ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA Y DE LA MAGNITUD REPRESENTATIVA PARA BOGOTÁ*

*Alexander 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 referencia a la interpretación de la sismicidad regional presentada en el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Bogotá. Se utilizó una base de datos que contenía 34920 registros sísmicos; luego de su depuración se escogieron 7539 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 $M_{mín}$, análisis de integralidad del catálogo, estimación de *b-value* para la región, la identificación de las fuentes sismogénicas con posible influencia en la zona considerada, así como 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.*

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

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

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

***** *Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana. Máster 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 the updating 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

1. 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 denominados zonificación sísmica o amenaza sísmica regional.

La zonificación sísmica no se refiere al estudio de la influencia de las condiciones locales del suelo, como tampoco 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, siendo el máximo terremoto ocurrido 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 estimar leyes de recurrencia a partir de la sismicidad registrada, con lo que resultan curvas de probabilidad por niveles 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 serían muy confiables. 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.

Bajo 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, incluyendo datos de los últimos años y considerando las técnicas de evaluación de la magnitud representativa, integralidad del catálogo y la identificación de las fuentes sismogénicas con posible influencia en la región bajo estudio, con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados y dar un aporte significativo en la evaluación de la amenaza sísmica. En este artículo se presentan los resultados de dicho estudio relacionados con el análisis de la sismicidad y de la magnitud representativa.

2. 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); el campus corresponde a la zona de transición entre los cerros y la zona plana de la ciudad y 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.

3. Análisis de la sismicidad

3.1 Sismicidad histórica

Hasta ahora la obra más completa sobre la sismicidad histórica de Colombia es la realizada por Ramírez [1975], donde se indica que la

primera noticia sísmica reportada como evento localizado en el territorio de Colombia corresponde a un sismo ocurrido en el año 1566 entre las ciudades de Popayán y Cali. En la actualidad se han llevado a cabo otros trabajos importantes, que generalmente responden a investigaciones realizadas para los estudios de microzonificación sísmica o tendientes a la profundización en el estudio de un evento sísmico particular [Ramírez, Goberna, 1980; Ingeominas, 1987; Ingeominas-CEE, 1992; Espinosa, 1993; Velásquez, Jaramillo, 1993; Espinosa, Histórica, 1994; Espinosa, Contribuciones, 1994; Espinosa, Tunjuelito, 1994; Espinosa, Actualización, 1994; Espinosa, 1996; Salcedo, 1999; Salcedo, 2002].

Considerando los registros sísmicos desde el siglo XVI, se puede destacar que los sismos sentidos o que han afectado de manera sustancial la región en estudio son relativamente pocos; los más importantes se listan en la Tabla 1. A estos eventos se les ha asignado una intensidad mayor o igual a VII. Pese a que han dejado efectos significativos en la ciudad de Bogotá, sus epicentros no necesariamente coinciden con las vecindades geográficas de la ciudad, lo cual está relacionado con los efectos físicos de extensión vertical y horizontal, generados por la cadena de subforos, de acuerdo con los modelos macrosísmicos [Shebalin, 1974].

Tabla 1. Sismos históricos más destacados con efectos macrosísmicos en la región en estudio

Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	Intensidad MSK [Ingeominas, Uniandes, 1997]	Intensidad MSK [Ramírez, 1975]
1616	02	---	5,00	-74,00	VII	---
1644	03	16	7,50	-72,50	IX	X-XII
1646	04	03	5,70	-73,00	VIII	---
1743	10	18	4,50	-73,80	VIII	X-XII
1785	07	12	4,70	-73,80	IX	X-XII
1805	06	16	5,30	-74,60	VIII	X-XII
1826	06	18	4,80	-73,90	VIII	X-XII
1827	11	16	1,90	-75,90	X	---
1917	08	31	4,00	-74,00	IX	---
1923	12	22	5,20	-73,20	VIII	X-XII
1924	01	07	4,70	-73,50	VIII	---
1928	11	01	5,50	-71,50	VII	---
1966	09	04	4,60	-74,00	VII	---
1967	02	09	2,90	-74,90	VIII	---
1967	07	29	6,84	-74,09	VIII	---

Fuente: adaptación de los autores a partir de datos de ocurrencia e intensidad en [Ingeominas, Uniandes, 1997] y [Ramírez, 1975].

Según los reportes sísmicos, el terremoto de julio 12 de 1785 es considerado como el mayor y el más destructor que haya experimentado Bogotá en el siglo XVIII [Ramírez, 1975]. Durante el terremoto de 1805 se observó un comportamiento estructural diferente según el sector de la ciudad [Ingeominas, 1997].

Ramírez [1975] describe el evento del 31 de agosto de 1917 como el terremoto más violento de la serie sentida en Bogotá y en casi todo Colombia. Este terremoto sacudió a la capital durante 15 segundos y se registraron daños en algunos edificios de la ciudad.

3.2 Sismicidad instrumental

El catálogo empleado inicialmente contenía 34920 registros sísmicos; luego de un cuidadoso tratamiento y depuración se eliminaron eventos con errores de formato y las réplicas. Finalmente, se seleccionaron los eventos correspondientes a la zona de influencia con lo que quedaron 7539 registros. El catálogo fue unificado de tal manera que los diferentes tipos de magnitud que figuraban para eventos de diversas partes fueron convertidos a un solo tipo de magnitud, M_S. El análisis seguido permite considerar los resultados aquí obtenidos como fiables desde el punto de vista estadístico.

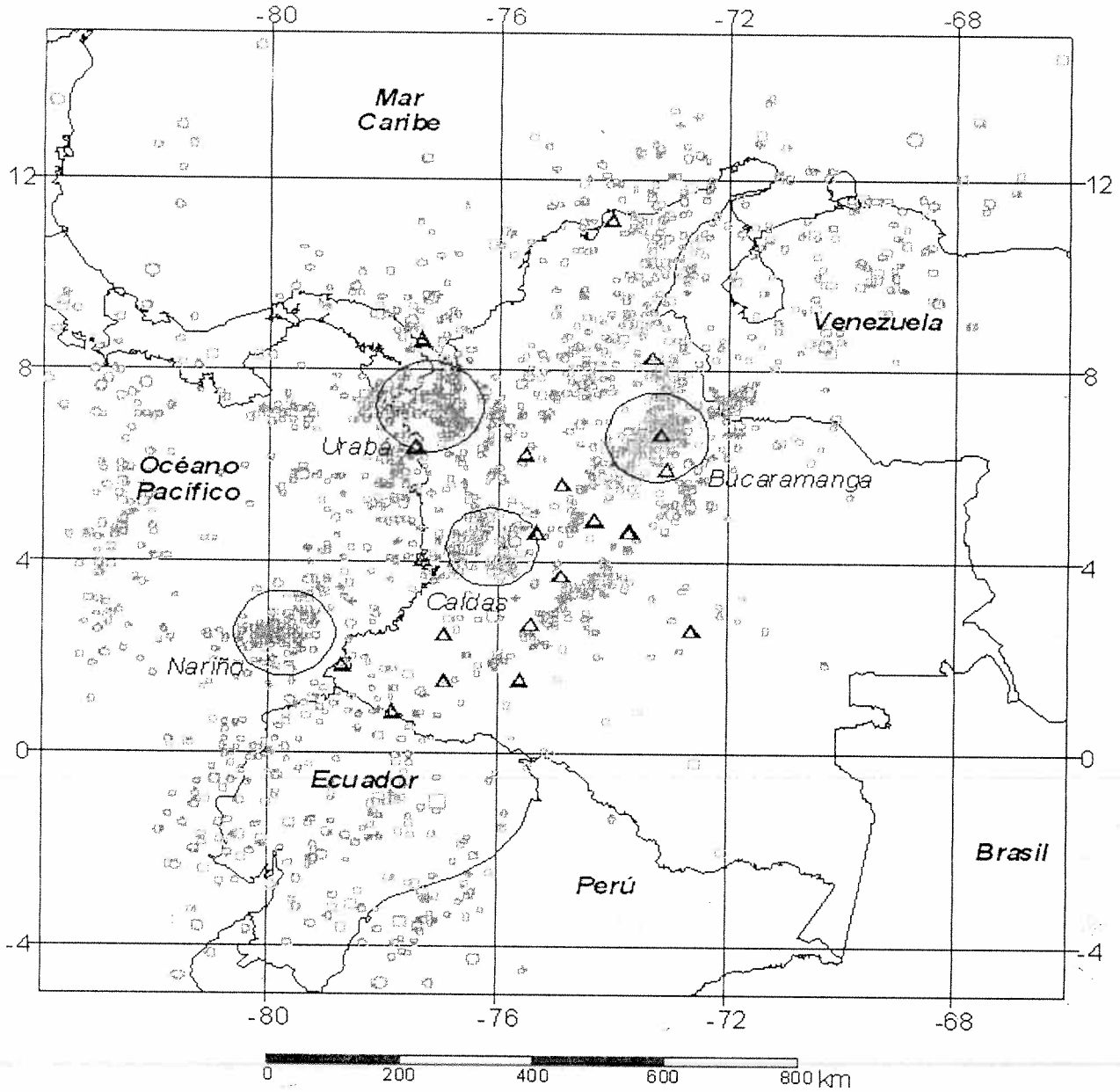
La Figura 1 muestra los epicentros de eventos sísmicos con $M_S > 2{,}0$ del catálogo depurado, en todo el territorio de Colombia [Caneva, Microzonificación, 2002]. Se distinguen cuatro regiones con un alto nivel de concentración de epicentros: al nororiente del país la región de Bucaramanga (nido de Bucaramanga), en la zona central la región del Viejo Caldas y en la costa del Pacífico las regiones de Urabá y de Nariño. Éstas son llamadas regiones sismoactivas de Colombia. Las regiones se diferencian tanto en cuanto a la naturaleza de la sismicidad (subducción, vulcanismo, etc.) como en sus manifestaciones externas (tasas de ocurrencia, magnitudes máximas, etc.) [Coral, 1984; Salcedo, 1992]. Además, se nota una significativa alineación de epicentros a lo largo de la zona que separa la región montañosa de la parte plana, coincidiendo con la extensión de la falla del borde llanero o de Guaicáramo.

Bogotá está localizada fuera de dichas regiones sismoactivas; sin embargo, presenta un grado de sismicidad considerable. La Figura 2 muestra los epicentros localizados en la zona de influencia. Si se estima que a una distancia de 100 km del foco del sismo la aceleración pico en roca no supera el valor de $0{,}1g$, donde g es el valor de la aceleración de la gravedad [Bolt et al., 1977], se considera que los sismos localizados a más de 200 km del sitio de interés no son relevantes en cuanto al daño que puedan ocasionar. A partir de lo anterior, se seleccionó como zona de influencia una región de radio 4° de latitud por 4° de longitud con centro en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana.

La sismicidad en Colombia está bien diferenciada espacialmente tanto en superficie como en profundidad. En la Figura 3 se observa que los sismos con hipocentros profundos se localizan predominantemente al

nororiente de la zona de influencia en la región del nido de Bucaramanga, y al suroccidente de la zona de influencia. Caneva [2000; Parámetros, 2002] analiza detalladamente la agrupación (autosemejante, fractal) de hipocentros en Colombia.

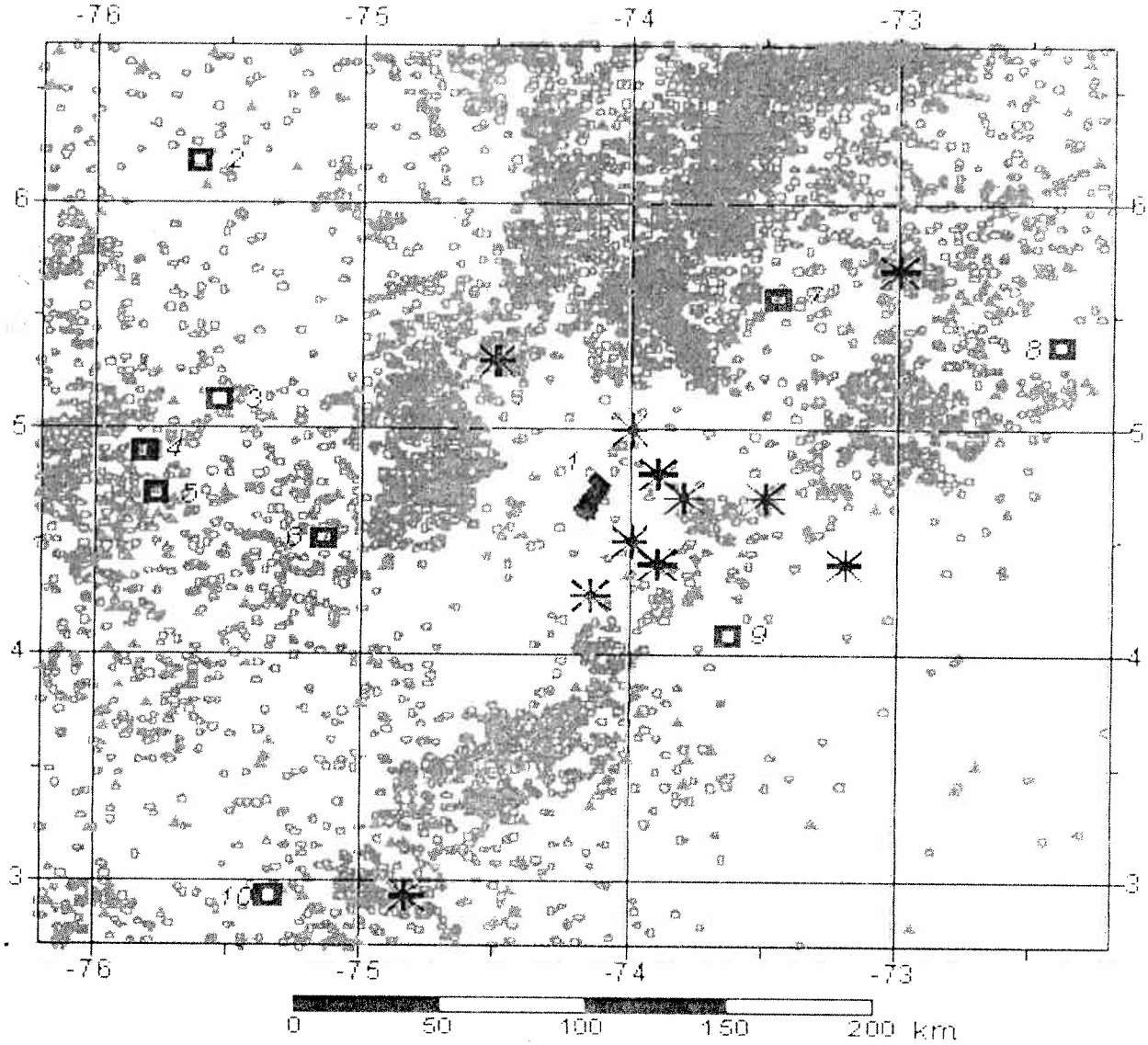
Figura 1. Distribución de epicentros (MS =2,0) para todo el territorio de Colombia y sus alrededores. Catálogo depurado (sin réplicas) de 1993 a 2002.



△: Estaciones de la Red Sismológica Nacional de Colombia. Eventos con profundidad de hipocentros ○ : H < 100 km. □ : H≥100 km. Los círculos grandes destacan la ubicación de las regiones sismoactivas de Colombia.

Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

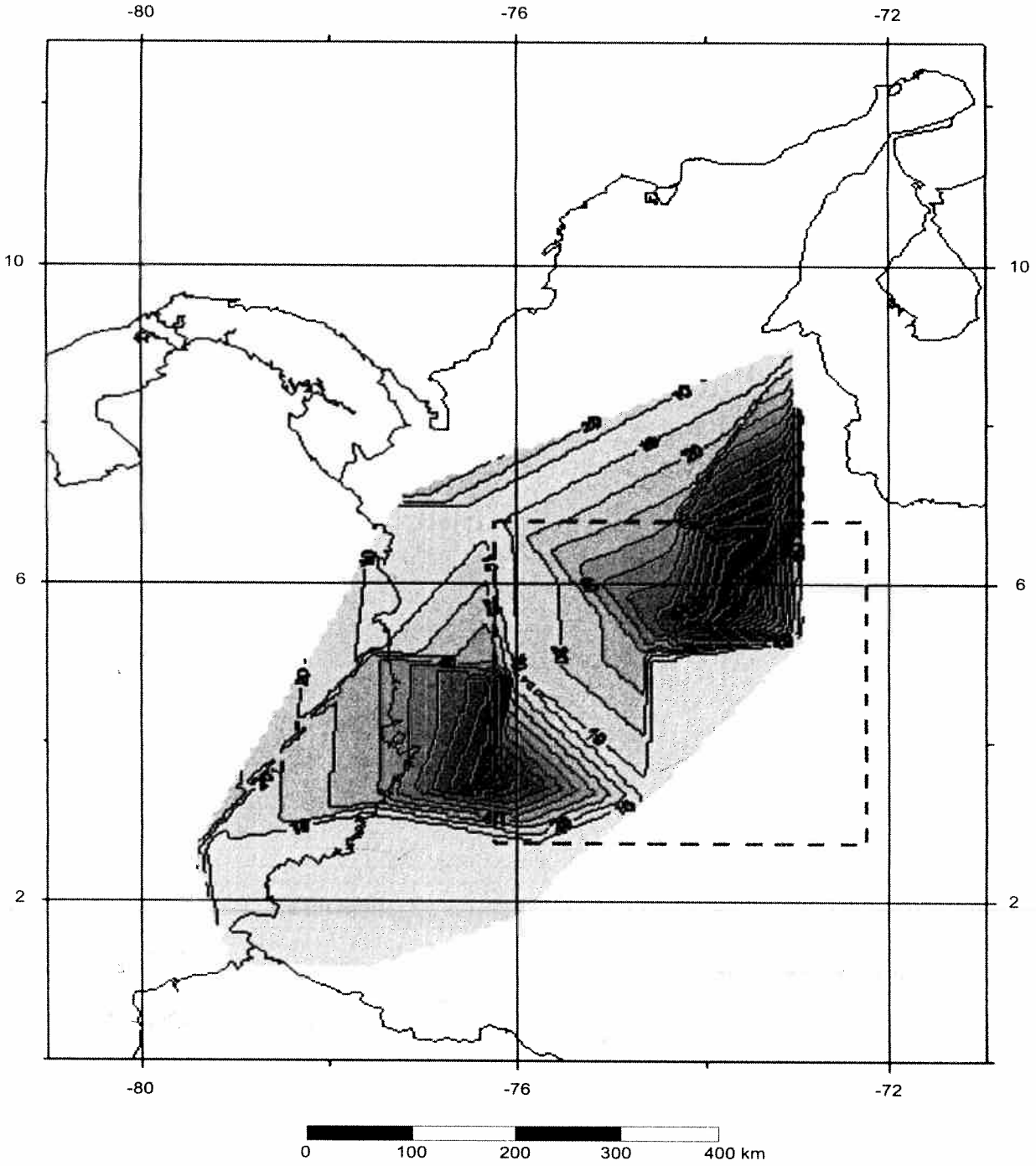
Figura 2. Distribución de epicentros en el área de influencia. Catálogo depurado (sin réplicas) de 1993 a 2002.



○ : eventos con MS < 2. ▲: eventos con MS ≥ 2. ✳: eventos más destacados del catálogo histórico (véase Tabla 1). □: Principales ciudades: 1 – Bogotá; 2 – Medellín; 3 – Manizales; 4 – Pereira; 5 – Armenia; 6 – Ibagué; 7 – Tunja; 8- Yopal; 9 Vilavicencio; 10 – Neiva.

Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

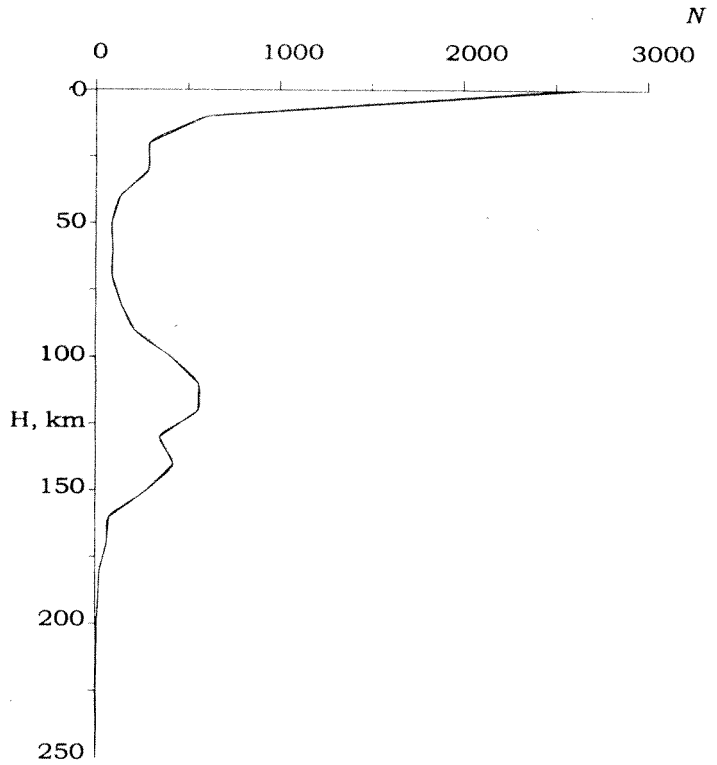
Figura 3. Variación de la profundidad de hipocentros en el territorio de Colombia. La línea de trazos delimita la región representada en la Figura 2.



Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

En la Figura 4 se muestra la distribución del número de sismos según la profundidad en la región en estudio. La mayoría de eventos tienen hipocentros superficiales. Se presenta un incremento poco significativo del número de sismos a profundidades del orden de 120 a 140 kilómetros. En su mayoría estos eventos están localizados en el nido de Bucaramanga (Figura 1). Allí la sismicidad se caracteriza por hipocentros profundos y bien localizados espacialmente [Caneva, 2000; Caneva, Parámetros, 2002]. En la región en estudio la sismicidad es predominantemente somera con un incremento de la profundidad de hipocentros hacia las regiones sismoactivas de Bucaramanga y Caldas.

Figura 4. Distribución del número *N* de sismos según la profundidad *H* en la región en estudio.



Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

4. La magnitud representativa

Los registros de la actividad sísmica de cualquier región se caracterizan por el alto grado de heterogeneidad tanto en el tiempo como en el espacio. La heterogeneidad temporal de los registros en Colombia está relacionada, por ejemplo, con la ausencia de registros instrumentales antes del año 1923 [Ramírez, 1975] y con la lenta introducción de nuevas estaciones sismológicas en Colombia [Ingeominas, 1995].

Es importante determinar la fiabilidad, en cuanto a precisión se refiere, de la información contenida en el catálogo de sismos de Colombia. El desarrollo de la red sismológica en el país se ha caracterizado por períodos de avance y otros de estancamiento con intervalos de tiempo

extensos entre los momentos de cambio y modernización de las estaciones y de la red [Ingeominas, 1997]. La introducción en la red de instrumentos más sensibles, con el consiguiente incremento del poder de resolución de la misma, se refleja en la calidad de los datos que ingresan al catálogo de sismos. La calidad y la cantidad de datos obtenidos después de complementar la red sismológica con instrumentos nuevos son diferentes para antes y después de la innovación.

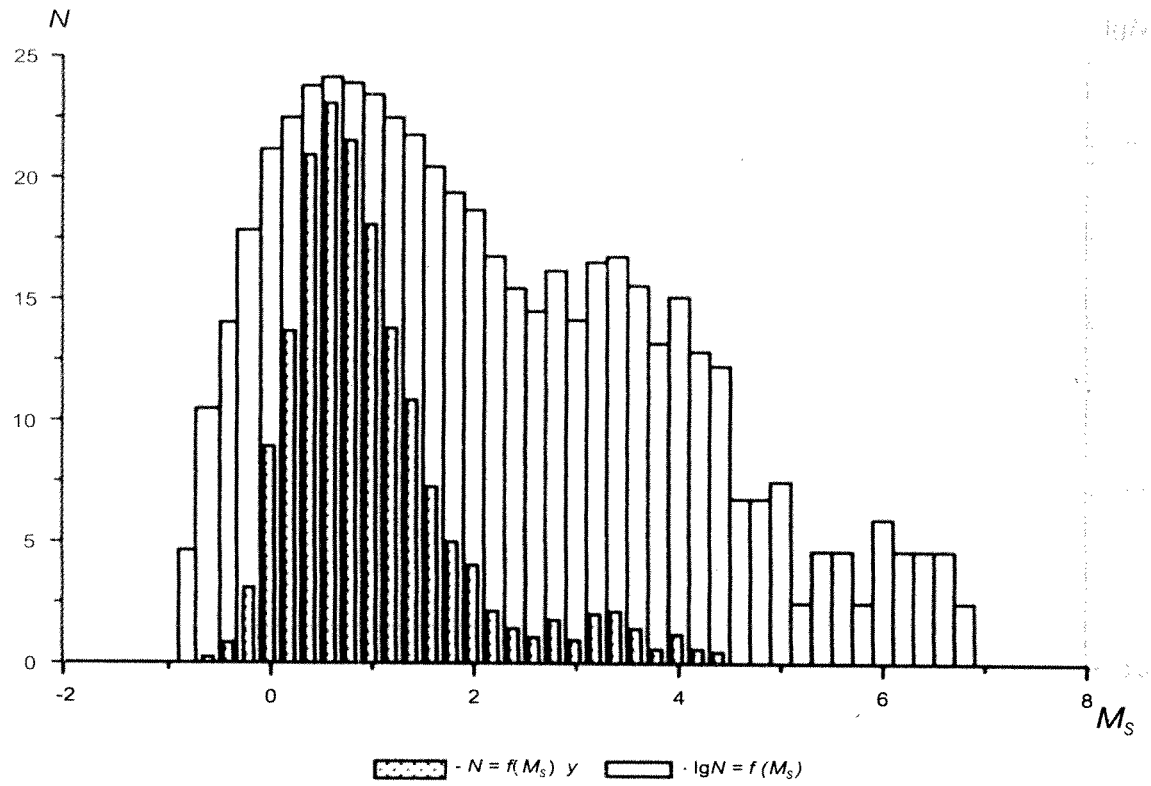
Respecto a la heterogeneidad espacial se deben considerar dos aspectos: primero, la calidad de las estaciones sismológicas y, segundo, su ubicación geográfica [Smirnov, 1997]. Con relación al primer aspecto cabe anotar que los instrumentos utilizados en diferentes redes en el país –la red sismológica del Instituto Geofísico Universidad Javeriana (IGUJ), la red del Observatorio Sismológico del Sur-Occidente Colombiano (OSSO) y la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), entre otras–, se diferencian sustancialmente entre sí en cuanto a calidad y cantidad se refiere; del segundo aspecto se puede mencionar que han sido varias las fuentes que suministran información para conformar el catálogo general de sismos de Colombia (desde redes locales hasta redes internacionales) [Ingeominas, 1995], lo que incrementa la heterogeneidad de los datos, pues las dimensiones de las regiones atendidas por dichas redes son diferentes. De esta manera, es necesario seleccionar aquellos datos que se caractericen por su homogeneidad en cuanto a calidad se refiere. No es lo mismo considerar válido un registro de $M = 4$ correspondiente a un evento de comienzos del siglo XIX y otro de finales del siglo XX. Es preciso establecer el valor mínimo fiable de magnitud para los eventos sísmicos en cierta región determinando la magnitud representativa [Caneva, Catálogo, 2002; Caneva, Memorias, 2002].

Las redes sismológicas cuentan con características que determinan la representatividad de los datos por ellas registrados, es decir, qué tan fiables son éstos. Entre estas características se tienen, por un lado, la sensibilidad, que es determinada por la magnitud representativa $M_{mín}$, la cual corresponde al valor mínimo de magnitud de los sismos que son registrados sin interrupción en una región dada del espacio, y, por otro lado, el poder de resolución, que está relacionado con la incertidumbre en la determinación de las coordenadas, del tiempo y de la magnitud del sismo [Smirnov, 1997]. La magnitud representativa $M_{mín}$ permite comparar los registros correspondientes a diferentes períodos de la historia del desarrollo de la red sismológica de una región determinada, así como también los registros correspondientes a diferentes regiones geográficas.

Al llevar a cabo la estimación de $M_{mín}$ se asume que la distribución de los sismos según los valores de sus energías está dada por la ley de potencia, es decir, el número de sismos en función de su energía (o su magnitud) se expresa mediante la relación de Gutenberg-Richter llamada también ley de recurrencia sísmica [Aki, Richards, 1982].

En la Figura 5 se muestra el gráfico de recurrencia sísmica para la región en estudio. Si cierto número de eventos de determinada magnitud M, por una u otra razón, no figuran en el catálogo (no fueron registrados), entonces el número total de eventos N de dicha magnitud no corresponderá al valor esperado según el gráfico de recurrencia (gráfico del número de sismos en función de su energía o de su magnitud) sino a un valor menor. En el gráfico de recurrencia esta situación se evidencia debido a que el valor N no coincide con aquel que se esperaría encontrar según la recta correspondiente a la relación de Gutenberg-Richter:

Figura 5. Gráfico de recurrencia (número de eventos por año en función de la magnitud) para la región en estudio. Catálogo depurado (sin réplicas) de 1958 a 2002.



Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

$$\lg N = a \quad bM \tag{1}$$

donde:

a: constante

b: pendiente del gráfico de recurrencia (*b*-value)

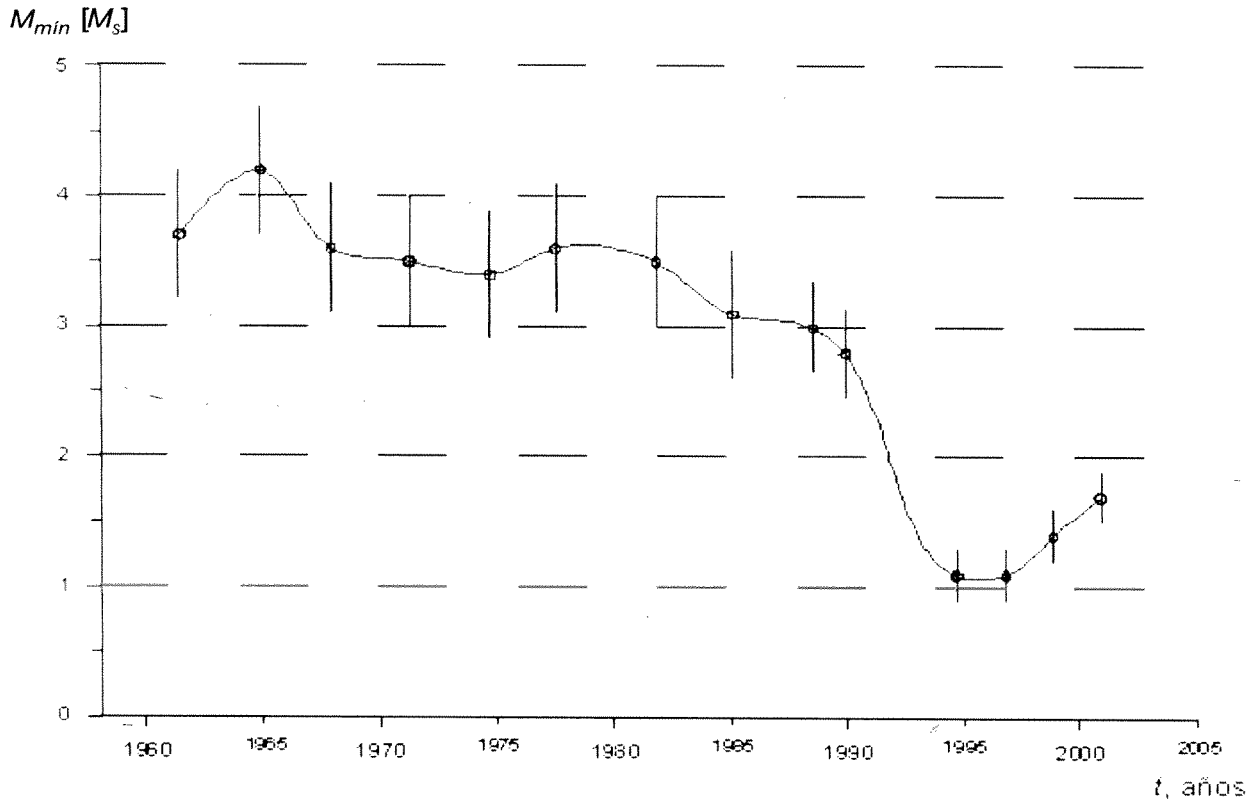
M: magnitud

En lugar de esto, el valor N se encuentra por debajo de dicha recta. Justamente esto es lo que se observa al trabajar con valores de magnitud bajos. En este caso, debido al grado de sensibilidad de los instru-

mentos, los eventos cuya magnitud es inferior a cierto valor umbral no son registrados, por lo cual se presenta una inflexión brusca del gráfico de recurrencia. Identificando esta inflexión se puede determinar la mínima magnitud registrada $M_{mín}$ por la red. La desviación (alejamiento) con respecto a la curva del gráfico de recurrencia (relación de Gutenberg-Richter) para valores pequeños de magnitud es un indicador de la sensibilidad de los instrumentos que componen la red sismológica.

Al trabajar con el catálogo de sismos de Colombia se debe tener en cuenta que la información correspondiente al intervalo de tiempo anterior a 1993 es representativa para registros con magnitud $M_{mín} \geq 4$. Los registros posteriores a 1993 son más precisos en cuanto a la magnitud se refiere, siendo fiables los registros con $M_{mín} \geq 2$. Teniendo en cuenta el margen de error en la estimación de $M_{mín}$ se pueden considerar representativos (fiables) eventos con magnitud $M_{mín} \geq 2,5$ [Caneva, Microzonificación, 2002]. Para un catálogo de registros históricos son fiables los eventos con magnitud $M > 5$ [Smirnov, 1997; Caneva, Parámetros, 2002]. En la Figura 6 se puede ver la variación del valor de la magnitud representativa con el tiempo para la región en estudio [Caneva, Microzonificación, 2002].

Figura 6. Variación de la magnitud representativa M_{mn} [Ms] en el tiempo.



Fuente: [Caneva, Microzonificación, 2002].

5. CONCLUSIONES

Este artículo resume los aspectos más importantes de la evaluación de la amenaza sísmica regional realizada para los estudios de microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana – sede 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 realizar estudios adicionales de campo para mejorar aún más la caracterización geométrica y el nivel de actividad de dichas fallas. Se debe incentivar la realización de trincheras en las fallas que muestran mayor actividad para determinar con más fiabilidad sus tasas de actividad.

Se llevó a cabo la estimación de la magnitud representativa para el catálogo de eventos sísmicos de la región en estudio. Se obtuvo que los registros con valores de magnitud $M_s \geq 2,5$ son realmente representativos. Se analizaron las variaciones de la magnitud representativa en el tiempo. Se demostró que hasta 1993, año en que entra en operación la RSNC, eran representativos únicamente 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 coherente y consistente, estimar 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.

Por las implicaciones económicas y sociales que tienen los estudios de amenaza sísmica se recomienda mejorar los estudios geológicos, sismológicos y aumentar la instrumentación sismológica, así como 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 la 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 datos y resultados.

REFERENCIAS

Aki, K. y Richards, P. (1982), *Quantitative Seismology. Theory and Methods*, Freeman Fox.

Algermissen, S. (1976), Probabilistic Estimates of Maximum Acceleration and Velocity in Rock the Contiguous United States, Dep. Interior - Geological Survey - Open File Report 82-1033.

Ambraseys, N. N. y Bommer, J. J. (1996), "Prediction of Vertical Response Spectra in Europe". En: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(4), 401-412.

Aptikaev, F. y Kopnichev, J. (1980), Correlation Between Seismic Vibration Parameters and Type of Faulting. Proceedings Seventh World Conference Earthq. Eng. Vol. 1, 107-110.

Bolt, B. A., Horn, W. L., Mac Donald, G. A. y Scott, R. F. (1977), *Geological Hazards*, Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Boore, D. M., Joyner, W. B. y Fumal, T. E. (1997), "Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: Summary of Recent Work". En: *Seismological Research Letters*, 68(1), 128-153.

Caneva, A. (2000), Propiedades fractales del régimen sísmico de Colombia. Ph.D. tesis. Física MSU, Moscú, Rusia. En ruso.

Caneva, A. (2002). Microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Estudio de Amenaza Sísmica. Bogotá.

Caneva, A. (2002), "Magnitud representativa del catálogo de sismos de Colombia". En: *Ingeniería y Universidad*, 6 (1), 9-17.

Caneva, A. (2002), Magnitud representativa. Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología, Bogotá.

Caneva, A. (2002), Parámetros de la ley generalizada de recurrencia sísmica b-value y d-value. Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología, Bogotá.

Coral, C. (1984), Particularidades de la sismicidad en Colombia. Ph.D. tesis. Física MSU, Moscú, Rusia. En ruso.

Crouse, C. B. (1991), "Ground-Motion Attenuation Equations for Earthquakes on the Cascadia Subduction Zones". En: *Earthq. Eng.*, 32 (4), 193-220.

Dahle, A., Bungum, H. y Kvamme, L. B. (1990), "Attenuation Modelling based on Intraplate Earthquake Recordings". Proc. Ninth European Conf. *Earthq. Eng.*, Vol. 4-A, 121-129.

Dahle, A., Bungum, H. y Kvamme, L. B. (1990), "Attenuation Models Inferred from Intraplate Earthquake Recordings". En: *Earthq. Eng. and Structural Dynamics*, 19 (8), 1125-1141.

Dahle, A., Climent, A., Taylor, W., Bungum, H., Santos, P., Ciudad Real, M., Linholm, C., Strauch, W. y Segura, F. (1995), New Spectral Strong-Motion Attenuation Models for Central America, Proc. Fifth International Conf. Seismic Zonation, Vol. II. 1005-1012.

Donovan, N. C. (1973), A Statistical Evaluation of Strong-Motion Data Including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake. Proc. Fifth World Conf. *Earthq. Eng*, Vol. 1, 1252-1261.

Douglas, J. (2001), A Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000). Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

Espinosa, A. (1993), Actualización del Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. Informe interno, Ingeominas, Cali, Colombia.

Espinosa, A. (1994), Sismicidad histórica de Santafé de Bogotá y su área (1500-1994). Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, Ingeominas.

Espinosa, A. (1994), "Contribuciones al Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. I. Cinco terremotos destructores de la Colonia encontrados en los Archivos Históricos Colombianos". En: Revista *Ingeominas*, 4.

Espinosa, A. (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: Revista *Ingeominas*, 4.

Espinosa, A. (1994), "Actualización del Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica". En: Revista *Ingeominas*, 4.

Espinosa, A. (1996). Sismicidad histórica de la ciudad de Pereira y su área. Proyecto Microzonificación sísmica de Pereira, Santa Rosa de Cabal y Dosquebradas. Inédito.

Esteva, L. (1970), Seismic Risk and Seismic Design, pp. 142-182. En: Hansen, R. J. (ed.), *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, The MIT Press.

Goberna, J. R. (1988), *The Historical Seismograms of Colombia. Historical Seismograms and Earthquakes of the World*, Academic Press Inc.

Hanks, T. C. y Kanamori, H. (1979), "A Moment Magnitude Scale". En: *J. of Geoph. Res.*, 84 (B5), 2348-2350.

Ingeominas-CEE (1992), Sismicidad histórica y reciente del área de Popayán. Microzonificación sismogeotécnica de Popayán, *Pub. Esp*, 2, 7-27.

Ingeominas (1987), Sismicidad histórica. Informe de actividades de 1986, Gersco.

Ingeominas (1995), Estudios geológicos. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. Subproyecto No. 2, Santafé de Bogotá.

Ingeominas, Universidad de los Andes (1997), Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. Convenio Interadministrativo 01-93. Publicación Especial Ingeominas.

Instituto Geofísico (2002), Microzonificación sísmica campus Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá.

Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1981), "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), 2011-2038.

Kanamori, H. (1977), "The Energy Release in Great Earthquakes". En: *J. of Geoph. Res.*, 82 (20), 2981-2987.

Lobo-Guerrero, A. (2002), Microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá, estudio geológico.

MacGuire, R. K. (1974), Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance. MIT, Department of Civil Engineering, Research Report R74-51.

París, G. y Romero, J. (1994). "Fallas activas en Colombia: mapa neotectónico preliminar". En: *Bol. Geológico*, 34, *Ingeominas*.

Ramírez, J. E. (1975), *Historia de los terremotos en Colombia*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.

Ramírez, J. E. y Goberna, J. (1980), *Terremotos colombianos*. Noviembre 23 y diciembre 12 de 1979, Bogotá.

Ruiz, S. (1998), *Conceptos fundamentales de la teoría de probabilidades para análisis de riesgo sísmico*. Memorias del XXIV Curso Internacional de Ingeniería Sísmica, UNAM, México.

Salcedo, E. (1992), Sismicidad y amenaza sísmica en Colombia. Ph.D. tesis. Física MSU, Moscú, Rusia. En ruso.

Salcedo, E. (1999), "Estudio de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga (Colombia)". En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Acad. Colomb. Cienc.*, XXIII (87), 233-248.

Salcedo, E. (2002), "Sismicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga". En: *Boletín Geológico Ingeominas*, 40.

Shebalin, N. V. (1974), *Focos de terremotos fuertes en la URSS*. Public. Inst. Física de la Tierra, URSS, Academia de Ciencias, Moscú. En ruso.

Smirnov, V. (1997), "Experiencias en la estimación de la representatividad de datos de catálogos de sismos". En: *Vulcanology and Seismology*, 4, 93-105. En ruso.

Stepp, J. C. (1972), "Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard". En: *Proc. Microzonation*, Conf. Univ. Seattle. Washington, Vol. 2, 897-909.

Tanner, J. G. y Shepherd, J. B. (1997), Seismic Hazard in Latin America and the Caribbean, Vol. I: Project Catalog and Seismic Hazard Maps, IRDC, Ottawa.

Taylor Castillo, W., Santos López, P., Dahle, A. y Bungum, H. (1992), Digitization of Strong-Motion Data and Estimation of PGA Attenuation. Tech. Rept. 2-4. Norsar.

Velásquez, E. y Jaramillo, J. D. (1993), *Estudio de la amenaza sísmica de Medellín*, Universidad EAFIT, Alcaldía de Medellín y PNUD, Programa de Prevención Sísmica para Medellín, Segunda Etapa, Parte I, Medellín.

Vergara, H., Taboada, A., Romero, J. y París, G. (1995), *Estudios neotectónicos para la microzonificación de Santa Fe de Bogotá*, Ingeominas, Bogotá.

HEMEROTECA