

Incertidumbres en la evaluación de la amenaza sísmica para Bogotá – Colombia

Andrés José Alfaro Castillo*

Structural Engineering is the art of molding materials we do not really understand, into shapes we cannot really analyze, so as to withstand forces we cannot really assess, in such a way that the Public does not really suspect¹

R.B Corotis (Concrete Int. (7),4:42-49, 1985)

RESUMEN

Este artículo presenta cuatro evaluaciones probabilísticas de la Amenaza Sísmica para Bogotá. En las cuales se destacan incertidumbres con relación al análisis estadístico de los datos y a la utilización de las ecuaciones de atenuación. Adicionalmente se realiza una estimación de las magnitudes esperadas de acuerdo con características geométricas de fallas en y alrededor de la ciudad. Se deben realizar esfuerzos importantes para la ejecución de labores de campo con el fin de determinar los eventos ocurridos, su magnitud y estimar el momento de su ocurrencia.

Palabras clave: amenaza, sismos, estocástico, determinista, Bogotá, Colombia.

UNCERTAINTIES ON SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR BOGOTÁ – COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents four probabilistic assessments for Seismic hazard in Bogotá. In such assessments there are notorious uncertainties related to statistical data analysis and attenuation equations use. Additionally an estimation of expected magnitudes was done according to geometrical characteristics of seismic faults in and around the city. It is necessary to do significant efforts to carry out field works in order to assess previous seismic events, their magnitude and occurrence time.

Key Words: hazard, earthquake, stochastic, deterministic, Bogotá, Colombia.

* Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Investigador del CIEES.

Correo electrónico: alfaro@ciees.org, aalfaro@lasalle.edu.co

¹ La Ingeniería Estructural es el arte de moldear materiales que no entendemos realmente, en forma que no podemos analizar, sometidos a fuerzas que no podemos realmente calcular de tal forma que la gente no se de cuenta.

Fecha de recepción: julio 1 de 2007.

Fecha de aprobación: agosto 10 de 2007.

INTRODUCCIÓN

Colombia está situada en una zona sísmicamente activa, con una complejidad tectónica, debido a la interacción de cuatro placas que han formado el relieve del territorio. Podría decirse que la geomorfología de Colombia tiene características únicas. La misma dinámica ha generado alrededor de cien estructuras volcánicas, con un buen número de volcanes activos. De otro lado, la ciudad de Bogotá alberga alrededor del veinte por ciento de la población del país, generando más de la cuarta parte del producto interno de la nación. La evaluación de la magnitud esperada de un sismo se puede realizar desde puntos de vista estocástico y determinístico. Siendo el primero más rápido y relativamente fácil de realizar. En tanto que el determinístico implica un conocimiento detallado de las fuentes sismogénicas, con dos factores principales: estimación de las magnitudes esperadas y los períodos de retorno asociados. Este artículo presenta una evaluación probabilista de la amenaza sísmica, enfatizando en la incertidumbre que genera la atenuación de la energía. Adicionalmente, presenta una estimación de las magnitudes esperadas por la actividad de las fallas geológicas, mostrando las diferencias significativas que existen en la caracterización de las mismas.

En términos generales, existen dos grandes metodologías para la determinación de la amenaza sísmica en un sitio, son la probabilista y la determinista; en la primera, los datos a usar corresponden a un análisis estadístico de los sismos registrados en la región de interés; en la determinista es además necesario conocer a profundidad las fuentes sismogénicas de la zona de interés. En el caso de los sismos, la información de los eventos de magnitud mayor a 5.0 está contenida en los catálogos mundiales, varios de ellos disponibles en forma abierta y gratuita en Internet. No ocurre lo mismo con la información de las fallas geológicas. La determinación del nivel de actividad

de las fallas implica labores de campo y recursos importantes en tiempo y dinero para saber con certeza la magnitud de los terremotos que han generado la falla en estudio y lo más importante, su período de recurrencia. Si bien existen análisis estadísticos que relacionan parámetros de las fallas con las magnitudes esperadas (Wells y Coppersmith, 1994) estos deberían tomarse como valores de referencia.

Otro factor que involucra incertidumbres es la determinación de la atenuación de la señal sísmica con la distancia. Debido a la baja densidad de instrumentación sísmica en Colombia; y a pesar de ser una región propensa a sismos, la frecuencia de ocurrencia de los mismos es más baja, que en otras regiones del mundo, como lo es Japón. En la actualidad, no se cuenta con ecuaciones robustas de atenuación para Colombia, lo cual hace necesaria la utilización de ecuaciones desarrolladas en otras partes del mundo; es decir, que fueron desarrolladas en geologías y procesos tectónicos diferentes.

EVALUACIONES PROBABILISTAS DE LA AMENAZA SÍSMICA PARA BOGOTÁ

Las evaluaciones probabilistas de la amenaza sísmica para Bogotá se realizaron siguiendo a Hanks y Cornell (1994) y a Takada (2005). En primer lugar, se observó la sismicidad histórica: localización, tamaño y momento de ocurrencia de los sismos en un área de 400 km² comprendida entre las coordenadas 2,7° y 6,7° latitud Norte y entre 76,7° y 72,7° longitud Oeste. Los sismos abarcan desde el año de 1745 hasta el 2006. Siguiendo a Takada (2005) se tuvieron en cuenta los sismos con magnitud mayor a 5.0, que son aquellos que pueden causar daños en edificaciones y víctimas. Por otra parte, se asume que la ocurrencia de los sismos en esta región es un Proceso de Poisson, con una tasa constante de sismos en el tiempo y en el espacio. Los catálogos utilizados fueron Ramírez (1975) y los de SISRA y USGS disponibles en Internet (USGS, 2007).

Con el fin de unificar las escalas de Magnitud a Ms, se utilizaron los estudios de Chen y Chen (1989), los cuales ajustaron un conjunto de datos globales con valores de desviación estándar individual $\log M_0$ de aproximadamente $+0.4$ y confirmaron la saturación de Ms aproximadamente en 8.5, las ecuaciones son la 1, 2 y 3.

$$\log M_0 = 1.0 Ms + 12.2 \quad \text{para } Ms \leq 6.4, \quad (1)$$

$$\log M_0 = 1.5 Ms + 9.0 \quad \text{para } 6.4 < Ms \leq 7.8, \quad (2)$$

$$\log M_0 = 3.0 Ms - 2.7 \quad \text{para } 7.8 < Ms \leq 8.5, \quad (3)$$

Para M_0 y magnitudes de ondas internas mb (período de 1 segundo) las relaciones dadas por Chen y Chen (1989) se presentan en las ecuaciones 4 y 5, con saturación mb de 6.5 para $\log M_0 > 20.7$.

$$\log M_0 = 1.5 mb + 9.0 \quad \text{para } 3.8 < mb \leq 5.2, \quad (4)$$

$$\log M_0 = 3 mb + 1.2 \quad \text{para } 5.2 < mb \leq 6.5, \quad (5)$$

ESTIMACIÓN DETERMINISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA PARA BOGOTÁ

La evaluación determinista implica la realización de trincheras en las fallas geológicas, con el fin de determinar los desplazamientos súbitos del terreno y realizar la datación de los estratos geológicos para estimar cuando se presentaron los eventos sísmicos.

En este estudio se realiza una estimación de las posibles magnitudes que se presentarían en las fallas geológicas caracterizadas por Lobo-Guerrero (2002) mediante la utilización de las ecuaciones de Wells y Coppersmith (1994), ecuaciones 6, 7 y 8.

Falla de desgarramiento

$$Mw = 5.16 + 1.12 \text{ Log (LRS)} \quad (6)$$

$$\text{Falla Inversa } Mw = 5.00 + 1.22 \text{ Log (LRS)} \quad (7)$$

$$\text{Falla Normal } Mw = 4.86 + 1.32 \text{ Log (LRS)} \quad (8)$$

donde LRS es la longitud de ruptura superficial en kilómetros

Las cuales tienen las restricciones que se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. LÍMITES PARA LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES 6, 7 Y 8

Tipo de Falla	Rango de magnitud Momento Mw	Rango de Longitud (Km)
Desgarramiento	5.6-8.1	1.3-432.0
Inversa	5.4-7.4	3.3-85.0
Normal	5.2-7.3	2.5-41.0

Fuente: Wells y Coppersmith, 1994.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, la cual adicionalmente compila las fuentes sismogénicas de los estudios de Ingeominas y Universidad de los Andes (1997); París *et al.* (2000) y Lobo-Guerrero (2002). En el análisis comparativo de fuentes sismogénicas se pueden observar diferencias importantes en las fallas que potencialmente podrían afectar a Bogotá. Cabe destacar la Falla de Bogotá, que bordea la ciudad en el oriente, la cual ha sido catalogada

por Lobo-Guerrero (2002, 2005) como inactiva. La única falla común a los tres estudios es la de Ibagué, la cual, a pesar que se estima que podría generar sísmos con magnitudes Ms de 7.0, debido a la distancia a la ciudad de Bogotá, las aceleraciones esperadas podrían ser del orden de 60 gales, varias veces por debajo de los espectros sísmicos de diseño (Alfaro, 2006; Alfaro y Van Hissenhoven, 2007).

Una falla que habría que estudiar detalladamente es la del Río Tunjuelito, la cual podría generar sismos con magnitudes de 6, pero se encuentra en el casco urbano de la ciudad. Otras fallas con similares características son Cajitas y Los Lagartos, ambas activas y dentro del perímetro de la ciudad.

INCERTIDUMBRES EN LA ESTIMACIÓN DE LA ATENUACIÓN SÍSMICA

En la determinación de las aceleraciones asociadas a cada evento es necesario determinar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo, Douglas (2001) recopiló 197 ecuaciones. Los criterios para seleccionar las ecuaciones fueron los siguientes:

aquellas ecuaciones que utilizan M_s , ya que el catálogo sísmico se unificó a M_s . En segundo lugar, que para su desarrollo se hubiera utilizado un número representativo de datos. Finalmente, que respondiera a sismos por fallas geológicas, antes que a zonas de subducción.

Si bien la zona de subducción en el Pacífico Colombiano, denominada Trinchera Colombia, ha generado sismos de gran magnitud: 1906 ($M_w=8.8$); 1942 ($M_s=7.9$); 1958 ($M_s=7.8$); 1979 ($M_s=7.7$) y 2004 ($m_b=7.2$). Ninguno de ellos generó daños en Bogotá, por lo cual no se considera ésta fuente sísmogénica para la ciudad (Ramírez, 1975; Ramírez, 1980; OSSO, 2007).

FALLA	Ingeominas y Universidad de los Andes (1997)				Paris et al. (2000)							Lobo-Guerrero, 2002				Este estudio				
	LONG (km)	AZMUT/BRIZAMIENTO	TIPO DE FALLA*	CLASIFICACION DE ACTIVIDAD	Mmax	TASA DE ACTIVIDAD (mm/año)	TIPO DE FALLA*	AZMUT/BRIZAMIENTO	LONG (km)	TIPO DE FALLA*	Mmax	TR años	Último movimiento años	LONG (km)	AZMUT/BRIZAMIENTO		TIPO DE FALLA*	CLASIFICACION DE ACTIVIDAD	TASA DE ACTIVIDAD (mm/año)	Mw_max
Acacias	30	30:30 W	I	I	6.6															
Alto del Trigo						114.9	N13.8E+-12	I-RS	<0,2		10000-400000			90	0-35 / E	I-RD	Pot. Activa	---	7.3	
Aposentos														13	160 / 90	N	Activa	Extrem. Baja	6.3	
Armenia	60	30W	ID	A-IA	6.8	32	N23.2E+-11	RD	<0,2	M66,5-6,8	1000	<4820		30	165 / 80 E	N	Incierta	---	6.8	
Balsillas																				
Barandillas														14	45 / 90	N	Activa	Extrem. Baja	6.4	
Bituima						179.5	N28,5E+-17	I-RS	0,01-0,1	6.3	3000-30000			90	0-20 / E	I-RS	Pot. Activa	---	7.3	
Bogotá	50	10E	I	B	6.4	78.8	N13,5E+-7	I-RD	0,01-0,1		10000-40000	<1.6Ma		107	N10E/15-25E	I-RD	Inactiva	0	--	
Bojacá														4	165 / E	I ?	Pot. Activa	---	5.7	
Buenavista														6	45 / 70 E	N	Incierta	---	5.9	
Buque														11	100 / 90	RS	Incierta	---	6.3	
Cajitas	35	10 E	ID	I	6.4									18	O / E	I	Activa	Modera- rada 0,23	6.5	
Cambao Norte														30	10 / E	I	Pot. Activa	---	6.8	
Cambao Sur														20	20-30 / E	I-RD	Activa	Modera- rada	6.6	

	Ingeominas y Universidad de los Andes (1997)				Paris <i>et al.</i> (2000)							Lobo-Guerrero, 2002					Este estudio	
													70	20 / E	I-RS	Pot. Activa		
Cambrás																	---	7.2
Campaamento													13	45 / 45 E	N	Incierta	---	6.3
Cocora	60	65 V	D	I														
Colepato	40	50:30 W	I	I									15	50 / 30 W	I	Activa	Modelada 0,1-1	6.4
Cuatrocasas													15	45 / 30 W	I	Activa	Alta 1-10	6.4
Cucuna					141.4	N67.9E+-6	RD	0,01-0,1										
Cumara													25	45 / 30 W	I	Activa	Alta 0,7-2,5	6.7
Doima	35	30 E	ID	A														
El Palmar	20	150 V	I	S														
El Paujil													4	45 / 30 W	I	Incierta	---	5.7
El Volcán													16	45 / 45 W	I	Incierta	---	6.5
Facatativá													14	125 / 90	N-RD	Pot. Activa	---	6.4
Guataramo Centro	80	35:35 W	ID	A	121.9	N25.9E+-17	I-RD	0,1-1,0	6.5									
Guataramo Sur	65	35:34 W	I	I	75.9	N45.6E+-9	I-RD	1-5										
Guayuriba	60	45:40 W	ID	A	131.0	N40.7E+-25	I-RD	1-5	M67,0									
Honda					187.3	N16.6E+-12	I-DS	0.2-1.0					115	345-15 / E	I	Pot. Activa	---	7.5
Ibagué	45	75 V	D	A	123.9	N67.9E+-11	RD	1.2	M67,0-7,2				40	55-75 / 90	RD	Activa	Modelada Alta 0,14-1,4	7.0

	Ingeominas y Universidad de los Andes (1997)				Paris <i>et al.</i> (2000)					Lobo-Guerrero, 2002					Este estudio			
Los Lagartos													9	135 / 80 W	N	Activa	Muy Baja 0,07	6.1
Mirador													30	30-40 / 60 W	I-RD	Activa	Alta 1-10	6.8
Montenegro	45	45W	ID	A-IA	6.7	21.7	N25.1E+-9	N-RS	0.1									
Mulato-Getudo						187.3	N16.7E+-9	I-RS	0.01-0,1									
Orotay													13	60 / 60 E	N	Incierta	---	6.3
Pablo													110	5-35 / E	I	Pol. Activa	---	7.5
Pajarito	60	30:50 W	ID	I	6.7								60	20 / E	I	Pol. Activa	---	7.2
Pandi																		
Piedras	20	55 V	DI	I	6.4													
Restrepo													12	45 / 45 W	I	Activa	Alta 1-10	6.3
Río Grande													18	30-35 / 60 E	I	Incierta	---	6.5
Río Tunjuelito	35	5 W	I	I	6.4								23	0 / E	I	Activa	Extrem. Baja 0,005	6.7
San Cristóbal													8	70 / 45 W	I	Incierta	---	6.1
San Juanito - Acacias													16	40 / 45 W	I	Incierta	---	6.5
San Pablo													18	60 / 45 W	I	Incierta	---	6.5
San Pedro	80	40:30 W	I	A	7.2													
San Pedro-cumareal						69.7	N37.5E+-6	I-RD	1-5									

	Ingeominas y Universidad de los Andes (1997)					Paris <i>et al.</i> (2000)					Lobo-Guerrero, 2002					Este estudio									
Santa María													15	45 / 60 W	I	Incierta	---	6.4							
Servitá													26	45 / 45 W	I-RD	Activa	Alta 1-10	6.7							
Servitá-Santa María												295.8	N42.3E+-15	I-RD(?)	'1-2 y 0,2-1	M07,6	desconocido	<15000							
Sibundoy												57.9	N44.5E+-9	RD	'1-5		desconocido	<15000							
Siecha																									
Ubaque																									
Usme												64.9	N22.7E+-6	N-RD	2		desconocido	<15000							
Vianí												38.3	N55.5E+-15	I-RD	<0,2	M07,2	10000-100000		40	60 / 90	RD	Pot. Activa	---	7.0	
Villavicencio																				50	10-45 / 45 W	I	Incierta	---	7.1
Yopal	65	40:40 W	I	A	7.1							220	N26.9E+-21	I-RD	'1-5		desconocido	<15000							

ECUACIONES DE ATENUACIÓN UTILIZADAS

De las 197 ecuaciones recopiladas por Douglas (2001) se seleccionaron las ecuaciones que se presentan en la Tabla 3 siguiendo los criterios descritos anteriormente.

La comparación entre las ecuaciones se presenta en la Figura 1 las cuales presentan la misma tendencia de atenuación exponencial con la distancia. De ellas se utilizó la de Fukushima y Tanaka (1990), la cual tiene valores medios para distancias menores a 5 Km y es una especie de envolvente para distancias mayores a 10 Km. Las ecuaciones de Manic (1998) para

roca y Smit *et al.* (2000) presentan valores del orden de dos veces mayores que las otras ecuaciones para distancias menores a 5 Km.

Utilizando las ecuaciones de atenuación, se puede calcular la distancia a la cual se pueden producir aceleraciones dadas para magnitudes fijas. En otras palabras, una aceleración de 200 gales puede ser generada por un evento de magnitud Ms 5.0 a una distancia de 7 kilómetros, también puede ser producida por un evento de magnitud 5.5 a 11 kilómetros; o por un evento de magnitud 6.0 a 16 kms. La Tabla 4 resume los resultados utilizando la ecuación de atenuación de Fukushima y Tanaka (1990).

TABLA 3. ECUACIONES DE ATENUACIÓN UTILIZADAS

Referencia	Ecuación	Observaciones
Patwardhan, K. Sadigh, I.M. Idriss, R. Youngs (1978)	$\ln a = 5.225 + 1.04Ms - 1.90 \ln[R + 0.864 \exp(0.463Ms)]$ (9)	donde a es en gales R es la distancia en Km
PML (1982)	$\ln(a) = -1.17 + 0.587Ms - 1.26 \ln[R + 2.13 \exp(0.25Ms)]$ (10)	donde a es en g
PML (1985)	$\ln(a) = -0.855 + 0.46Ms - 1.27 \ln[R + 0.73 \exp(0.35Ms)] + 0.22F$ (11)	donde a es en g F=1 si es falla de desgarra- miento F=0 si no se considera el mecanismo focal
Fukushima <i>et al.</i> (1988) & Fukushima & Tanaka (1990)	$\log A = 0.41Ms - \log(R + 0.032 \times 10^{0.41Ms}) - 0.0034R + 1.30$ (12)	donde a es en gales
Ambraseys & Bommer (1991) , Ambraseys & Bommer (1992) y Ambraseys (1995)	$\log a = -1.09 + 0.238Ms - \log r - 0.00050r$ (13)	donde a es en g $r = (d^2 + 36)^{1/2}$
Crouse & McGuire (1996)	$\ln a = -2.342699 + 1.091713Ms - 1.751631 \ln(R + 0.413033 \exp\{0.623255Ms\}) + 0.087940F$ (14)	donde a es en g F=1 si la falla es inversa F=0 si la falla es de desgarra- miento
Sarma & Srbulov (1996)	$\log(Ap/g) = -1.617 + 0.248Ms - 0.5402 \log r - 0.00392r$ (15)	donde Ap es en g $r = (d^2 + 3.2^2)^{0.5}$
Manic (1998)	$\log(A) = -1.664 + 0.333Ms - 1.093 \log(D) + 0.236S$ (16)	$D = (R^2 + 6.6^2)^{1/2}$ Donde S=0 para roca, $V_s > 750$ m/s S=1 Suelo rígido, $360 < V_s < 750$ m/s
Sarma & Srbulov (1998)	$\log(ap/g) = -1.874 + 0.299Ms - 0.0029d - 0.648 \log d$ (17)	donde ap es en g
Ambraseys & Douglas (2000)	$\log y = -0.659 + 0.202Ms - 0.0238d + 0.020S_A - 0.029S_s$ (18)	Donde y es en m/s ² $S_A = 0$ y $S_s = 0$ para roca ($V_{s30} > 750$ m/s)
Smit <i>et al.</i> (2000)	$\log Y = 0.72 + 0.44Ms - \log R - 0.00231R$ (19)	donde Y es en gales $R = (D^2 + 4.5^2)^{0.5}$

FIGURA 1. COMPARACIÓN ENTRE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN

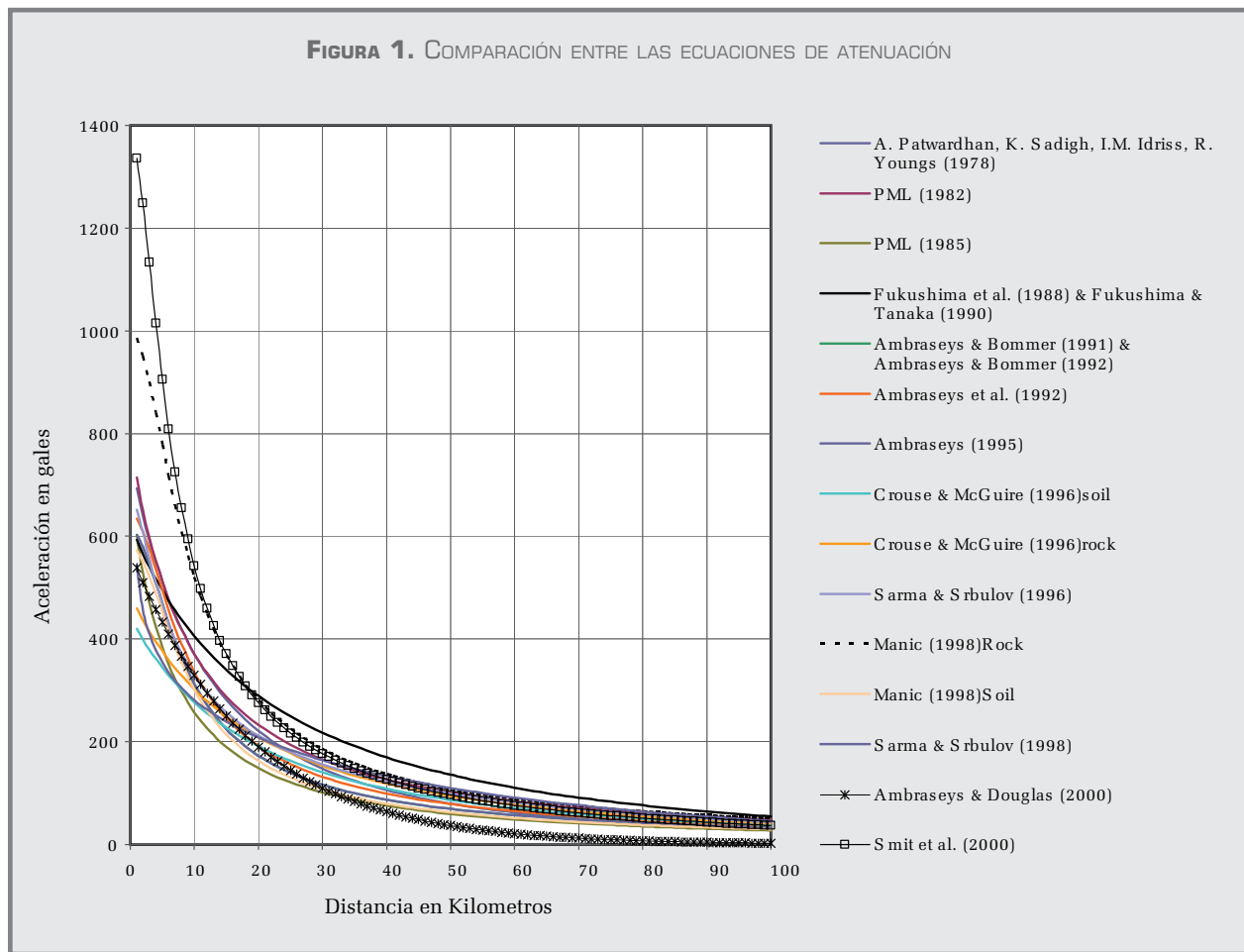


TABLA 4. RELACIÓN ENTRE DISTANCIAS Y ACELERACIONES PARA MAGNITUDES M_s DADAS

MS	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.7	5.9	6.0	6.1	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	7.4
Aceleración en gales	Distancia en Kilómetros															
50	31.42	33.82	36.35	39.02	41.84	44.79	51.14	58.07	61.74	65.56	77.83	82.17	86.64	91.23	95.93	126.14
100	16.14	17.51	18.97	20.54	22.21	23.99	27.89	32.27	34.65	37.14	45.38	48.38	51.49	54.73	58.08	80.39
150	10.19	11.09	12.07	13.11	14.24	15.45	18.12	21.18	22.85	24.63	30.58	32.79	35.09	37.51	40.03	57.27
200	7.01	7.64	8.33	9.07	9.88	10.74	12.68	14.90	16.13	17.44	21.90	23.56	25.32	27.17	29.11	42.65
250	5.02	5.48	5.98	6.53	7.12	7.75	9.18	10.84	11.76	12.75	16.13	17.41	18.76	20.19	21.69	32.38
300	3.66	4.00	4.37	4.78	5.21	5.69	6.75	8.00	8.69	9.44	12.01	12.98	14.02	15.12	16.29	24.68
400	1.92	2.10	2.30	2.52	2.75	3.01	3.59	4.26	4.64	5.05	6.48	7.03	7.62	8.24	8.91	13.81
500	0.86	0.94	1.03	1.13	1.23	1.35	1.61	1.92	2.09	2.28	2.94	3.20	3.47	3.77	4.08	6.43
600	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.26	0.31	0.34	0.37	0.48	0.52	0.56	0.61	0.66	1.06

Una de las premisas básicas de este tipo de estudios es que los datos se comporten como una distribución de Poisson, tanto en el tiempo, como en el espacio.

Si se realiza un análisis temporal de los sismos con magnitud MS mayor a 5.0 se encuentra la distribución que se presenta en la Tabla 5.

TABLA 5. NÚMERO DE SISMOS CON MS > 5.0

	Número de sismos por década										Total
Siglo XVIII											4
Siglo XIX											6
Siglo XX	1900-1909	1910-1919	1920-1929	1930-1939	1940-1949	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	
	1	1	1	3	2	6	6	6	4	7	37

Fuente: Los datos fueron tomados de Ramírez, 1975; USGS, 2007.

Para procesar datos que cumplan una distribución de Poisson se utilizaron dos métodos: el primero fue realizar análisis de completitud y el segundo fue utilizar los datos correspondientes al intervalo entre 1950 y 1999. No hay datos de sismos para siglos anteriores al siglo XVIII y durante el siglo XXI no ha ocurrido ningún sismo con magnitud MS mayor a 5.0 en la zona de estudio. Los datos de 1950 a 1999 cumplen con distribución temporal de Poisson.

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 α dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes. En la Figura 2 se presentan cuatro análisis: Atenuación de MacGuire(1974) con datos de 261 años (Alfaro, 2006); Atenuación de MacGuire(1974) con análisis de completitud con datos de 261 años; Atenuación de Fukushima y Tanaka(1990) con datos de 261 años y, finalmente, Atenuación de Fukushima y Tanaka(1990) con datos de 1950 a 1999.

En el campo de la ingeniería sísmológica es común expresar estos resultados en tiempo de retorno utilizando para ello las ecuaciones 20 y 21.

$$P = 1 - e^{-v} \quad (20)$$

Donde v es la tasa media anual de excedencia, P es la probabilidad de ocurrencia y e es exponencial.

$$TR = \frac{1}{P} \quad (21)$$

Para labores de diseño y revisión estructural comúnmente se utilizan los períodos de retorno de 475, 1000 y 2000 años. El período de retorno de 475 años corresponde a una vida útil de la estructura de 50 años y a una probabilidad de excedencia del 10%. La Tabla 6 presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos en este estudio, con los resultados obtenidos por Caneva *et al.* (2003, 2004) y Alfaro (2006).

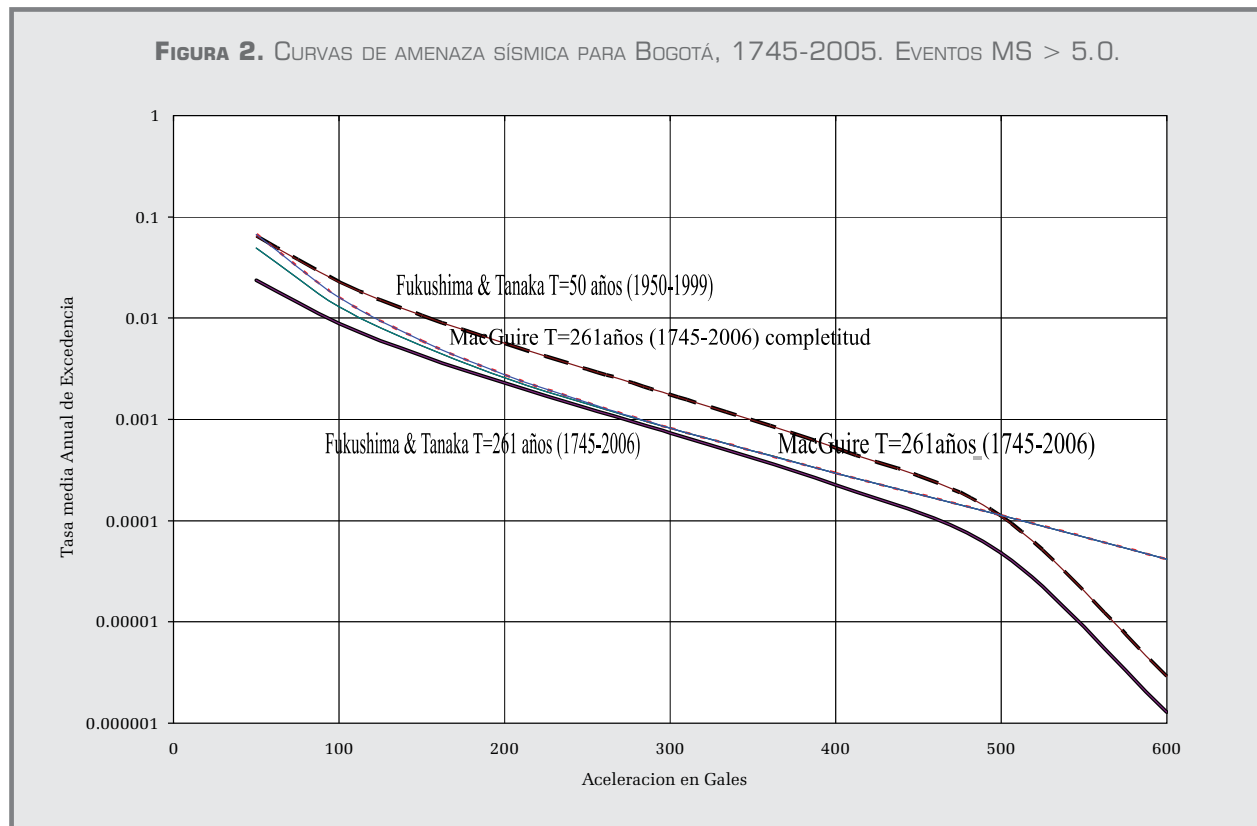


TABLA 6. VALORES DE ACELERACIÓN EN ROCA EN GALES PARA 475, 1000 Y 2000 AÑOS

Período de Retorno TR en años	Aceleración en Gales				
	Caneva <i>et al.</i> (2003, 2004)	Alfaro (2006)	Este estudio		
		Atenuación MacGuire(1974) 261 años	Atenuación MacGuire(1974) 261 años y completitud	Atenuación Fukushima y Tanaka(1990) 261 años	Atenuación Fukushima y Tanaka(1990) Datos(1950-1999)
475	204	215	217	205	285
1.000	265	283	285	271	341
2.000	354	347	347	333	404
Número de Sismos	---	49	133	49	29
Sismos/año	---	0.19	0.51	0.19	0.58

En el análisis de la Tabla 6 se observan varias incertidumbres en la estimación de la amenaza sísmica. La primera se debe a la utilización de la ecuación de atenuación, si Douglas (2001) recopiló 197 ecuaciones tendríamos igual número de respuestas distintas. Por otra parte, la ventana de observación es de vital importancia para la estimación del nivel de

amenaza. La cual está directamente relacionada con el número de sismos por año, de ahí la necesidad de realizar análisis de completitud o análisis de una ventana de tiempo en la cual el número de eventos sea el mismo para los deltas de tiempo considerado, como en el caso de este estudio en el cual se escogió el intervalo entre 1950 y 1999.

DISCUSIÓN

La principal diferencia entre las aproximaciones estocástica y determinista estriba en que en la primera está involucrado el tiempo y en la segunda no. Y son los tiempos de retorno los que hay que considerar al momento de diseñar, construir o actualizar una estructura.

En este estudio se observó la sismicidad histórica: localización, tamaño y momento de ocurrencia de los sismos en un área de 400 kilómetros cuadrados comprendida entre las coordenadas 2,7° y 6,7° latitud Norte y entre 76,7° y 72,7° longitud Oeste. Los sismos abarcan desde el año de 1745 hasta el 2007. Siguiendo a Takada (2005) se tuvieron en cuenta los sismos con magnitud mayor a 5.0, que son aquellos que pueden causar daños en edificaciones y víctimas.

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica regional, con el análisis de datos de 1950 a 1999, utilizando la ecuación de atenuación de Fukushima y Tanaka (1990), dio como resultado valores de aceleración de 285 gales para un período de retorno de 475 años, 341 gales para un período de retorno de 1000 años y 404 gales para un período de 2000 años. La ventana de tiempo corresponde a una distribu-

ción de Poisson, en la que se presenta 0.58 sismos por año. La cual es bastante cercana a 0.51 sismos/año cuando se realiza al análisis de completitud. El cual, sin embargo, tiende a aumentar el número de sismos de magnitudes inferiores, asumiendo que los de gran magnitud (7-8) fueron registrados históricamente e instrumentalmente. Es importante recordar que el poder destructivo de los sismos no sólo depende de la aceleración pico, también de la dirección, el tipo de suelo, la duración, los contenidos frecuenciales, entre otros.

Se recomienda estudiar detalladamente las fuentes sismogénicas que podrían afectar a la ciudad de Bogotá; si bien su conocimiento geométrico es de calidad, es necesario conocer su poder destructivo y los tiempos de retorno asociados. Se debe priorizar el estudio de las fallas del Río Tunjuelito, Cajitas y los Lagartos por encontrarse dentro del perímetro urbano de la ciudad

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece los oportunos comentarios de los profesores Adolfo Camilo Torres Prada y Fernando Alberto Nieto Castañeda quienes revisaron el manuscrito original.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A. "Anotaciones con respecto a la definición de un espectro sísmico en roca para Bogotá – Colombia". *Revista Épsilon* 6. (2006): 63 - 74.
- Alfaro, A. y R. Van Hissenhoven. "Evaluación de la Amenaza Sísmica Local en 18 Hectáreas del Centro-Oriente de Bogotá". *Revista Épsilon* 8. (2007): 25 - 33.
- Ambraseys, N. "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 24. 4. (1995): 467 - 490.
- , & Bommer, J. "The attenuation of ground accelerations in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 20. 12. (1991): 1179 - 1202.
- . "On the attenuation of ground accelerations in Europe". *Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering* 2. (1992): 675 - 678.

- , & Sarma, S. "A review of seismic ground motions for UK design". ESEE Report London: Department of Civil Engineering, Imperial College, 1992: 92-8.
- Ambraseys, N., & Douglas, J. *Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response*. ESEE Report 00-4. London: Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, 2000.
- Caneva, A.; Salcedo, E.; Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. "Análisis de la Amenaza Sísmica y de la Magnitud Representativa para Bogotá". *Ingeniería y Universidad* 7. 2. (2003): 133 - 150.
- Caneva, A.; Salcedo, E.; Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. "Estudio de sismicidad regional para el análisis de la amenaza sísmica de Bogotá". *Ingeniería y Universidad* 8. 5. (2004): 9 - 25.
- Chen, P. y Chen, H. "Scaling law and its applications to earthquake statistical relations". *Tectonophysics* 166. (1989): 53 - 72.
- Crouse, C.B., & McGuire, J.W. "Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions". *Earthquake Spectra* 12. 3. (1996): 407 - 439.
- 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.
- Fukushima, Y., & Tanaka, T. "A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan". *Bulletin of the Seismological Society of America* 80. 4. (1990): 757 - 783.
- Fukushima, Y., Tanaka, T., & Kataoka, S. "A new attenuation relationship for peak ground acceleration derived from strong-motion accelerograms". *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. II. (1998): 343 - 348.
- Hanks, T. y Cornell, C. Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide. *Proceedings of the Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*, North Carolina State University, Raleigh. (1994): I/1-1 to I/1-17.
- Ingeominas y Universidad de los Andes. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá, 1997.
- Lobo-Guerrero, A. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede - Bogotá. Estudio Geológico. Instituto Geofísico Universidad Javeriana. Bogotá, 2002.
- Lobo-Guerrero, A. La falla de Bogotá en Cundinamarca. Memorias del X Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología. Bogotá, 2005.
- MacGuire, R. Seismic Structural Response Risk Analysis. Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and distance. MIT. Department of Civil Engineering. Research Report R. (1974): 74-51.
- Manic, M.I. A new site dependent attenuation model for prediction of peak horizontal acceleration in Northwestern Balkan. In: *Proceedings of Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*, 1998.
- OSSO, 2007. http://osso.univalle.edu.co/seismic/eventos/2004/osso_sw-106.html [fecha de consulta: Julio 23 de 2007]
- Paris G., M. Machette, R. Dart, and K. Haller. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. Open-File Report 00-0284, 2000.
- PML. *British earthquakes*. Tech. rept. 115/82. Principia Mechanica Ltd., London, 1982.
- PML. *Seismological studies for UK hazard analysis*. Tech. rept. 346/85. Principia Mechanica Ltd., London, 1985.

- Ramírez J.E. *Historia de los terremotos en Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, Bogotá: 1975.
- Ramírez J.E. Terremotos Colombianos noviembre 23 y diciembre 12 de 1979: informe preliminar Instituto Geográfico de los Andes Colombianos. Serie A. Sismología 45. (1980).
- Sarma, S.K., & Srbulov, M. "A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25. 8 (1996): 815 - 836.
- Sarma, S.K., & Srbulov, M. "A uniform estimation of some basic ground motion parameters". *Journal of Earthquake Engineering* 2. 2. (1998): 267 - 287.
- Smit, P., Arzoumanian, V., Javakhishvili, Z., Arefiev, S., Mayer-Rosa, D., Balassanian, S., & Chelidze, T. "The digital accelerograph network in the Caucasus". Balassanian, S. (ed), *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction — Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Kluwer Academic Publishers. Presented at 2nd International Conference on Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction, Yerevan, Armenia, 15/9/1998–21/9/1998, 2000.
- Takada, T. "Seismic Macro Zonation". *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lectures Notes*. 2005.
- USGS 2007 Available URL: http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html [Fecha de consulta: 15 de Julio de 2007]
- Wells D.L. y K.J. Coppersmith. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull Seism. Soc. Am.* 84. 4. (1994): 974 - 1002.