombia, ya que permite de una manera científica, coherente y consistente determinar el valor de corte de las magnitudes y la variación de este valor en el tiempo teniendo en cuenta el tipo y número de instrumentos, así como la disposición de la red en el país.

Adicionalmente, se realizó el estudio de completitud del catálogo de sismos de la región objeto de estudio. Se obtuvo un valor de magnitud M_s para un periodo de retorno de $T_R = 475$ años de 6,6; para un periodo de retorno de 1.000 años de 7,1, y para un periodo de 2.000 años de 7,5. Mediante la aplicación de diversas ecuaciones de atenuación se encontró que para un periodo de retorno de $T_R = 475$ años, que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% con un tiempo de exposición de 50 años, se obtiene (en los límites del intervalo de confianza del 90%) un valor de aceleración máxima de 180 cm/s². En vista de que las ecuaciones utilizadas para establecer la aceleración en roca provienen de otros entornos, se recomienda hacer un esfuerzo para determinar ecuaciones de atenuación para las diferentes regiones de Colombia. Esto depende de la conformación de redes de instrumentos de movimiento sísmico fuerte y de un adecuado procesamiento de los datos obtenidos. Es indispensable que una buena parte de dichos instrumentos estén ubicados en roca o en basamento rocoso y que los instrumentos ubicados en suelos o materiales blandos estén acompañados de una estación de referencia debidamente calibrada. El valor de aceleración obtenido debe tomarse como referencia, pero considerando los inconvenientes que trae la aplicación de fórmulas obtenidas en otros contextos, debe manejarse con una incertidumbre razonable.

Por las implicaciones económicas y sociales que tienen los estudios de amenaza sísmica, se recomienda mejorar los estudios geológicos y sismológicos, aumentar la instrumentación sismológica y, adicionalmente, complementar los estudios probabilistas con enfoques deterministas.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios de microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana han sido financiados por la Rectoría de Universidad y hacen parte del proyecto de Universidad Saludable. Los autores desean agradecer al ingeniero Juan José Obagi Araújo, profesor asociado del Departamento de Procesos Productivos de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, por su asesoría en el tratamiento estadístico de los datos y los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K. y Richards, P. *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. s. l.: Freeman Fox, 1982.
- Algermissen, S. *Probabilistic Estimates of Maximum Acceleration and Velocity in Rock the Contiguous United States*. s. l.: Dep. Interior-Geological Survey, 1976.
- Ambraseys, N. N. y Bommer, J. J. Prediction of Vertical Response Spectra in Europe. En: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(4), 1996, 401-412.
- Aptikaev, F. y Kopnichev, J. Correlation between Seismic Vibration Parameters and Type of Faulting. En: *Proc. Seventh World Conf. on Earthq. Eng.*, 1, 1980, 107-110.
- Bolt, B. A., Horn, W. L., Macdonald, G. A. y Scott, R. F. *Geological Hazards*. Berlin: Springer, 1977.
- Boore, D. M., Joyner, W. B. y Fumal, T. E. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes. Summary of Recent Work. En: *Seismological Research Letters*, 68(1), 1997, 128-153.
- Caneva, A. *Microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Estudio de Amenaza Sísmica*. Bogotá: s. e., 2002.
- _____. Magnitud representativa del catálogo de sismos de Colombia. En: *Ingeniería y Universidad*, 6(1), 2002, 9-17.
- _____. Magnitud representativa. En *Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología*. Bogotá: s. e., 2002.
- Caneva, A. Parámetros de la Ley Generalizada de Recurrencia Sísmica b-value y d-value. En: *Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología*. Bogotá: s. e., 2002.
- _____. *Propiedades fractales del régimen sísmico de Colombia*. Ph. D. tesis Física MSU, Moscú (en ruso): 2000.
- _____, Salcedo, E., Van Hissenhoven, S. J., R., Alfaro, A. Análisis de la amenaza sísmica y de la magnitud representativa para Bogotá. En: *Ingeniería y Universidad*, 7(2), 2003, 133-149.
- Coral, C., *Particularidades de la sismicidad en Colombia*, Ph. D. tesis, Física MSU, Moscú (en ruso): 1984.
- Crouse, C. B. Ground-Motion Attenuation Equations for Earthquakes on the Cascadia Subduction Zones. En: *Earthq. Eng.*, 32(4), 1991, 193-220.
- Dahle, A., Bungum, H. y Kvamme, L. B. Attenuation Modelling Based on Intraplate Earthquake Recordings. En: *Proc. Ninth European Conf. Earthq. Eng.*, 4-A, 1990, 121-129.
- _____. Attenuation Models Inferred from Intraplate Earthquake Recordings. En: *Earthq. Eng. and Structural Dynamics*, 19(8), 1990, 1125-1141.
- Dahle, A. *et al.* New Spectral Strong-Motion Attenuation Models for Central America. En: *Proc. Fifth International Conf. Seismic Zonation*, II, 1995, 1005-1012.

- Donovan, N. C. A Statistical Evaluation of Strong-Motion Data including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake. En: *Proc. Fifth World Conf. Earthq. Eng.*, 1, 1973, 1252-1261.
- Douglas, J. A. *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, 2001.
- Espinosa, A. *Sismicidad histórica de la ciudad de Pereira y su área. Proyecto Microzonificación Sísmica de Pereira, Santa Rosa de Cabal y Dosquebradas*. Inédito, 1996.
- . *Sismicidad histórica de Santafé de Bogotá y su área (1500-1994). Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá*. Bogotá: Ingeominas, 1994.
- . Contribuciones al Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. I. Cinco terremotos destructores de la colonia encontrados en los archivos históricos colombianos. En: *Rev. Ingeominas*, (4), 1994.
- . Contribuciones al Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. II. El terremoto de Tunjuelito (1644, marzo 16) y sus efectos geotectónicos en la zona epicentral. En: *Rev. Ingeominas*, (4), 1994.
- . Actualización del Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. En: *Rev. Ingeominas*, (4), 1994.
- Espinosa, A. *Actualización del catálogo colombiano de sismicidad histórica*. Cali: Ingeominas, 1993.
- Esteva, L. Seismic Risk and Seismic Design. En: Hansen, R. J. (edit.). *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. s. l.: The MIT Press, 1993, 142-182.
- Goberna, J. R. *The Historical Seismograms of Colombia. Historical Seismograms and Earthquakes of the World*. s. l.: Academic Press, 1988.
- Hanks, T. C. y Kanamori, H. A. Moment Magnitude Scale. En: *J. of Geoph. Res.*, 84(B5), 1979, 2348-2350.
- Ingeominas. *Estudios geológicos. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá*. Subproyecto 2, Bogotá: 1995.
- . *Sismicidad histórica. Informe de Actividades de 1986*. s. l.: GERSCO, 1987.
- Ingeominas-CEE. Sismicidad histórica y reciente del área de Popayán. Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán. En: *Pub. Esp.*, (2), 1972, 7-27.
- Ingeominas-Uniandes. *Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Convenio Interadministrativo 01-93*. Bogotá: Ingeominas, 1997.
- Instituto Geofísico. *Microzonificación Sísmica Campus Pontificia Universidad Javeriana. Sede-Bogotá*. Bogotá: 2002.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. En: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 1981, 2011-2038.

- Kanamori, H. The Energy Release in Great Earthquakes. En: *J. of Geoph. Res.*, 82(20), 1977, 2981-2987.
- Lobo-Guerrero, A. *Microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Estudio Geológico*. s. l.: s. e., 2002.
- MacGuire, R. K. *Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance*. s. l.: MIT, Department of Civil Engineering, Research Report R74-51, 1974.
- París, G. y Romero, J. Fallas activas en Colombia. Mapa neotectónico preliminar. En: *Bol. Geol.*, (34), 1994, 42.
- Ramírez, J. E. *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1975.
- _____ y Goberna, J. *Terremotos colombianos. Noviembre 23 y diciembre 12 de 1979*. Bogotá: s. e., 1980.
- Ruiz, S. Conceptos fundamentales de la teoría de probabilidades para análisis de riesgo sísmico. En: *Memorias del XXIV Curso Internacional de Ingeniería Sísmica*. México: UNAM, 1998.
- Salcedo, E. Sísmicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga. En: *Bol. Geol.*, (40), 2002, 180.
- _____. Estudio de sísmicidad histórica en la región de Bucaramanga (Colombia). En: *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, XXIII(87), 1999, 233-248.
- _____. *Sísmicidad y amenaza sísmica en Colombia*. Ph. D. tesis. Física MSU, Moscú (en ruso): 1992.
- Shebalin, N. V. *Focos de terremotos fuertes en la URSS*. Moscú: Inst. Física de la Tierra, Academia de Ciencias (en ruso), 1974.
- Smirnov, V. Experiencias en la estimación de la representatividad de datos de catálogos de sismos. En: *Vulcanology and Seismology*, (4), 1997, 93-105 (en ruso).
- Stepp, J. C. (). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. En: *Proc. Microzonation Conf*, Washington, Univ. Seattle, 2, 1972897-909.
- Tanner, J. G. y Shepherd, J. B. *Seismic Hazard in Latin America and the Caribbean*. I. Ottawa: IRDC, 1997.
- Taylor Castillo, W., Santos López, P., Dahle, A. y Bungum, H. *Digitization of Strong-Motion Data and Estimation of PGA Attenuation*. s. l.: NORSAR, 1992.
- Velásquez, E. y Jaramillo, J. D. *Estudio de la amenaza sísmica de Medellín*. Medellín: Universidad EAFIT, Alcaldía de Medellín y PNUD, Programa de Prevención Sísmica para Medellín (segunda etapa), parte I, 1993.
- Vergara, H., Taboada, A., Romero, J., y París, G. *Estudios neotectónicos para la microzonificación de Santa Fe de Bogotá*. Bogotá: Ingeominas, 1995.