

Análisis probabilístico de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia. 40 años del macrosismo del Huila (1967 – 2007)

Mónica Andrea Bohórquez Fierro* / Andrés José Alfaro Castillo**

Fecha de envío: 2 de diciembre de 2007.
Fecha de aceptación: 23 de marzo de 2008.

RESUMEN

La ciudad de Neiva se encuentra en una zona de riesgo sísmico importante, debido a la cercanía de varias fallas activas, que han generado grandes sismos en el pasado, como el ocurrido el 9 de febrero de 1967 con epicentro en el departamento del Huila, a pocos kilómetros de la ciudad, generando numerosas pérdidas de vidas y daños, este sismo tuvo efectos en la ciudad de Bogotá dejando víctimas mortales. La evaluación de la amenaza sísmica involucra la estimación del movimiento del suelo que será producido por futuros sismos. Ésta consiste en determinar el nivel de la aceleración probable que puede excederse en un sitio determinado para un período de tiempo dado. En esta investigación se analizaron sismos con magnitud Ms mayor a 4.0 ocurridos en el área de estudio (33.400 m²), que son aquellos que pueden causar víctimas y/o daños en edificaciones en un contexto como el colombiano. La aceleración pico promedio en roca estimada para la ciudad de Neiva, con un período de retorno de 475 años, es de 446 gales (cm/s²) (0.45 g).

Palabras clave: Neiva, Huila, Colombia, amenaza, sismos.

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR NEIVA – COLOMBIA - 40 YEARS FROM HUILA MACROEARTHQUAKE (1967 – 2007)

ABSTRACT

Neiva is located in a region with a significant seismic hazard, due to the proximity of several active faults, which have generated large earthquakes in the past. Like the 9 of February 1967, which epicenter was located in Huila province, a few kilometers far from the city. This earthquake caused a significant amount of casualties and damages; it also caused casualties in Bogotá, 400 kms far from the epicenter. On the other hand, the seismic hazard assessment includes the estimation of ground shaking due to earthquakes. This assessment consists in the peak ground acceleration forecasting for some return period. Earthquakes with magnitude Ms greater than 4.0 were analyzed in this research, in a 33.400 km² area. This size of earthquakes can cause victims or damages in buildings in a country such Colombia. Peak ground acceleration assessed for Neiva was 446 gals (cm/s²) for a return period of 475 years.

Key words; Neiva, Huila, Colombia, Hazard, Earthquakes

* Ingeniera Civil. Ingetec S.A. Correo electrónico: monicabohorquez@ingetec.com.co

** Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: aalfaro@lasalle.edu.co

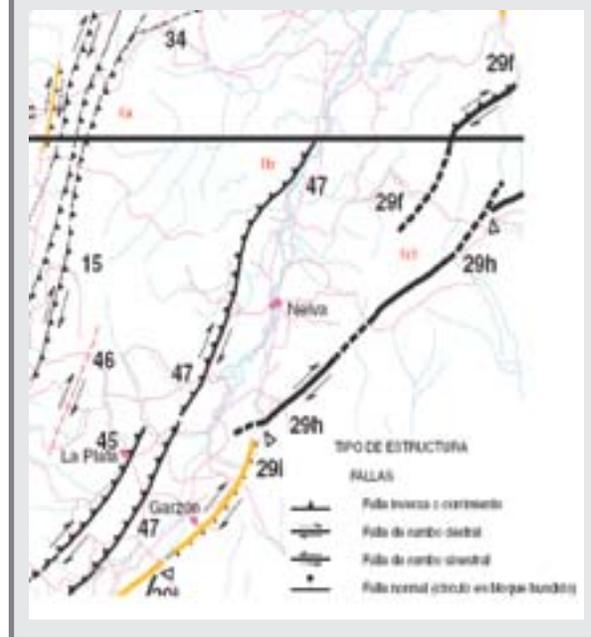
ASPECTOS IMPORTANTES

Neiva, la capital del departamento del Huila, está localizada a 304 km de Bogotá, se encuentra ubicada al sur occidente de Colombia, entre las cordilleras oriental y central de los Andes, dividida por el río Magdalena. A 30 km de Neiva se encuentra la hidroeléctrica de Betania que aporta 500 MW de energía.

Se determinó un área de 33.400 Km² alrededor de Neiva para la investigación, bajo esta zona se encuentran tres sistemas de fallas importantes que atraviesan Colombia, como el Sistema de Fallas El Romeral, bajo el flanco occidental de la cordillera central, este sistema de fallas cruza Colombia desde el Mar Caribe hasta Ecuador y ha generado importantes sismos como el de 1983 cerca de Popayán, el de 1994 al occidente del Huila y, más recientemente, el de 1999 en el Departamento del Quindío. El sistema de Fallas del Magdalena, atraviesa el borde occidental del Valle del río Magdalena, sismos de intensidad intermedia generados en 1805, 1816, 1824 y 1942 pueden relacionarse con el sistema de fallas. Y el Sistema de Fallas del Borde Llanero, bajo la cordillera oriental, considerado como muy activo, ha generado grandes sismos como el de 1827 en el Huila, el de 1834 en Nariño, el macrosismo del Huila en 1967 y el sismo de 1995 al norte del Huila (Ramírez, 1975; Paris *et al.*, 2000).

De los sismos ocurridos en la zona, tres de ellos han causado desastres en la ciudad de Neiva como son: el sismo del 16 de noviembre de 1827, el sismo del 9 de abril de 1967 y el sismo del 6 de junio de 1994. Durante el Sismo de 1827 el río Suaza dejó de correr durante 55 días debido al derrumbe de dos cerros que formaban un estrecho en el río, dejando inundada y devastada la ciudad de Neiva. Los trabajos por hacer un canal que guiara las aguas fueron un desas-

FIGURA 1. PRINCIPALES FALLAS EN ÁREA DE ESTUDIO (PARIS ET AL., 2000).



tre mayor al fallar el dique natural que sostenía las aguas causando una creciente en el río Magdalena. El sismo de 1994 tuvo una magnitud de MS de 6.6 que causó una avalancha por la cuenca del río Páez y dejó un saldo aproximado de 1.000 muertos y 30.000 damnificados. Ante el desastre, el gobierno creó una ley que incentivaba a las industrias para invertir en la región.

SISMO DE 1967. EL MACROSISMO DEL HUILA (9 DE FEBRERO DE 1967)

Se denominó macrosismo ya que “se sintió desde Caracas hasta Iquitos en el Perú y desde Buenaventura en el Pacífico hasta Mitú en los límites con Brasil. Fue registrado en las 500 o más estaciones sismológicas que estaban en el planeta dejó 98 víctimas y cientos de damnificados”. En Neiva hubo 15 muertos y dejó cerca de 100.000 afectados (Ramírez, 1967).



Fuente: Ramírez, 1967b.

Según los habitantes se sintieron cinco réplicas entre las 10 a.m. y las 4 p.m. y hasta veinte réplicas en los primeros tres días. La estación sismológica de Bogotá registró en el mes siguiente al macrosismo 350 réplicas en total. El foco se localizó a 58 Km debajo de la cordillera oriental, y el epicentro se localizó en las coordenadas 2.9° N y 74.8° W, lo que corresponde a un punto sobre la superficie de la cordillera oriental (Ramírez, 1967). De acuerdo con Blume & Associates (1968) las magnitudes estimadas están entre 7.3 a 7.5. El sismo causó daños en el departamento del Huila especialmente en pequeñas ciudades cercanas al epicentro y en Neiva donde según la escala modificada de Mercalli registró una intensidad de 9. En Bogotá fueron afectadas 30 estructuras con serios daños y al menos 50 muros fallaron (Ramírez, 1967). La iglesia de San Juan de Dios (Figura 3) fue seriamente afectada, otras iglesias sufrieron daños menores.



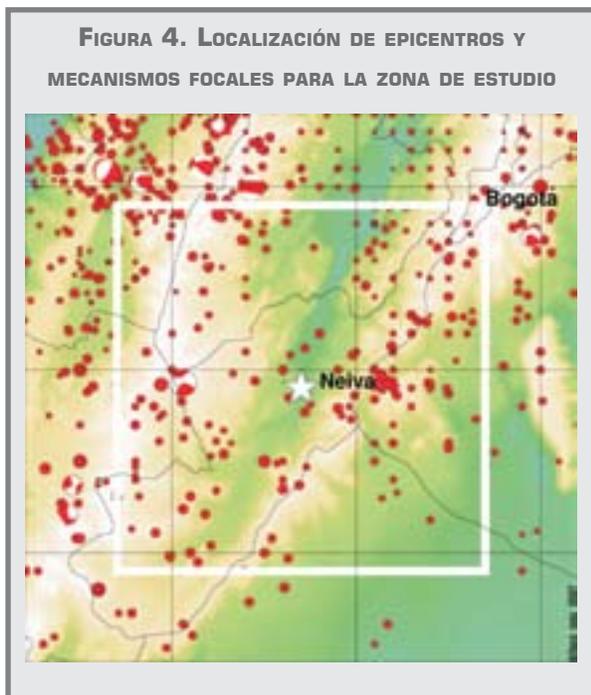
Fuente: Ramírez, 1967b.

EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA PARA NEIVA

La evaluación de la amenaza sísmica consiste en determinar el nivel de aceleración que se puede exceder en un sitio determinado para un período de tiempo dado. En este estudio se siguió a Hanks y Cornell (1994) y a Takada (2005). Este método consiste en analizar los sismos que ocurrieron en el área de estudio así como su localización, magnitud y tiempo de ocurrencia, se analizaron sismos desde 1766 hasta el año 2007. Para conocer los eventos sísmicos de esta área se consultaron los catálogos de Ramírez (1975), del U.S Geological Survey (USGS, 2008), este catálogo contiene datos del SISRA (Programa para la mitigación de los efectos de los terremotos en la región andina) para el período comprendido entre 1766 a 1981 y los datos del PDE (*Preliminary Determination of Epicenters*) para el período de 1973 a 2007. Adicionalmente se consultó el catálogo del ISC *Internatio-*

nal *Seismological Center* (2007). Con el fin de unificar las escalas de Magnitud de mb (ondas internas) a Ms (ondas superficiales), se utilizaron los estudios de Chen y Chen (1989). Siguiendo a Takada (2005) se tienen en cuenta los sismos que pueden causar víctimas y/o daños en edificaciones, en el caso colombiano aquellos con magnitud mayor a 4.0. En la Figura 4 se presentan los sismos registrados para el área de estudio. En Japón la magnitud de corte es 5.0 debido a la tradición en el diseño sismorresistente y a ser el sitio con mayor densidad de sismos por unidad de tiempo en el mundo.

En primer lugar, se observó la sismicidad histórica en un área de 40.000 km² comprendida entre las coordenadas 2,0° y 4,0° de latitud y entre 76,3° y 74,3° de longitud oeste. Después esta área se redujo a 33.400 km² debido a que en una zona al sur oriente no hay registro de sismos.



El método de Hanks y Cornell (1994) asume que la ocurrencia de los sismos en la región de interés se aproxima a un Proceso de Poisson, con una tasa constante de sismos en el tiempo y en el espacio. En la Figura 5 se observa que se puede analizar una distribución relativamente homogénea entre las décadas de 1940 a 2000, debido a la implementación de sismógrafos en Colombia, por ello se realizaron dos análisis: uno tomando el período total de tiempo de 231 años con una tasa de sismos por año de 0.143 y el segundo tomando un período de tiempo reducido de 53 años que se ajusta mucho más a un proceso de Poisson, con una tasa de 0.51 sismos por año. Con eventos de hasta 7.8 Ms en 1997.

Para la determinación de las aceleraciones para cada magnitud de sismo es necesario estimar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo, Douglas (2001, 2002) recopiló 197 ecuaciones robustas determinadas en diferentes partes del mundo. En la actualidad no se cuentan 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. Se utilizaron siete ecuaciones que cumplían con tres criterios: ser las más recientes, que para su desarrollo utilizaran una gran base de datos y que la magnitud estuviera expresada en Ms. Las ecuaciones utilizadas fueron:

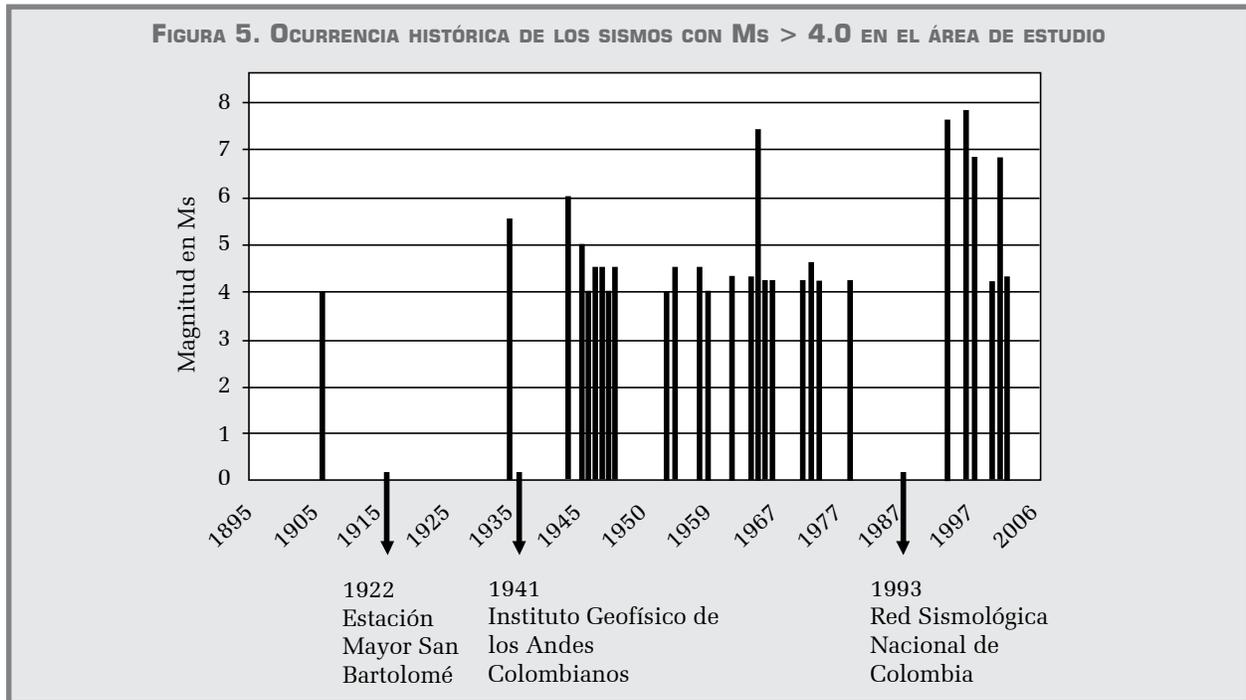
- Patwardhan *et al.* (1978)

$$\ln a = 5.225 + 1.04Ms - 1.90 \ln [R + 0.864 \exp(0.463Ms)] \quad (1)$$

Donde a es en gales
R es la distancia en Km
- Fukushima *et al.* (1988) & Fukushima y Tanaka (1990)

$$\log A = 0.41Ms - \log(R + 0.032 \times 10^{0.41Ms}) - 0.0034R + 1.30 \quad (2)$$

Donde a es en gales



Fuente: Bohórquez, 2007.

- Ambraseys & Bommer (1991) , Ambraseys & Bommer (1992) y Ambraseys (1995)

$$\log a = -1.09 + 0.238M_s - \log r - 0.00050r \quad (3)$$

donde a es en g

$$r = (d^2 + 36)^{1/2}$$

- Sarma y Srbulov (1996)

$$\log (A_p/g) = -1.617 + 0.248M_s - 0.5402 \log r - 0.00392r \quad (4)$$

Donde A_p es en g

$$r = (d^2 + 3.2^2)^{0.5}$$

- Sarma y Srbulov (1998)

$$\log (a_p/g) = -1.874 + 0.299M_s - 0.0029d - 0.648 \log d \quad (5)$$

Donde:

a_p = Aceleración pico en Gales

g = Gravedad

M_s = Magnitud del sismo

D = Distancia de atenuación en km.

- Ambraseys & Douglas (2000)

$$\log y = -0.659 + 0.202M_s - 0.0238d + 0.020S_A +$$

$$0.029S_s \quad (6)$$

Donde y es en m/s²

$S_A = 0$ y $S_s = 0$ para roca ($VS_{30} > 750$ m/s)

- Smit *et al.* (2000)

$$\log Y = 0.72 + 0.44M_s - \log R - 0.00231R \quad (7)$$

donde Y es en gales

$$R = (D + 4.52)0.5$$

Usando las ecuaciones de atenuación se puede estimar la distancia a la cual se pueden producir aceleraciones dadas para magnitudes dadas.

Para determinar la curva de amenaza sísmica se procede a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por unidad de área. Finalmente, el total de la tasa media anual de ocurrencia del movimiento sísmico mayor que una aceleración a dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes. En la Figura 6 se presentan los siete análisis realizados con datos de 1944 a 2007.

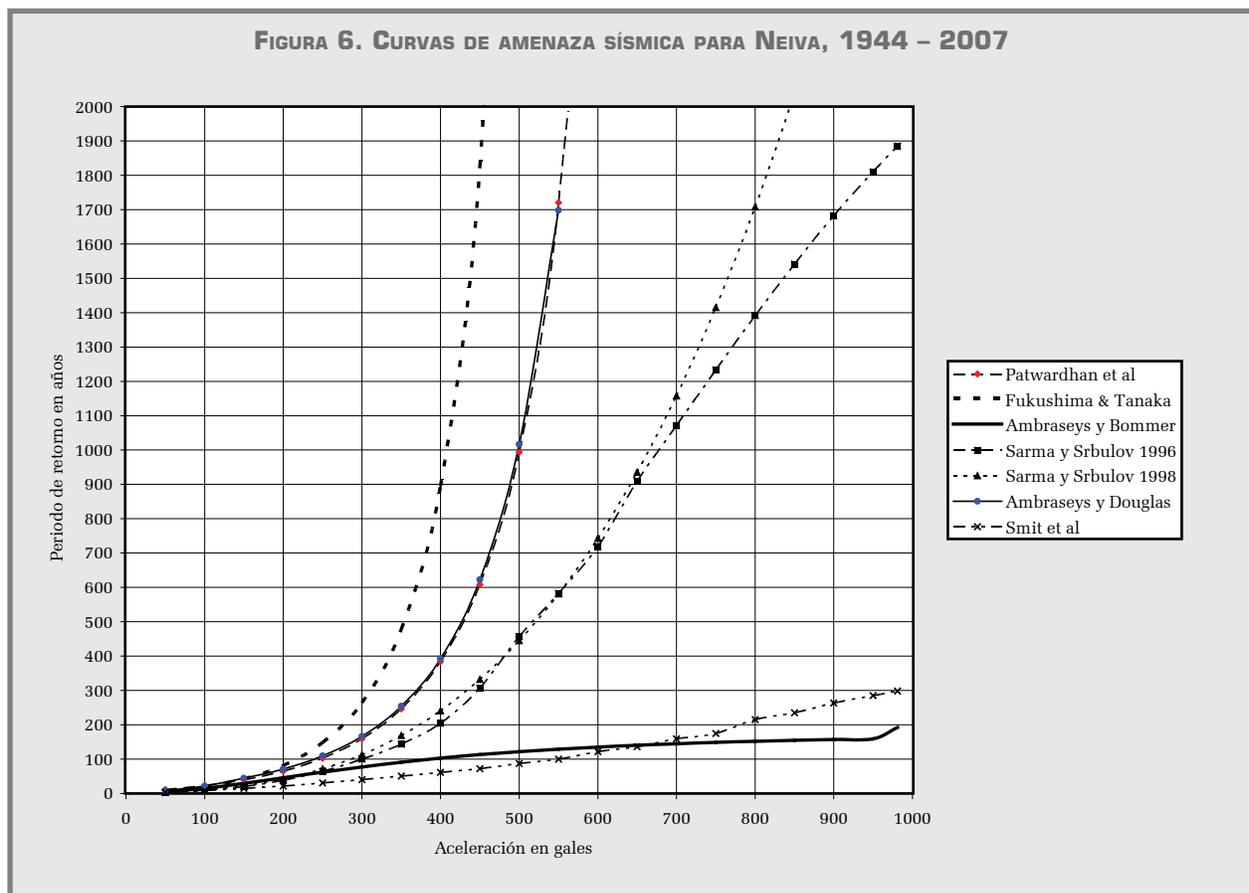
En el campo de la ingeniería sísmológica es común expresar estos resultados en tiempo de retorno. Para labores de diseño y revisión estructural comúnmente se utilizan los períodos de retorno de 475, 1000 y 2000 años. El período de retorno de 475 años corresponde a una vida útil de la estructura de 50 años y a una probabilidad de excedencia del 10%. La Tabla 1 muestra los resultados de la investigación.

Los resultados para cada período de retorno de 475 años varían entre 355 a 515 gales, con una diferencia del 20% y el 75% frente a la aceleración dada por la

norma NSR-98, de 410 a 680 gales para un período de 1000 años y de 455 a 835 gales para un período de 2000 años.

CONCLUSIONES

La ciudad de Neiva está situada en una zona de amenaza sísmica importante, con evidencia de sismos que han causado daños y víctimas. Los más recientes el 9 de abril de 1967 y el de 1994. Tras 40 años de este evento se realiza este estudio para estimar las aceleraciones pico en roca asociadas a diferentes períodos de retorno.



Fuente: Bohórquez, 2007.

TABLA . 1 VALORES DE ACELERACIÓN EN GALES PARA 475, 1000 Y 2000 AÑOS. DATOS DE 1944 – 2007.

Período de Retorno TR en años	Aceleración en gales para Tiempo Parcial (53 años)					Aceleración en Gales Según NSR-98	Promedio
	Atenuación Ambraseys & Douglas (2000)	Atenuación Sarma y Srbulov (1998)	Atenuación Sarma y Srbulov (1996)	Atenuación Fukushima <i>et al.</i> (1988) & Fukushima & Tanaka (1990)	Atenuación Patwardhan, <i>et al</i> (1978)		
475	425	515	510	355	425	294	446
1.000	500	670	680	410	500		552
2.000	560	835		455	560		602

Para el análisis se usaron dos períodos de tiempo, uno tomando toda la serie histórica de 231 años con una tasa de 0.143 sismos/año, y el segundo tomando un tiempo parcial en el cual los sismos tuvieran aproximadamente una distribución de tipo Poisson en el tiempo y el espacio para 53 años con una tasa de 0.51 sismos /año. Los análisis mostraron aceleraciones pico más altas para el período de tiempo corto, es decir, que puede ser más confiable este período por sustentarse en datos que fueron tomados durante una época en la cual es más fidedigno el registro de éstos en cuanto a localización y magnitud.

Las aceleraciones pico para un ΔT de 53 años que van de 355 a 515 gales para un período de retorno de 475 años, 410 a 680 gales para un período de retorno de 1000 años y 455 a 835 gales para un período de retorno de 2000 años.

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.

El reciente sismo de Quetame (24/05/08) de magnitud MS 5.8 generó aceleraciones de 605 gales en la componente NS, 460 gales EW y 297 gales UD en roca a 9 kilómetros del epicentro; de 59 gales NS, 42 gales EW y 71 gales UD en roca a 31 Km. Del epicentro en la ciudad de Villavicencio y de 9 gales NS, 5 gales EW y 6 gales UD en roca en Bogotá (Ingeominas, 2008). Este sismo generó pánico en la zona epicentral, víctimas mortales y cuantiosos daños materiales, incluida toda una serie de movimientos de remoción en masa en la carretera Bogotá – Villavicencio que implicó el cierre de la vía durante varios días. Las aparentemente altas aceleraciones obtenidas en este estudio se ven opacadas por los registros del último sismo ocurrido en Colombia.

Sería deseable ampliar los estudios realizando investigaciones de campo de las fallas en la zona de interés, para tener una aproximación determinista del nivel de amenaza. Adicionalmente, mejorar la instrumentación sismológica en la región, en la cual está construida la presa de Betania y próximamente la del Quimbo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambraseys, N., & Douglas, J. (Aug). Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response. ESEE Report 00-4. London: Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, 2000.
- Blume, J. & Associates Research Division San Francisco, California. 1967 Colombian earthquakes. 1968.
- Bohórquez, M. "Evaluación probabilística de la amenaza sísmica regional para Neiva". Trabajo de Grado. Facultad Ingeniería Civil. Universidad de La Salle. 2007.
- Chen, P. Y Chen, H. "Scaling law and its applications to earthquake statistical relations". *Tectonophysics* 166. (1989): 53 - 72.
- 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.
- Douglas, J.A. Errata and additions to ESEE Report No. 01-1 "A comprehensive worldwide for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)". London: Imperial College of Science Technology and Medicine, 2002.
- 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". *Pages 343-348 of: Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering II*. (1988).
- 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 (2008) El sismo de Quetame (Cundinamarca) del 24 de mayo de 2008. Aspectos sísmológicos. www.ingegominas.gov.co.
- Paris G., Machette, M. Dart, R. And Haller K. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS. 2000.
- Ramírez, J. "Macrosismo del Huila". *Revista Javeriana* 333. Bogotá: Universidad Javeriana, 1967a.
- Ramírez, J. Archivo fotográfico macrosismo del Huila: 1967b.
- Ramírez, J. *Historia de los Terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1975.
- 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.
- Takada T. "Seismic Macro Zonation". *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lectures Notes*. 2005.
- USGS (2008). www.earthquake.usgs.gov. Catálogo de Terremotos para América del sur. Proyecto del CERESIS. (Fecha de consulta: Septiembre 25 de 2007).