

SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS PARA MICROZONIFICACIÓN DE CIUDADES, CASO: ARMENIA, COLOMBIA¹

Hugo Monsalve Jaramillo^{2,3}, Tobías Ramos Murillo³

Resumen: El proyecto que se describe en este artículo busca implementar una metodología que sirva como base en los estudios de microzonificación que se desarrollen a futuro. Se tomó como zona de estudio la ciudad de Armenia, en Colombia. El proyecto se desarrolló en cinco etapas: evaluación de la amenaza sísmica, desagregación, obtención de registros acelerográficos, selección de señales y comparación de resultados de acuerdo a la normativa vigente. Para la evaluación de la amenaza se utilizaron los métodos propuestos por McGuire en 1976 y por Der Kiureghian en 1975, donde arrojaron como resultado para la ciudad de Armenia una aceleración máxima de 0.27g. Posteriormente, se desagregó la amenaza por medio de dos procedimientos: inversión de curvas de atenuación e igualación con el Espectro Uniforme de Amenaza, donde se identificaron tres escenarios sísmicos y el grupo de pares Magnitud-distancia compatibles con la amenaza, correspondientes a la falla Romeral [Mag. $6.3 \pm 0.1 M_w$, dist. hipocentral 15 ± 4 km.], falla Ibagué [Mag. $6.6 \pm 0.1 M_w$, dist. hipocentral 45 ± 5 km.] y la zona de Subducción [Mag. $7.7 \pm 0.1 M_w$, dist. hipocentral 170 ± 30 km.]. Los registros sísmicos utilizados fueron obtenidos de bases de datos disponibles en la Internet (K-NET, COSMOS, ISESD Y PEER) y para valores de magnitud donde no fue posible encontrar registros se generaron señales sintéticas utilizando funciones empíricas de Green. En la selección de las señales se utilizaron tres métodos de búsqueda: por criterios geofísicos, el mínimo D_{rms} y la semblanza. Se obtuvieron en promedio 8 registros para cada uno de los escenarios sísmicos identificados. Se realizó la comparación de los espectros de respuesta obtenidos en roca de las señales seleccionadas con el espectro de diseño propuesto por la Norma NSR-98; igual procedimiento se realizó con los espectros de diseño establecidos en la normativa regional, donde se modelaron las condiciones de suelo por medio del programa EERA. Como resultado de los diferentes análisis y comparaciones realizados, se estableció que presentan algunas falencias respecto a los límites establecidos y se propone para cenizas de origen volcánico aumentar el valor del S_a entre los periodos T_o a T_c en un 15%, T_c correspondería a 1.0 segundo y el valor de T_l no sería modificado. Para los rellenos antrópicos y naturales se propone aumentar el valor del S_a entre los periodos T_o a T_c en un 10%, T_c correspondería a 0.9 segundos y el valor de T_l no presentaría modificaciones.

Palabras clave: amenaza sísmica, ciudad de Armenia, desagregación, microzonificación sísmica.

SELECTION OF SEISMIC SIGNALS FOR URBAN MICROZONIFICATION, CASE STUDY: ARMENIA, COLOMBIA

Abstract: The main purpose of the project described in this paper is to implement a methodology that may be used as support in future microzonification studies. Armenia city in Colombia was selected as the zone to be studied. This project was carried out in five stages: seismic hazard assessment, disaggregation, acquisition of accelerographic records, records selection, and the comparison of results with the current seismic hazard standards. The methods proposed by McGuire in 1976 and Der Kiureghian in 1975 were used for hazard assessment, with which a peak acceleration of 0.27g was obtained. Subsequently, hazard disaggregation was performed using seismic inversion of attenuation curves and plot scaling to a uniform hazard spectrum. Three scenarios were identified with its magnitude-distance couples, all of them hazard-compatible regarding Romeral fault ($M_w 6.3 \pm 0.1$, hypocentral distance 15 ± 4 km.); Ibagué fault ($M_w 6.6 \pm 0.1$, hypocentral distance 45 ± 5 km.); and the subduction zone ($M_w 7.7 \pm 0.1$, hypocentral distance 170 ± 30 km.). The seismic records used in this research were obtained from databases available on the Internet (K-net, COSMOS,

¹ Artículo recibido el 21 de agosto de 2007 y en forma revisada el 20 de diciembre de 2007.

² Director de CEIFI, Docente, Programa de Ingeniería Civil, Armenia, Colombia. E-mail: hugom@uniquindio.edu.co.

³ Grupo Quimbaya, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. E-mail: saibotob@gmail.com.

ISESD and PEER) and whenever it was not possible to find records with certain characteristics, empirical Green functions were used to generate synthetic records. In the record selection phase, three methods were used: geophysical criteria, the least D_{rms} and similarity comparison. Approximately 8 records were obtained per each one of the seismic scenarios that were identified. The response spectra obtained at bedrock level for the selected records were compared with the design spectrum proposed by NSR-98 standards (Colombian seismic design standards) and the spectra obtained in the microzonation studies for the region. The site effects were modeled using the EERA software. As a result of the different analyses and comparisons performed, it was concluded that there is some inappropriateness regarding the suggested limits and it is proposed to increase the value of S_a between the periods T_0 and T_c (1 second) by 15% whereas the value of T_l would remain unchanged. For earthfill sites, it is proposed to increase S_a between the periods T_0 and T_c (0.9 seconds) by 10% and, once more T_l would remain unchanged.

Keywords: disaggregation, City of Armenia, microzonification studies, seismic hazard assessment.

INTRODUCCIÓN

Después del sismo del 25 de enero de 1999 que afectó la Ciudad de Armenia en Colombia y que dejó un gran número de víctimas y cuantiosos daños materiales, se han desarrollado proyectos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del municipio, cálculo de la amenaza, identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, entre otros, que han servido de cimiento a los diferentes proyectos de investigación que se están desarrollando en la actualidad.

El proyecto se desarrolló como respuesta a una serie de inquietudes e interrogantes que se tenían y hasta el momento no se les había dado una solución adecuada. En proyectos realizados con anterioridad a éste para la microzonificación de la ciudad de Armenia, ciertos procesos no fueron ejecutados siguiendo un adecuado procedimiento y se recurrió a la experiencia de los investigadores como solución a cada uno de inconvenientes presentados. Debido a la necesidad de ratificar o no los resultados de estos proyectos y por el deseo de ampliar el conocimiento en esta rama de investigación fue planteado el presente proyecto.

Para la selección de unas buenas señales sísmicas que sirvan como entrada al análisis dinámico de edificaciones, taludes y de construcciones no convencionales, se desarrollaron una serie de procedimientos y metodologías para la ejecución de los diferentes procesos involucrados. El proyecto está compuesto por cinco componentes básicos, definidos como: evaluación de la amenaza sísmica, desagregación de la misma, búsqueda de registros reales o generación registros sintéticos, selección de las señales y comparación con los espectros de diseño establecidos.

El primer componente está relacionado con la evaluación de la amenaza sísmica, se trabajó con dos metodologías, la propuesta por McGuire (1976) disponible en el programa EQ-RISK y la propuesta por Der Kiureghian (1975) implementada en el programa RIESGAV; el resultado utilizado corresponde al valor mayor obtenido.

Como segundo componente del proyecto, se encuentran los procesos de desagregación de la amenaza, que son metodologías que pretenden encontrar los pares Magnitud-distancia $M-d$ que más contribuyen a la amenaza de acuerdo a los escenarios sísmicos definidos para la zona de estudio. En los proyectos realizados para la microzonificación de la ciudad estos procedimientos no fueron ejecutados y se hizo una selección determinista de estos pares. Para solucionar estos inconvenientes, se trabajó con dos procedimientos: el método de inversión de curvas de atenuación, propuesto por Bommer et al. (2000), y el método de igualación con el Espectro Uniforme de Amenaza (EUA), desarrollado por Romeo y Prestininzi (2000). Los resultados arrojados por los dos métodos son comparados, analizados y posteriormente son confrontados con los límites físicos de las fuentes sísmicas definidas.

El tercer componente consiste en la búsqueda de registros acelerográficos reales de acuerdo a los resultados ya obtenidos. Se utilizaron cuatro bases de datos disponibles en la Web donde se obtuvo un buen número de señales acelerográficas de todo el mundo, todas registradas en roca. Para los valores de magnitud donde no se encontraron registros, se generaron señales sintéticas utilizando funciones empíricas de Green (Ordaz et al., 1995).

Posteriormente se seleccionan las señales para cada uno de los escenarios sísmicos definidos, utilizando tres metodologías con parámetros de búsqueda diferentes. El primer método consiste en la búsqueda de acuerdo a los escenarios sísmicos identificados (pares $M-d$) para cada una de las fuentes sísmicas; el segundo método se basa en una

comparación de la forma de los espectros de respuesta de las señales con el espectro de diseño establecido (D_{rms})⁴ y el tercer método se implementó en este proyecto y consiste en el cálculo de la semblanza entre el Espectro Uniforme de Amenaza (EUA) y los espectros de respuesta de las señales. Como último paso, se realizó una comparación de los espectros de respuesta obtenidos en roca con los establecidos en la Norma de Diseño y Construcción Sismo-Resistente Colombiana NSR-98 y, en suelo con los espectros de diseño establecidos en el estudio de microzonificación realizado para la ciudad de Armenia.

ANTECEDENTES

Teniendo en cuenta lo importante que es para la ingeniería poder conocer o medir el grado de amenaza que puede afectar sus estructuras, muchos autores en las últimas décadas han realizado diversas investigaciones que han sido un gran aporte al estado de arte en esta materia. Dos grandes corrientes se han ido desarrollando para el cálculo de la amenaza. Por un lado se encuentra el método determinista (Krinitzsky, 1995; Castilla et al., 2000; Krinitzsky, 2002), que se basa principalmente en las características geológicas para determinar el grado de amenaza de una región. El otro gran grupo está conformado por aquellos que utilizan el método probabilista para el cálculo de la amenaza; entre ellos se destacan Der Kiureghian y Ang (1977) y McGuire (1977) quienes desarrollaron metodologías para la evaluación de la amenaza que hoy en día son ampliamente aplicadas.

Debido a la gran importancia que implica la obtención de magnitudes y distancias confiables, diferentes estudios de desagregación se han realizado en los últimos años a nivel mundial (Ambraseys et al., 1996; Romeo y Prestininzi, 2000; Bommer et al., 2000) y en Colombia se destaca el de Martínez-Pereira et al., (2002) realizado a diferentes ciudades del país. Campbell and Thenhaus (2003) utilizan como método de desagregación uno llamado de triple integración para el cálculo de la magnitud y la distancia a la fuente que más contribuye. A su vez Romeo y Prestininzi (2000), en un estudio dirigido al cálculo de la amenaza para la construcción de un hospital en la ciudad de Frosinone (Centro de Italia), proponen una nueva metodología que consiste en la comparación del Espectro Uniforme de Amenaza (EUA) con el Espectro Objetivo calculado de acuerdo a pares $M-d$. Se han venido realizando estudios para la obtención de ecuaciones de atenuación de aceleración espectral para diferentes periodos ($A_s(T)$); se destacan los de Ambraseys et al. (1996), Bommer et al. (2003) y Ambraseys et al. (2005).

Para la ciudad de Armenia y después de ocurrido el sismo del 25 de enero de 1999, se comenzaron a realizar los estudios para la microzonificación (INGEOMINAS, 1999; UniAndes, 1999) para la ciudad debido a los efectos de sitio que se presentaron y el elevado número de pérdidas de vidas humanas y daños económicos causados. Como parte importante de este proceso se caracterizó los tipos de suelo presentes en el casco urbano, definiéndose por sectores y reglamentando los respectivos espectros de diseño correspondientes a cada uno de ellos (Decreto, 1999).

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Armenia, capital del Departamento del Quindío en Colombia está ubicada al sur-occidente del país, a una longitud de 76.7 Oeste y una latitud de 4.5 Norte. Para el estudio de la amenaza regional es necesario identificar los escenarios sísmicos que pueden aportar. Para ello y bajo recomendaciones de varios autores (McGuire, 1977; Der Kiureghian y Ang, 1977; Monsalve et al., 1999; Martínez-Pereira et al., 2002) se trabajó con un área circular de radio 200 km. Esta zona está ubicada aproximadamente entre las longitudes 72° Oeste hasta 78° Oeste y entre las latitudes 3° Norte a 7° Norte. Es una región de amenaza sísmica alta en el país, ya que abarca en gran medida los Andes colombianos donde se encuentran ubicadas las fallas activas que pueden producir sismos destructivos de gran intensidad. Las principales fallas que se encuentran dentro de la zona de estudio se muestran en la Figura 1, donde sus principales características fueron tomadas del estudio de Guzmán et al. (1998).

METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Análisis probabilista de la amenaza sísmica

Para la evaluación de la amenaza sísmica se utilizaron los programas propuestos por McGuire (1976), EQ-RISK, y por Der Kiureghian (1975), RIESGAV, donde toda la información suministrada como entrada de datos se obtuvo del estudio AIS-300 (1996) que es la misma utilizada para la formulación de la normativa colombiana NSR-98.

Para la evaluación de la amenaza se utilizaron las ecuaciones de atenuación de ondas sísmicas propuestas por Donovan (1974) y McGuire (1974), y se tomó como valor de amenaza para cada periodo de retorno el mayor de los dos.

⁴ Desviación promedio de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados entre el espectro observado con el espectro de diseño (D_{rms}).

En la Tabla 1 se aprecian los resultados obtenidos de la evaluación de la amenaza para la ciudad de Armenia y de las diferentes fallas presentes en la región utilizando los dos programas mencionados. Si se comparan los resultados obtenidos por los programas con los suministrados por el estudio [AIS-300, 1996), se puede observar que no están tan alejados entre si, ya que la Norma establece como valor de amenaza para la ciudad de Armenia 0.25g y con la evaluación realizada da un valor de 0.2769g. También se observa que la amenaza para la ciudad de Armenia esta controlada principalmente por la falla Romeral, pero tanto la falla Ibagué como la zona de Subducción⁵ pueden producir sismos considerables que afectan a la región⁶.

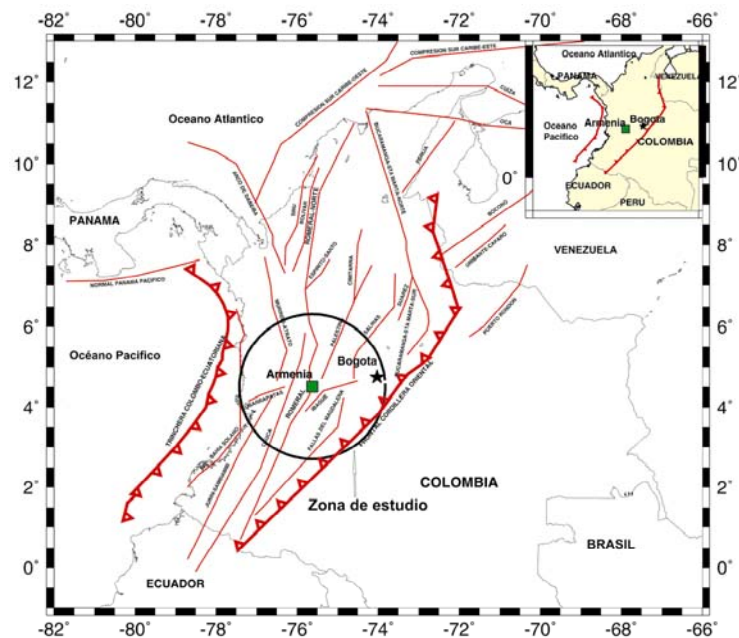


Figura 1: Principales fallas geológicas definidos para la ciudad de Armenia.
Adaptado del estudio AIS-300 (1996).

Tabla 1: Amenaza sísmica para la ciudad Armenia evaluando todas las fuentes e individualmente: (a) Programa EQ-RISK, (b) Programa RIESGAV.

Fuente	(a) Amenaza McGuire, g %	(b) Amenaza Der Kiureghian, g %
Todas las fuentes	0.2769	0.2713
Romeral	0.2303	0.2123
Subducción	0.1136	0.1055
Ibagué	0.1541	0.1290
Palestina	0.0590	0.1079
Garrafas	0.0383	0.0641

Para implementar el método de inversión de curvas como metodología de desagregación de la amenaza sísmica, fue necesario realizar modificaciones tanto al programa EQ-RISK como a RIESGAV, para evaluar todos los parámetros asociados al movimiento fuerte. Estas modificaciones consistieron básicamente en la introducción de las diferentes ecuaciones de atenuación para cada uno de los parámetros, adecuación de los archivos de salida y aumento en la entrada de datos. Además, para la generación del espectro uniforme de amenaza fue necesario implementar un programa basado en la rutina de RIESGAV, que evaluara la amenaza con cada una de las ecuaciones de atenuación establecidas por Bommer et al. (2003) para diferentes periodos entre 0.1 segundos hasta 2.0 segundos (46 ecuaciones).

⁵ Al referirse a “zona de Subducción” se asume como la contribución de la zona de Benioff Intermedia, zona de Benioff Profunda y zona de Subducción.

⁶ Es importante anotar que para el estudio solo se utilizarán las fuentes sísmicas que representen un aporte significativo a la amenaza, ya que las demás fuentes son controladas por éstas.

DESAGREGACIÓN DE LA AMENAZA

Cuando se aplica un método probabilista para la evaluación de la amenaza sísmica, éste agrega las contribuciones de los movimientos de suelo a partir de la magnitud y la distancia del sismo significativo para un sitio de interés en ingeniería, por tanto, los resultados arrojados por un método probabilista no son representativos de un solo sismo (Campbell and Thenhaus, 2003). Para realizar estudios de microzonificación es necesario poseer las magnitudes y distancias específicas que más contribuyen a la amenaza, para obtener estos resultados se han introducido diferentes métodos, los cuales se han llamado de desagregación que consisten en la determinación de estos dos parámetros a partir de diferentes bases teóricas.

Inversión de curvas de atenuación

Ya establecidas las fallas a las que se le van a realizar el análisis, se procede a evaluar individualmente la amenaza para cada uno de los parámetros del movimiento fuerte, esta evaluación es realizada por medio de los diferentes programas modificados para tal fin. Los resultados para la falla Romeral se muestran en la Tabla 2 (a) y (b), para la falla Ibañe se encuentran consignados en la Tabla 3 (a) y (b) y para la zona de Subducción en la Tabla 4 (a) y (b), correspondientes a los modelos de McGuire (1976) y de Der Kiureghian y Ang (1977), respectivamente.

De la Figura 2 (a) se puede observar que el escenario sísmico compatible con la falla Romeral utilizando el método de McGuire puede ser un evento sísmico con una magnitud M_w de 6.3 ± 0.1 a una distancia hipocentral de 18 ± 2 km. De la misma forma, al analizar los resultados obtenidos por el método de Der Kiureghian, Figura 2 (b), da un escenario sísmico con una magnitud M_w de 6.2 ± 0.1 a una distancia hipocentral de 14 ± 2 km.

**Tabla 2: Amenaza sísmica falla Romeral para varios parámetros de movimiento fuerte.
(a) Programa EQ-RISK, (b) Programa RIESGAV.**

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0,1890
As(T = 0.1 s)	g	0,3510
As(T = 0.5 s)	g	0,2760
As(T = 1.0 s)	g	0,1350
As(T = 2.0 s)	g	0,0530
Du	s	9,6200

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0.2239
Vm	cm/s	20.5561
As(T = 0.1 s)	g	0.3957
As(T = 0.5 s)	g	0.2996
As(T = 1.0 s)	g	0.1441
As(T = 2.0 s)	g	0.0518
IA	m/s	0.0276
Du	s	9.7023

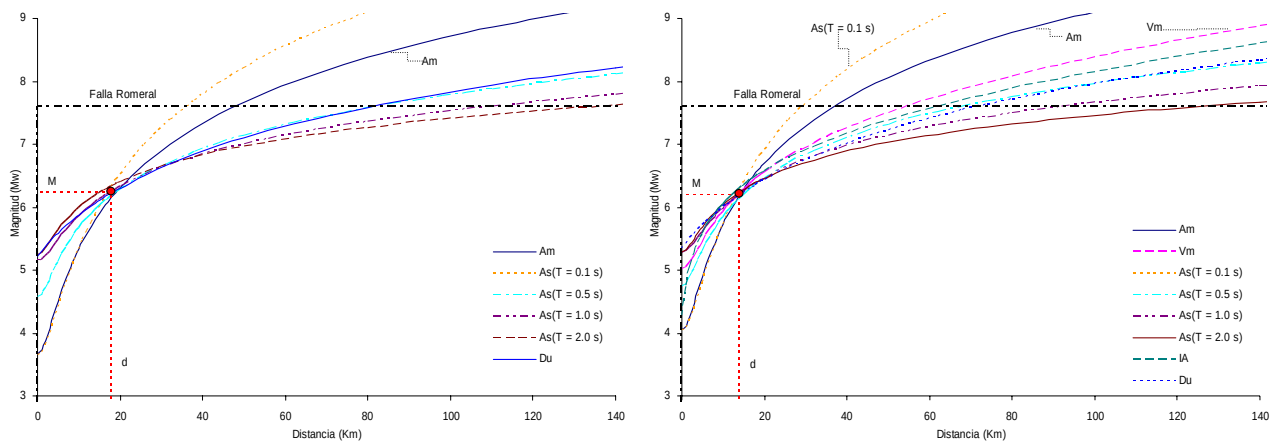


Figura 2: Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la falla Romeral. (a) Programa EQ-RISK, $p = 0.77$, (b) Programa RIESGAV, $p = 0.65$, donde p corresponde al número de desviaciones estándar.

La Figura 3 (a) muestra que el escenario sísmico compatible con la falla Ibagué utilizando el método de McGuire es un evento sísmico con una magnitud M_w de 6.6 ± 0.1 a una distancia hipocentral de 45 ± 5 km. De la misma forma, al analizar los resultados obtenidos por el método de Der Kiureghian, Figura 3 (b), da un escenario sísmico con una magnitud de $6.6 \pm 0.1 M_w$ a una distancia hipocentral de 54 ± 2 km.

Tabla 3: Amenaza sísmica falla Ibagué para varios parámetros de movimiento fuerte.
(a) Programa EQ-RISK, (b) Programa RIESGAV.

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0.0982
As(T = 0.1 s)	g	0.1675
As(T = 0.5 s)	g	0.1698
As(T = 1.0 s)	g	0.0866
As(T = 2.0 s)	g	0.0367
Du	s	6.9655

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0.0902
Vm	cm/s	7.3166
As(T = 0.1 s)	g	0.1460
As(T = 0.5 s)	g	0.1537
As(T = 1.0 s)	g	0.0803
As(T = 2.0 s)	g	0.0341
IA	m/s	0.008
Du	s	6.0221

Y por último, al observarse la Figura 4 (a), se aprecia que el escenario sísmico compatible con la zona de Subducción utilizando el método de McGuire puede ser un evento sísmico con una magnitud M_w de 7.8 ± 0.1 a una distancia hipocentral de 208 ± 20 km. De la misma forma, al analizar los resultados obtenidos por el método de Der Kiureghian, Figura 4 (b), da un escenario sísmico con una magnitud M_w de 7.7 ± 0.1 a una distancia hipocentral de 192 ± 10 km.

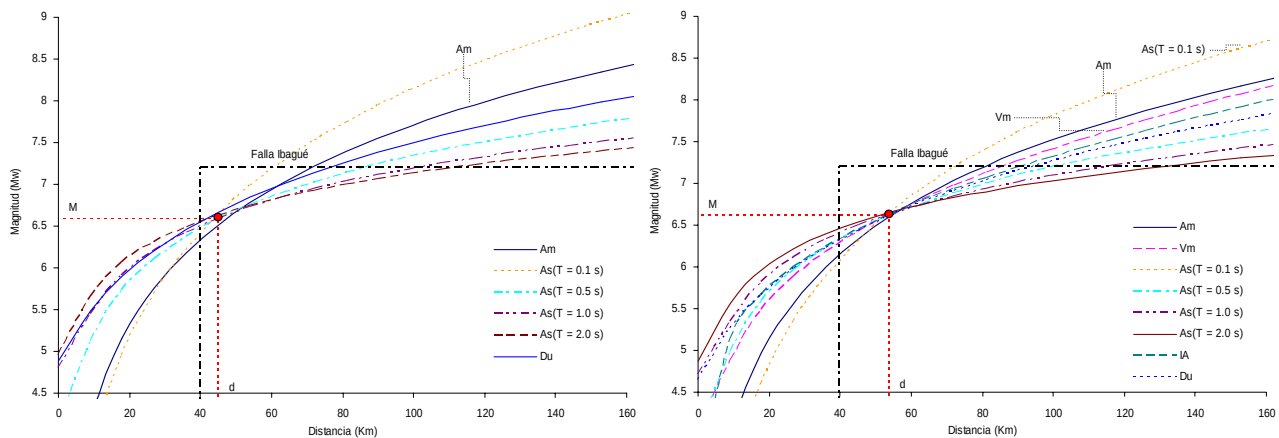


Figura 3: Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la falla Ibagué. (a) Programa EQ-RISK, $p = 0.7$; (b) Programa RIESGAV, $p = 0.75$.

Tabla 4: Amenaza sísmica zona de Subducción para varios parámetros de movimiento fuerte.
(a) Programa EQ-RISK, (b) Programa RIESGAV.

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0.0710
As(T = 0.1 s)	g	0.1040
As(T = 0.5 s)	g	0.2060
As(T = 1.0 s)	g	0.1400
As(T = 2.0 s)	g	0.0760
Du	s	6.9550

Parámetro	Unidad	Amenaza
Am	g	0.0631
Vm	cm/s	3.4138
As(T = 0.1 s)	g	0.0877
As(T = 0.5 s)	g	0.1639
As(T = 1.0 s)	g	0.1096
As(T = 2.0 s)	g	0.0556
IA	m/s	0.01000
Du	s	5.5673

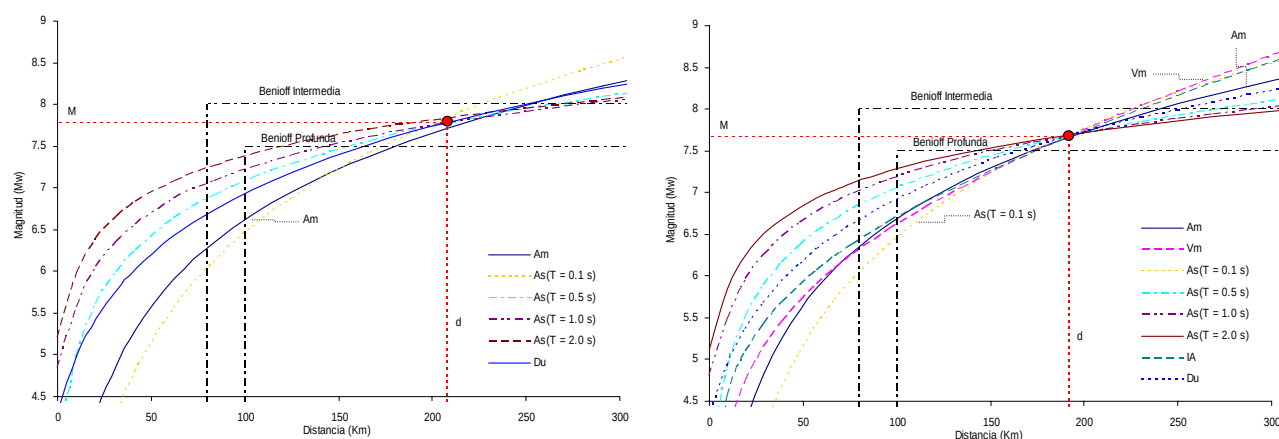


Figura 4: Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la zona de Subducción. (a) Programa EQ-RISK, $p = 1.3$; (b) Programa RIESGAV, $p = 1.0$.

Igualación con Espectro Uniforme de Amenaza

Evaluadas las ecuaciones de aceleración espectral utilizando el programa EUA, se procede a generar el EUA regional y el de cada una de las fuentes seleccionadas (Movimiento Objetivo, MO)⁷ como se muestra en la Figura 5. Se procede a aplicar la metodología propuesta por Romeo y Prestininzi (2000). Para ello se establecen las ternas M-d- σ y se busca los espectro de diseño (ED) que minimice las diferencias con el MO. Para el presente trabajo, la magnitud se dejó como parámetro fijo, el número de desviaciones estándar se fue incrementado gradualmente cada 0.2σ desde 0.0σ hasta 1.0σ y la distancia se calculó utilizando las ecuaciones de atenuación para cada una de las opciones dispuestas. La distancia seleccionada para completar la terna fue la que arrojará la menor diferencia con el MO. Los resultados obtenidos para la falla Romeral se listan en la Tabla 5(a). De acuerdo con esta tabla y a los límites físicos para la falla Romeral, las parejas que mejor describen su comportamiento (datos en negrilla) son las que se encuentran entre la magnitud $6.3 \pm 0.1 M_w$ y distancia 18 ± 3 km. Al hacer el mismo análisis para la falla Ibaigüé se obtiene que la magnitud a utilizar es de $6.6 \pm 0.1 M_w$ a una distancia de 54 ± 3 km. (ver Tabla 5(b)) y para la zona de Subducción sería un evento cuya magnitud tenga un valor de $7.8 \pm 0.1 M_w$ y se presente a 176 ± 15 km. (ver Tabla 5(c)). Se pueden apreciar gráficamente en la Figura 5 los diferentes EUA calculados de acuerdo a pares mencionados anteriormente (líneas segmentas), donde se observa que dan muy similares a los obtenidos de la evaluación.

Tabla 5: Ternas M-d- σ halladas utilizando el método de Igualación con EUA. (a) Falla Romeral, (b) Falla Ibaigüé, (c) Zona de Subducción.

Magnitud	Distancia	σ	Magnitud	Distancia	σ	Magnitud	Distancia	σ
6.5	21.41	0.8	6.8	65.48	0.8	8.0	223.63	0.8
6.5	18.40	0.6	6.8	56.02	0.6	8.0	190.91	0.6
6.4	19.65	0.8	6.7	59.17	0.8	7.9	203.46	0.8
6.4	16.85	0.6	6.7	50.86	0.6	7.9	173.53	0.6
6.3	18.05	0.8	6.6	54.03	0.8	7.8	176.53	0.8
6.3	15.48	0.6	6.6	46.61	0.6	7.8	152.15	0.6
6.2	16.68	0.8	6.5	49.56	0.8	7.7	160.48	0.8
6.2	14.26	0.6	6.5	43.27	0.6	7.7	138.41	0.6

⁷ El “Movimiento Objetivo” corresponde a la señal idealizada que se está buscando con el estudio, donde su espectro de respuesta equivale al EUA del escenario sísmico de cada una de las alternativas.

⁸ Donde M = Magnitud, d = distancia y σ = desviación estándar.

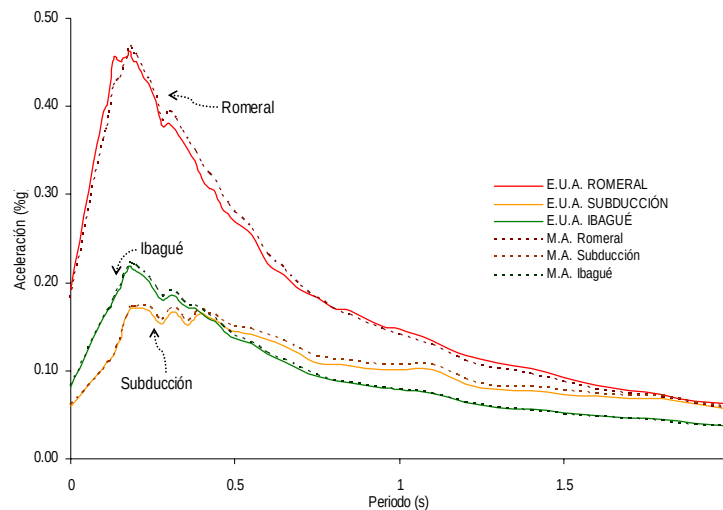


Figura 5: EUA para las fallas Romeral e Ibagué y la zona de Subducción (Líneas continuas) y EUA del mejor ajuste (MA) para cada caso (líneas punteadas), correspondientes a los datos en negrilla de la Tabla 5.

OBTENCIÓN DE SEÑALES

Acelerogramas digitales de bases de datos

Los sitios de Internet que se utilizaron para la obtención de los acelerogramas digitales presentan excelentes opciones de búsqueda lo cual ayuda de manera importante encontrar las señales necesarias. Un de los sitios de la Internet utilizados para la obtención de señales es el de Japón llamado K-NET, cuya dirección electrónica es http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/index_en.shtml; la búsqueda en el sitio es rápida y proporciona información detallada de cada sismo y de cada una de las estaciones que lo registraron. Otro sitio en la Web importante para acceder a los registros sísmicos es el de COSMOS (<http://db.cosmos-eq.org>) que posee más de 4000 sismos disponibles de todo el mundo (Bommer y Acevedo, 2004), de los cuales el 40% provienen de Estados Unidos, el 20% de Japón, un 18% de Nueva Zelanda y un 15% de otras regiones de Latinoamérica. La búsqueda en este sitio se puede hacer por medio del tipo de magnitud, valores de magnitud, distancias, profundidad, geología de la estación, entre otros.

También se realizó la búsqueda en el sitio de Internet perteneciente a la base de datos de Europa ISESD (“Internet Site for European Strong-Motion Data”) cuya dirección es <http://isesd.cv.ic.ac.uk>, la cual cuenta con un gran número de acelerogramas digitales que provienen generalmente de Europa y del Oriente Medio. Los parámetros de búsqueda que se tuvieron en cuenta en esta página fueron tipo de magnitud, límites de la magnitud, distancia, profundidad y clasificación del suelo. Además de éstos, la página permite tener en cuenta otros parámetros referentes a la estación, al sismo y a la forma de la onda. Además de estos sitios, está el banco de datos de PEER (<http://peer.berkeley.edu/smcat>) el cual incluye 1557 registros de 143 sismos en regiones tectónicamente activas, de los cuales se pueden obtener las series de tiempo y espectros de respuesta para diferentes valores de amortiguamiento. La búsqueda puede ser realizada en términos de la magnitud, de la distancia, clasificación del suelo y parámetros del espectro de aceleración. Las señales se pueden bajar sin ningún costo de todas las páginas Web mencionadas anteriormente; solo basta con registrarse en ellas y así acceder a toda la información disponible.

Funciones empíricas de Green

De las señales reales obtenidas de los sitios de Internet, algunas no alcanzan el valor de magnitud dado del análisis de desagregación por lo que arrojan valor más bajos del que se necesita. Para solucionar estos inconvenientes se escalaron estas señales utilizando funciones empíricas de Green, metodología que se ha venido aplicando en los últimos años dando buenos resultados (Joyner and Boore, 1986; Wennerberg, 1990; Ordaz et al., 1995); el programa utilizado es SIMFI propuesto por Ordaz et al. (1993) y para el cálculo del momento sísmico se utilizó la propuesta por Hanks y Kanamori (1979):

$$M_o = 10^{\frac{3}{2}M_w + 10.7} \quad (1)$$

Para el cálculo de la caída de esfuerzos se utilizó la ecuación de García et al. (2004):

$$\Delta\sigma = 0.609M_o^{0.108} \quad (2)$$

Este procedimiento se le realizó a un total de cinco registros reales para la falla Romeral, teniendo presente de no escalar con más de un orden de magnitud entre el sismo semilla y el sismo objetivo. Para la fallas Ibañe no fue necesario realizar este tipo de escalamiento y para la zona de Subducción le fue hecho a un total de cuatro registros.

SELECCIÓN DE REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

Selección de acuerdo a los pares M-d

Este procedimiento es conocido como selección de registros por criterios geofísicos (Bommer y Acevedo, 2004), en otras palabras, se hace la selección de acuerdo a las características físicas de la fuente sísmica. Para realizar la búsqueda de sismos compatibles con la falla Romeral se tomó como criterio que fueran registrados en roca, con una magnitud en el rango de 6.2-6.4 M_w a una distancia de 10-25 km y con una profundidad no mayor a 20 km. De la búsqueda se obtuvo un total de tres señales que cumplían con todas las características y se le adicionaron las cinco señales escaladas para esta falla. En la Tabla 6 se encuentra la información referente a los sismos seleccionados⁹ para la falla Romeral. Al igual, se realizó el mismo procedimiento para la falla Ibañe donde se tomó como ventana de búsqueda registros con una magnitud de 6.6-6.8 M_w a una distancia de 45-60 km y con una profundidad no mayor a 30 km. Se obtuvo un total de siete registros que cumplían con todas las características mencionadas y no hubo necesidad de escalar señales. Las características básicas de estos registros se encuentran consignadas en la Tabla 7. Para la zona de Subducción, los registros a seleccionar fueron los que presentaran una magnitud M_w de 7.6-7.8 a una distancia de 100-200 km y una profundidad no mayor de 100 km. En este caso se presentaron más problemas, solo se obtuvo una señal que cumplía con todas las características y las cuatro restantes fueron generadas con funciones empíricas de Green¹⁰ (véase la Tabla 8).

Selección de acuerdo a la Desviación Promedio de la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (D_{rms} ¹¹).

En Bommer y Acevedo (2004) este método es llamado Selección de registros por Espectro Ordinario, y consiste en comparar la forma de los espectros normalizados de las diferentes señales con el establecido por la norma. La comparación no se hace para todo el espectro sino para un rango de periodos y se establece que la búsqueda se base sobre la desviación promedio de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados entre el espectro observado con el espectro objetivo de diseño, mediante la siguiente relación:

$$D_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{As_o[T_i]}{Am_o} - \frac{As_s[T_i]}{Am_s} \right)^2} \quad (3)$$

donde N es el número de periodos para los que la forma del espectro es especificada, $As_o[T_i]$ es la aceleración espectral del registro para el periodo T_i , $As_s[T_i]$ es la aceleración espectral del espectro objetivo para el mismo periodo; Am_o y Am_s son las aceleraciones máximas de suelo del registro y del espectro objetivo, respectivamente. Bommer y Acevedo (2004) recomendaron que para una buena selección en periodos cortos, de 0.1 a 0.3 segundos, se utilizara un D_{rms} cercano a 0.06 o 0.07.

Teniendo en cuenta que esta metodología compara la forma del espectro, para la ciudad de Armenia la ventana de magnitudes se amplió un poco (6.2-6.6 M_w) y el rango de distancia se tomó de 5 a 30 km, es decir, el escenario sísmico utilizado es el de la falla Romeral ya que es ella quien puede producir sismos importantes donde las máximas amplitudes se encuentran en los periodos cortos, y es allí donde se va a comparar los espectros. Se tomaron valores de D_{rms} entre 0.07-0.08 donde fueron seleccionados un total de 8 registros, los cuales se encuentran consignados en la Tabla 9. Para el

⁹ Los registros que se encuentran con * corresponden a las señales que fueron escaladas para la fallas Romeral.

¹⁰ Los registros que se encuentran con * corresponden a las señales que fueron escaladas con funciones empíricas de Green para la zona de Subducción.

¹¹ Estas siglas corresponden a su abreviatura en inglés.

cálculo del D_{rms} se utilizó el programa *ESP-RES*¹² y las señales seleccionadas fueron escaladas aritméticamente al valor de amenaza establecido.

Tabla 6: Sismos seleccionados de acuerdo a los pares M-d para la falla Romeral.

Identificación	Fecha	Hora	Mw.	Estación	Am (%g)	d. hip. (km)	d. epc. (km)	Prof (km)
LONGT_ACE.NOOE	25/05/1980	16:34	6.3	Long Valley Dam	0.271	15.52	12.65	9.0
KGS007_ACE.NS	26/03/1997	14:38	6.3	KGS007	0.212	15.13	12.51	8.0
MYG010_ACE.NS	26/07/2003	07:13	6.2	MYG010	0.257	17.44	12.65	12.0
TARC_ACE.N90E*	15/09/1976	09:21	6.1	Tarcento	0.136	12.00	6.00	8.0
ASSISS_ACE.N18E*	26/09/1997	09:40	6.0	Assisi-Stallone	0.180	21.00	14.00	6.0
ASSISS_ACE.S72E*	26/09/1997	09:40	6.0	Assisi-Stallone	0.158	21.00	14.00	6.0
LONGD_ACE.N90E*	25/05/1980	19:44	6.0	Long Valley Dam (D)	0.107	19.71	11.51	16.0
CARRT_ACE.S00W*	31/10/1935	18:38	6.2	Carroll Collage	0.173	08.71	6.31	6.0

Tabla 7: Sismos seleccionados de acuerdo a los pares M-d para la falla Ibagué.

Identificación	Fecha	Hora	Mw.	Estación	Am (%g)	d. hip. (km)	d. epc. (km)	Prof (km)
SELFCT_ACE.N00E	21/06/2000	00:51	6.5	Selfoss - City Hall	0.13	15	14	-
SELFHT_ACE.N90E	21/06/2000	00:51	6.5	Selfoss - Hospital	0.15	14	14	-
KYPAT_ACE.S27E	18/11/1997	13:07	6.6	Kyparrisia	0.08	-	-	-
TOLMT_ACE.N90E	06/05/1976	20:00	6.5	Tolmezzo Diga A.	0.31	-	-	7
CSULT_ACE.N00W	17/01/1994	04:31	6.7	Csula Admin (8-Story)	0.16	42.5	38.5	18
STORT_ACE.S00E	17/01/1994	04:31	6.7	Govt Office (15-Story)	0.13	37.2	32.6	18
JOSHT_ACE.N10W	29/03/1999	19:05	6.6	Joshimat	0.06	43	40.3	15

Tabla 8: Sismos seleccionados de acuerdo a los pares M-d para la zona de Subducción.

Identificación	Fecha	Hora	Mw.	Estación	Am (%g)	d. hip. (km)	d. epc. (km)	Prof (km)
PAULT_ACE.S90E*	16/10/1999	09:47	7.1	Paulette Pi, La Canada	0.019	181.2	176.24	30
ROSAT_ACE.N16W*	16/10/1999	09:47	7.1	Del Rosa Work	0.032	101.8	93.17	30
MANAT_ACE.N05E*	10/08/1993	00:51	6.8	Manapouri Power	0.027	53.0	51.0	15
HRAUT_ACE.N90E*	17/06/2000	15:40	6.6	Hrauneyjafoss	0.016	61.0	57.0	15
ACAJT_ACE.N90W	13/01/2001	17:34	7.6	Acajutla	0.114	159.2	145.23	35

Tabla 9: Sismos seleccionados de acuerdo al D_{rms} para la ciudad de Armenia, F corresponde al factor de escalamiento de los registros.

Identificación	Fecha	Hora	Mw.	Estación	Am (%g)	d. hip. (km)	Prof. (km)	D_{rms}	F
LONGT_ACE.NOOE	25/05/1980	16:34	6.3	Long Valley Dam	0.234	15.52	9.0	0.0779	1.15
BIGLT_ACE.S00W	28/06/1992	08:05	6.4	Big Bear Lake	0.481	12.89	7.0	0.0718	0.56
MATAT_ACE.N07W	02/03/1987	01:42	6.5	Matahina Dam D	0.214	26.3	10.0	0.0797	1.12
TOLMT_ACE.N90E	06/05/1976	20:00	6.5	Tolmezzo-Diga A	0.315	-	7.0	0.0769	0.86
FLAGT_ACE.N00E	17/06/2000	15:40	6.6	Flagbjarnarholt	0.319	12.20	15.0	0.0630	0.85
SELFHT_ACE.N90E	21/06/2000	00:51	6.5	Selfoss-City Hall	0.116	30	14	0.0789	2.32
KYPAT_ACE.S27E	18/11/1997	13:07	6.6	Kiparrisia	0.073	-	-	0.0850	3.68
CARRT_ACE.S00W*	31/10/1935	18:38	6.2	Carroll Collage	0.173	8.71	6.0	0.0799	1.56

¹² Programa generado en este estudio tanto para el cálculo del D_{rms} como los espectros de respuesta de las señales.

Selección de acuerdo a la semblanza

Esta es una nueva metodología que se desea implementar y busca comparar la forma de los espectros de las señales seleccionadas con el espectro de respuesta establecido para la región; se decidió hacerse con el EUA y con las señales que fueron seleccionadas y registradas en roca. Del EUA se conoce el valor de la aceleración espectral correspondiente a los 46 periodos definidos en las ecuaciones de atenuación de aceleración espectral definidas por Bommer et al. (2003). A su vez, de las señales seleccionadas se generaron sus espectros de respuesta por medio del programa *ESP-RES*. Teniendo en cuenta que esta metodología compara la forma del espectro, a las ventanas de magnitud y distancia no se les puso tope, pero se tuvo en cuenta los límites físicos de la fallas.

La semblanza se calcula mediante la siguiente expresión (Cruz, 2000):

$$Sem = 0.5 - \frac{Cross(E_R E_O)}{auto(E_R) + auto(E_O)} \quad (4)$$

donde $Cross(E_R E_O)$ es la correlación cruzada entre el Espectro de Respuesta, E_R , y el Espectro Objetivo, E_O ; $auto(E_R)$ y $auto(E_O)$ son las autocorrelaciones cruzadas entre los mismos espectros. En la Tabla 10 se encuentran consignadas las señales seleccionadas por esta metodología; el porcentaje de semblanza utilizado fue del 3.5%, donde nueve registros acelerográficos fueron seleccionados.

Tabla 10: Sismos seleccionados de acuerdo a la Semblanza para la falla Romeral.

Identificación	Fecha	Hora	Mw.	Estación	Am (%g)	dist. hip. (km)	Profun. (km)	Sembl.
GOPET_ACE.N70W	29/03/1999	19:05	6.6	Gopeshwar	0.20	30	15	3.27
CSULT_ACE.N90W	17/01/1994	04:31	6.7	Csula Admin (8-Story)	0.11	42.5	18	3.27
MINNT_ACE.N00E	17/06/2000	15:40	6.6	Minni-Nupur	0.16	13	15	1.81
MINNT_ACE.N90E	17/06/2000	15:40	6.6	Minni-Nupur	0.16	13	15	1.87
SELFCT_ACE.N90E	21/06/2000	00:51	6.5	Selfoss_Hospital	0.18	15	10	3.34
SELFHT_ACE.N00E	21/06/2000	00:51	6.5	Selfoss_City Hall	0.12	15	10	2.43
ASSIT_ACE.N18E	26/09/1997	09:40	6	Assisi_Stallone	0.16	21	14	3.21
CARRT_ACE.S00W	31/10/1935	18:38	6.2	Carroll Collage	0.17	8.71	6	1.61
LONGRT_ACE.N00E	25/05/1980	19:44	6	Long Valley Dam (D)	0.11	19.71	11.51	2.67

COMPARACIÓN DE ESPECTROS

Comparación con el espectro establecido por la NSR-98

Para realizar la comparación con el espectro establecido por la NSR-98, se trabajó bajo las siguientes condiciones: El perfil de suelo tomado corresponde al S_I , que corresponde a una superficie compuesta por roca con una velocidad de onda cortante mayor o igual a 750 m/s, donde el coeficiente de sitio tiene un valor de 1.0; el coeficiente de importancia tomado es el correspondiente a estructuras del Grupo 1, I_b , donde pertenecen todas las estructuras reglamentadas que no hagan parte de los otros tres grupos (Estructuras de ocupación especial, Edificaciones de atención a la comunidad y Edificaciones indispensables) y se tomó un Am de 0.25g, valor de aceleración establecido para la ciudad de Armenia¹³.

Calculados los espectros de respuesta de las señales seleccionadas para cada uno de los cinco grupos presentes, se procedió a generar las envolventes, las cuales se utilizaron para realizar la comparación con el espectro de diseño definido por la norma.

Comparación con el espectro establecido por el estudio de microzonificación.

De igual manera, tomando las mismas señales y pasándolas por un programa de simulación de suelo, EERA (Bardet et al., 2000), se hace la nueva comparación de los espectros de las señales ampliadas con el espectro de microzonificación. La información correspondiente a la clasificación del suelo presente en la ciudad de Armenia se hizo

¹³ Una descripción más detallada de cada uno de los parámetros se encuentra en el Título A de la Norma de Sismo-Resistente Colombiana, NSR-98.

de acuerdo a lo indicado en INGEOMINAS (1999), donde están especificados los diferentes estratos determinados para las zonas establecidas dentro del casco urbano del municipio. Las señales sísmicas fueron pasadas por cinco estratos distintos pertenecientes a dos grandes grupos según el estudio de microzonificación (Decreto, 1999). El primer grupo corresponde a las cenizas de origen volcánico y está conformado por CENIZAS2 y CENIZAS3, en el segundo grupo se encuentran los rellenos antrópicos y naturales y está definido por LLENOS1, LLENOS2 y LLENOS3. Los espectros de microzonificación definidos para la ciudad de Armenia son los especificados en Decreto (1999), donde se consideran tres grandes grupos: cenizas de origen volcánico, rellenos antrópicos y naturales, y terrazas, flujos y suelos de poco espesor. En el presente trabajo se generaron los espectros de diseño correspondientes a cenizas de origen volcánico y a rellenos antrópicos y naturales, y se compararon con los espectros de respuesta de las diferentes señales modificadas por los efectos de sitio de acuerdo con las clasificaciones de suelo mencionadas anteriormente.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis probabilista de la Amenaza Sísmica

Si se hace una comparación de los resultados obtenidos por cada uno de los programas utilizados, se puede decir que dieron valores muy parecidos entre sí, dando a entender que las dos metodologías a la hora de realizar la evaluación de la amenaza no crean discrepancias. Es importante resaltar esto ya que tanto a EQ-RISK como a RIESGAV los datos de entrada hay que suministrárselos de formas distintas y el manejo de esa información fue realizada en este proyecto.

Al comparar los resultados obtenidos en relación a la aceleración máxima, A_m , con los dispuestos en la normativa colombiana, *NSR-98* y el estudio de microzonificación (UniAndes, 1999), se observa que no dieron tal alejados ya que las dos normas proponen para la ciudad de Armenia un valor de A_m de $0.25g$ y en este proyecto en la evaluación con los dos programas dio $0.27g$; además, se debe tener en cuenta que toda la información referente a las fuentes sísmicas que se utilizaron en el análisis proviene del estudio AIS-300 (1996), realizado como base a la Norma Sismo-Resistente Colombiana.

Por último, se debe tener en cuenta que toda la información referente a las fuentes sísmicas que se utilizó en este estudio proviene de una fuente externa y la calidad o confiabilidad de la misma afectan considerablemente los resultados; no se quiere decir que la información no sea adecuada, sino que su veracidad no depende del proyecto.

MÉTODOS DE DESAGREGACIÓN

En los diferentes estudios de amenaza realizados antes de este proyecto, la selección de los pares $M-d$ utilizados para la búsqueda de registros sísmicos estaba dada por la experiencia e intuición de los investigadores. Si se comparan los resultados obtenidos de este estudio con los que se tienen de proyectos anteriores (UniAndes, 1999), se observan ciertas diferencias que radican básicamente en el valor de magnitud de las señales seleccionadas, fuentes sísmicas escogidas y valor de la amenaza de cada una de ellas. La metodología utilizada en (UniAndes, 1999) para realizar la selección de las señales sísmicas consistió básicamente en definir escenarios sísmicos que según ellos tendrían un nivel de amenaza significativo para la región, asignarles fuentes que lo reproducirían, posteriormente, seleccionar señales sísmicas reales y escalarlas a un nivel de amenaza establecido.

En este proyecto se evaluó la amenaza total proveniente de todas las fuentes presentes en la región y el proceso de desagregación se realizó de la siguiente manera: se evaluó la amenaza sísmica a cada fuente individual y se escogieron las que tenían un mayor grado de contribución, se procedió a aplicar los métodos de desagregación¹⁴ para encontrar los pares $M-d$ que mejor describieran los escenarios sísmicos compatibles con el grado de amenaza y como último paso se procedió a realizar la búsqueda de señales mediante métodos adecuados.

Como resultado del proceso de desagregación en este proyecto se obtuvieron tres escenarios sísmicos para la ciudad de Armenia, los cuales son la falla Romeral (sismo cercano superficial), la falla Ibagué (aporte de fuentes intermedias) y la zona de Subducción conformada por la zona de Benioff Intermedia, zona de Benioff Profunda y la zona de Subducción (considerando la influencia de sismos profundos y lejanos). Si bien la diferencia radica en que el estudio de microzonificación se definió determinísticamente en algunos casos, los posibles pares $M-d$ que debían tener las señales escogidas o los adecuaron dependiendo del nivel de amenaza establecido. Con ayuda de los métodos de desagregación se obtuvieron pares $M-d$ que describían los escenarios sísmicos de cada una de las fuentes escogidas, dando muy buenos resultados ya que todos se encontraron dentro de los límites físicos posibles.

¹⁴ Inversión de curvas e igualación con el EUA

SELECCIÓN DE SEÑALES

Puede decirse que la forma más adecuada y confiable de hacer la selección de los registros sísmicos es de acuerdo a los pares $M-d$, puesto que la señal corresponde a una representación física de lo que posiblemente se podría presentar en los diferentes escenarios sísmicos definidos para la zona de estudio. Las dificultades que hay que afrontar es que el número de señales que cumplen con todas estas características es muy reducido y no se alcanzan a obtener el número mínimo de registros recomendados. Una de las alternativas utilizadas para subsanar estas dificultades fue realizar escalamientos de las señales en magnitud utilizando funciones empíricas de Green, es decir, generar sismos sintéticos con la ayuda de sismos semillas que cumplan con características físicas de los escenarios sísmicos pero que tengan magnitudes menores. La búsqueda de señales por medio de pares $M-d$ arrojó resultados adecuados para cada uno de los escenarios sísmicos establecidos.

En la aplicación del D_{rms} en la búsqueda de señales de acuerdo a los espectros de diseño establecidos, las ventajas que se presentan son apreciables cuando los espectros de diseño determinados para la zona de estudio tienen un grado de confiabilidad muy bueno y se necesitan obtener señales de acuerdo a las condiciones ya descritas. Otra ventaja que tiene el método es que compara la forma del espectro y no restringe la búsqueda por el valor del A_m de cada registro, ya que la aceleración descende muy rápido de acuerdo a la distancia pero la forma del espectro de respuesta es poco sensible a este parámetro. Una de las desventajas que tiene el método y que es uno de los objetivos propuestos en este proyecto es que no se puede establecer la calidad de los espectros de diseño determinados por la normativa ya que se vuelve parámetro de búsqueda.

Si se observan los diferentes resultados obtenidos con las funciones empíricas de Green, puede apreciarse que no se presentaron señales atípicas ya que al compararse los espectros de Fourier de la señal semilla con el de la señal sintética seleccionada, se apreció un buen comportamiento. El escalamiento realizado de forma aritmética fue hecho siguiendo las recomendaciones que habían sido planteadas anteriormente; por consiguiente, se cree que no presenten problemas ya que las señales escogidas corresponden a valores de magnitud similares a la de los escenarios sísmicos definidos.

COMPARACIÓN DE ESPECTROS

Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR-98

Si se observan los diferentes gráficos presentados, (Figuras 6 y 7), donde se comparan la envolvente de los espectros de respuesta de las señales sísmicas escogidas para cada fuente calculados para un amortiguamiento estructural del 5% con el espectro de diseño establecido por la Norma de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-98, se aprecia que para periodos cortos el valor de aceleración establecido es superado considerablemente por el grupo de señales correspondiente a la falla Romeral y también los escogidos por D_{rms} y la semblanza. Fácilmente se puede establecer que la amenaza para periodos cortos la va a producir la falla Romeral, lo que es bastante razonable ya que corresponde al escenario sísmico superficial más cercano. Además, teniendo en cuenta estos resultados y observando el comportamiento que tienen respecto al espectro de diseño establecido, no es posible mitigar el nivel de amenaza arrojado.

En la Figura 6(a) se aprecian las envolventes de los espectros de respuesta de cada uno de los escenarios sísmicos estudiados, donde se puede observar más detalladamente la situación que se está presentando y que se había mencionado anteriormente: el aumento considerable en amplitud para periodos cortos. Por lo tanto es recomendable realizar una adecuación del espectro de diseño. En la Figura 6 (b) se encuentran graficados los espectros normalizados que corresponden a las envolventes de cada uno de los escenarios sísmicos en estudio. Allí se aprecian comparativamente los contenidos frecuenciales de los diferentes grupos de señales seleccionados.

Estudio de microzonificación

Para tener en cuenta los efectos de sitio que se pueden presentar en la ciudad de Armenia, las señales seleccionadas se pasaron por los perfiles de CENIZAS1, CENIZAS2, LLENOS1, LLENOS2 y LLENOS3 y se compararon los espectros de respuesta calculados para un amortiguamiento estructural del 5% con los espectros de diseño establecidos para la microzonificación de Armenia (Decreto, 1999) para CENIZAS y LLENOS. Al observar los espectros se puede apreciar un comportamiento bimodal, describiendo dos picos bien definidos que van de periodos cortos (cenizas de origen volcánico) a periodos largos (rellenos antrópicos y naturales), de acuerdo al perfil de suelo que se está modelando.

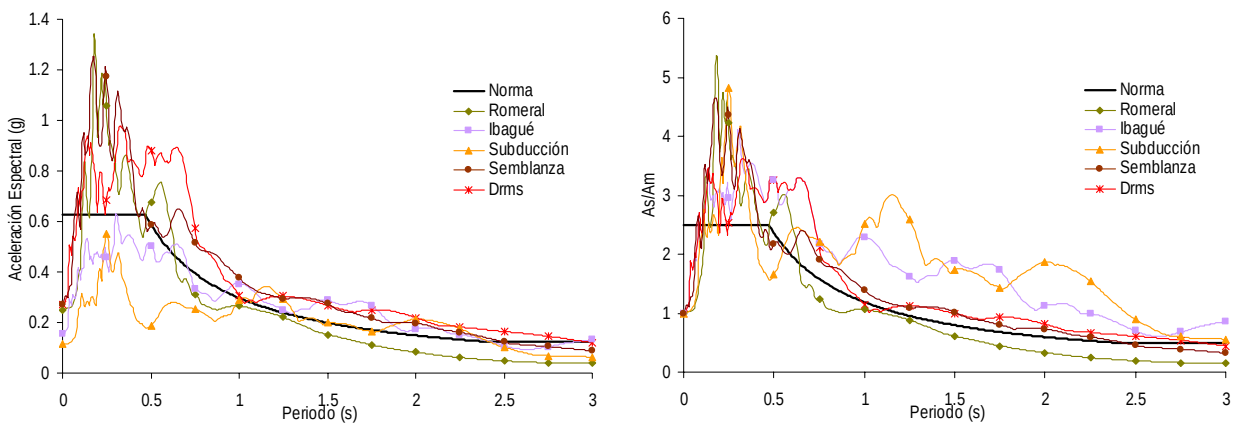


Figura 6: (a) Envolturas de los espectros de respuesta de los diferentes grupos de señales definidos para cada uno de los escenarios sísmicos en estudio; (b) Espectro normalizado correspondiente a las señales seleccionadas para cada uno de los escenarios sísmicos.

Al reunir todos los resultados obtenidos en un mismo gráfico de acuerdo al espectro de diseño que se está comparando, la Figura 7 muestra las envolturas de los espectros obtenidas para los diferentes perfiles de cenizas de origen volcánico y rellenos antrópicos y naturales que se vienen trabajando (INGEOMINAS, 1999), correspondientes a los grupos de señales seleccionadas.

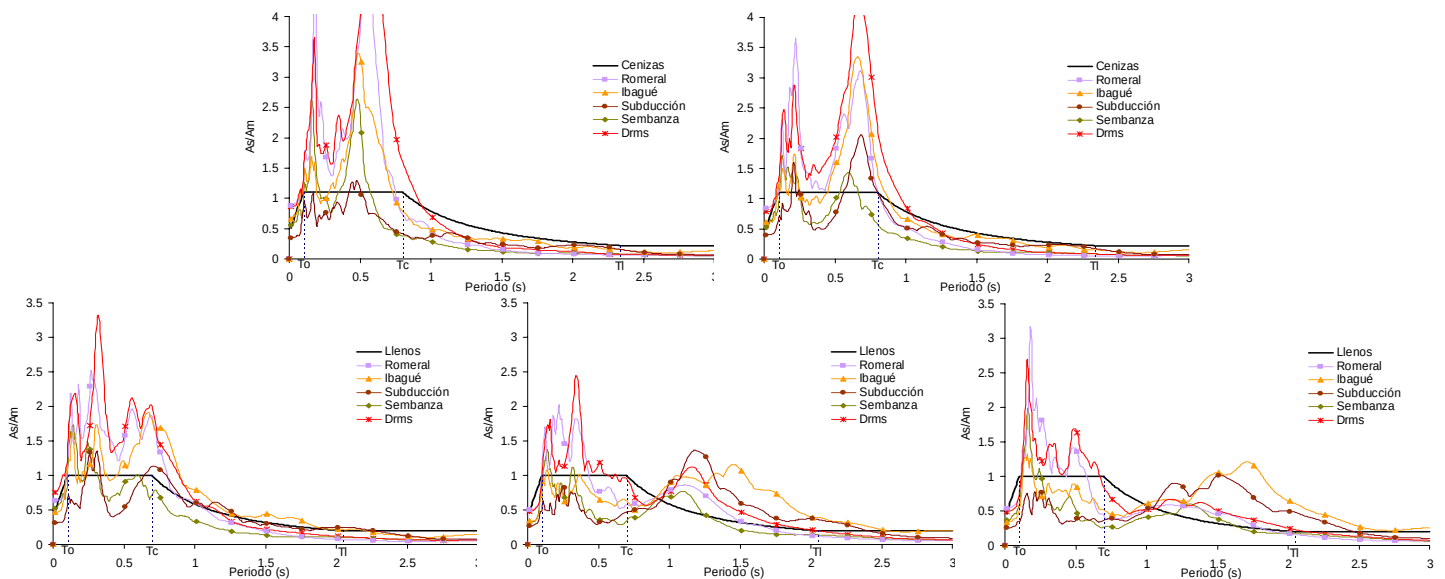


Figura 7: Gráfico comparativo entre el espectro de diseño definido para CENIZAS y LLENOS en Decreto (1999) con los espectros de respuesta correspondientes a las envolturas obtenidas para cada escenario sísmico, donde las señales fueron pasadas por los perfiles de suelo: (a) CENIZAS2 y (b) CENIZAS3, parte posterior; (c) LLENOS1, (d) LLENOS2 y (e) LLENOS 3 parte inferior.

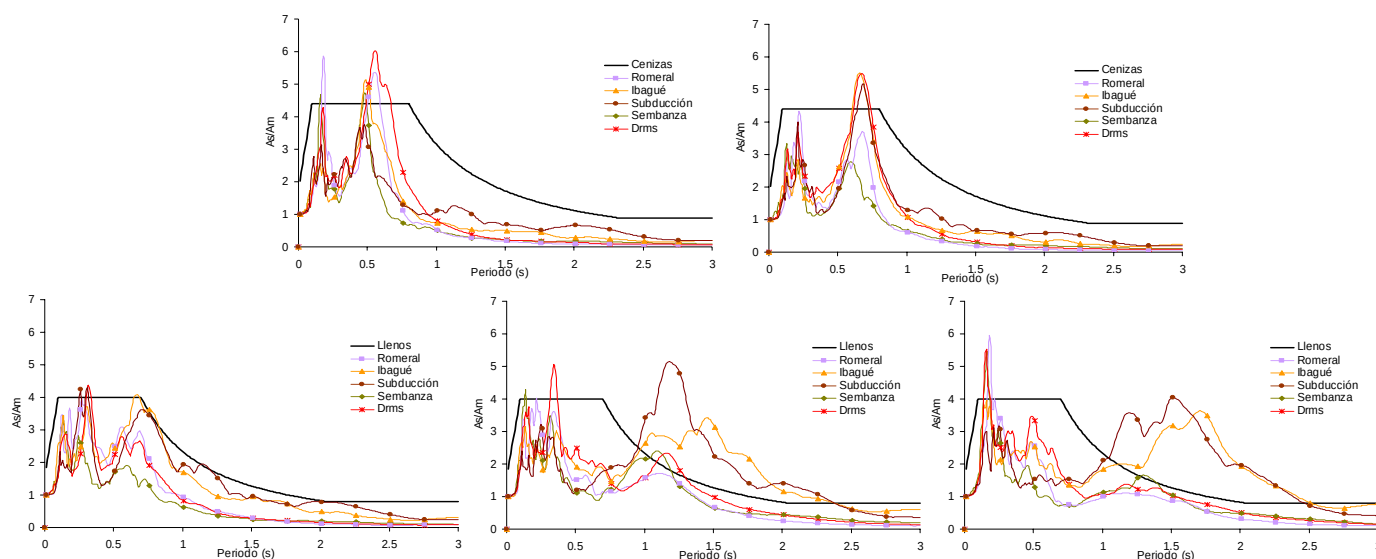


Figura 8: Gráfico comparativo entre el espectro de diseño normalizados definido para CENIZAS y LLENOS en Decreto (1999) con los espectros de respuesta normalizados correspondientes a las envolventes obtenidas para cada escenario sísmico, donde las señales fueron pasadas por los perfiles de suelo: (a) CENIZAS2 y (b) CENIZAS3, parte posterior, (c) LLENOS1, (d) LLENOS2 y (e) LLENOS 3 parte inferior.

En estos gráficos se observan dos picos bien definidos para periodos de 0.2 a 0.3 segundos y de 0.5 a 0.8 segundos, aproximadamente, al ser pasadas por ceniza de origen volcánico y en rellenos antrópicos y naturales se presenta en 0.3 a 0.7 segundos y 1.0 a 1.5 segundos. Si se observa el cuerpo de los espectros, puede apreciarse que el nivel de amenaza arrojado no es posible mitigarlo con el espectro de diseño establecido. Se observa que para periodos cortos, la amenaza está totalmente dominada por la falla Romeral donde el cuerpo de los espectros de respuesta se ubica en un valor de 1.3-1.4g que va desde 0.1 a 0.7 segundos. Para periodos mayores, la amenaza está controlada por las fallas Ibagué y la zona de Subducción. La Figura 8 corresponde a estos mismos espectros pero ya normalizados; allí se hace más evidente el proceso de amplificación que sufren los registros acelerográficos para periodos mencionados anteriormente, donde se ve que el suceso es generalizado en todos los escenarios sísmicos que se tienen definidos. El contenido frecuencia de cada una de las señales escogidas para el análisis puede apreciarse en esta figura, donde se encuentran graficados los espectros de respuesta normalizados con relación a la aceleración máxima del terreno y con un mismo nivel de amortiguamiento, de los registros acelerográficos en estudio.

El gran interrogante que se presenta es que no se conoce a qué profundidad se encuentra la roca. De los diferentes estudios realizados, la mayor perforación efectuada no es mayor a 30 m, en donde se encontró una estructura de saprolito cuya velocidad no es mayor a 400 m/s. La mayoría de los registros seleccionados han sido tomados en roca en donde la velocidad presente se aproxima a los 800 m/s. Se puede atribuir la gran amplificación de los registros a que en las simulaciones realizadas se supuso que la roca se encontraba a esa profundidad, donde las condiciones de sitio presentadas no corresponden al ambiente donde fueron registradas las señales.

CONCLUSIONES

Se estableció que el escenario sísmico que más aporta a la amenaza para la ciudad de Armenia es la falla Romeral, pero tanto la falla Ibagué como la zona de Subducción pueden producir sismos de importancia para la región.

Del proceso de desagregación realizado para la ciudad de Armenia, utilizando los métodos de inversión de curvas e igualación con el EUA, se definieron los pares $M-d$ que más aportan a la amenaza de cada una de las fuentes seleccionadas; para la falla Romeral el escenario sísmico compatible sería un evento de magnitud $6.3 \pm 0.1 M_w$ a una distancia hipocentral de 15 ± 4 km, para la falla Ibagué un evento de magnitud $6.6 \pm 0.1 M_w$ a una distancia hipocentral de 45 ± 5 km y para la zona de Subducción un evento de magnitud $7.7 \pm 0.1 M_w$ a una distancia hipocentral de 170 ± 30 km¹⁵.

¹⁵ Teniendo en cuenta que son valores promedio de los resultados arrojados por las metodologías utilizadas.

Se obtuvo un grupo de registros acelerográficos reales que sirven como entrada para el análisis dinámico de edificaciones, taludes y construcciones no convencionales que se vayan a construir en la ciudad de Armenia, donde se trabajó con diferentes alternativas para tener mejores criterios de selección lo cual le imprime confiabilidad a los resultados obtenidos.

Como resultado de los diferentes análisis y comparaciones realizados a los espectros de respuesta obtenidos en este proyecto con los espectros de diseño establecidos por la Norma de Diseño y Construcción Sismo-Resistente Colombiana NSR-98 y el estudio de microzonificación Decreto (1999), se estableció que presentan algunas falencias respecto a los límites establecidos. Por lo tanto se propone:

- **Cenizas:** Aumentar el valor del S_a entre los periodos T_o a T_c en un 15%, T_c correspondería a 1.0 segundo y el valor de T_l sería el establecido en Decreto (1999).
- **Llenos:** Aumentar el valor del S_a entre los periodos T_o a T_c en un 10%, T_c correspondería a 0.9 segundos y el valor de T_l sería el establecido en Decreto (1999).

Con el proyecto se establece una metodología dirigida a la ejecución de estudios de microzonificación, donde son planteadas diversas alternativas para llevar a cabo cada una de las etapas que se involucran, desde la evaluación de la amenaza sísmica hasta métodos para la selección de las señales.

REFERENCIAS

- Acevedo, A. B. y Bommer, J. J. (2003). "El uso de acelerogramas reales en el análisis y el diseño sismorresistente", *II Congreso de Ingeniería Sísmica*, Colombia.
- AIS-300 (1996). "Estudio general de amenaza sísmica de Colombia", Universidad de los Andes, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Edición 2, 252 pp., INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., y Smit, P. M. (2005). "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 3, Nro. 1, pp. 1-53.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., y Bommer, J. J. (1996). "Prediction of response spectra in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, Nro. 4, pp. 371-400.
- Bardet, J. P., Ichii, K., y Lin, C. H. (2000). *EERA: A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California.
- Bommer, J. J. y Acevedo, A. B. (2004). "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, Special Issue 1, pp. 43-91.
- Bommer, J. J., Douglas, J., y Strasser, F. (2003). "Style-of-faulting in ground-motion prediction equations", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 171-203.
- Bommer, J. J. y Martínez-Pereira, A. (1999). "The effective duration of earthquake strong-motion", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, Nro. 2, pp. 127-172.
- Bommer, J. J., Scott, S. G., y Sarma, S. K. (2000). "Hazard-consistent earthquake scenarios", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, Nro. 4, pp. 219-231.
- Campbell, K. y Thenhaus, P. (2003). *Chapter 8: Seismic Hazard Analysis*, in: *Earthquake Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Castañes, H. y Lomnitz, C. (2002). PSHA: is it science? *Engineering Geology*, Vol. 66, pp.314-317.
- Castilla, R. A., Audermard, F. A., y Rodríguez, J. A. (2002). "Ensayos de cálculo de amenaza sísmica por método determinista en triángulo de fallas Valera-Boconó-Oca en el occidente de Venezuela", *Primer Simposio Colombiano de Sismología*, Bogotá, Colombia.
- Cruz, V. M. (2000). *Inversión global con algoritmos genéticos y cristalización simulada, aplicada a funciones de receptor: Modelos estructurales de velocidades para la corteza en la República Mexicana*, Proyecto de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., pp. 215.
- Decreto (1999). Decreto 1023, por el cual se adopta la zonificación sísmica y se reglamentan las secciones a.2.4 y a.2.6 del decreto 33 de 1998-NSR-98 para las zonas determinadas en el mapa denominado 'Zonificación sísmica de la ciudad de Armenia'. Microzonificación Sísmica de la ciudad de Armenia.
- Der Kiureghian, A. D. (1975). "A line source model for seismic risk analysis", University of Illinois at Urbana-Champaign, Technical Report Series N419.

- Der Kiureghian, A. D. y Ang, A. H.-S. (1977). "A fault-rupture model for seismic risk analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 67, pp. 1173-1194.
- Donovan, N. C. (1974). "A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1971, San Fernando earthquake", *Proceedings of the Fifth World Conference of Earthquake Engineering*, Rome, Italy, Paper 155, Vol. 1, pp. 1252-1261.
- García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Pacheco, J. F., y Ordaz, M. (2004). "In slab earthquake of central Mexico: Q, source spectra, and stress drop", *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 94, Nro. 3, pp. 789-802.
- Guzmán, J., Franco, G., y Ochoa, M. (1998). "Proyecto para la mitigación del riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Evaluación geotectónica", Informe Ejecutivo, Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Hanks, T. C. y Kanamori, H. (1979). "A moment magnitude scale", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, pp. 2348-2350.
- INGEOMINAS (1999). "Terremoto del Quindío (enero 25 de 1999)", Informe técnico-científico. Volumen II: Zonificación sismogeotécnica indicativa para la reconstrucción de Armenia, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1986). "On simulating large earthquakes by Green's function addition of smaller earthquakes", *37 Geophysical Monograph of the America Geophysical Union*, Washington, D.C.
- Krinitzsky, E. L. (1995). "Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures", *Engineering Geology*, Vol. 40. Nro. 1-2, pp. 1-7.
- Krinitzsky, E. L. (2002). "How to obtain earthquake ground motions for engineering design", *Engineering Geology*, Vol. 65, Nro. 1, pp. 1-16.
- Martínez-Pereira, A., Alvarado, C., y Rubiano, D. (2002). "Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: Casos aplicados en Colombia", INGEOMINAS, Colombia.
- McGuire, R. K. (1974). "Seismic structural response risk analysis, incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance", Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute Technology, Research Repot. R74-51, 371 pp., Cambridge, Massachusetts.
- McGuire, R. K. (1976). *FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*, US Geological Survey, Open-File Report 76-67, 90 pp.
- McGuire, R. K. (1977). "Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, pp. 211-234.
- Monsalve, H., Cano, L., Espinosa, A., Rubiano, D., Paris, G., y Guzmán, J. (1999). "Estudio de la amenaza sísmica en los 26 municipios del Eje Cafetero, afectados por el sismo de 25 de enero de 1999", Convenio INGEOMINAS-CRQ-Universidad del Quindío.
- Ordaz, M., Arboleda, J., y Singh, S. (1993). "Un nuevo método para simular acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green empíricas", *X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puerto Vallarta, México, pp. 28-35.
- Ordaz, M., Arboleda, J., y Singh, S. (1995). "A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, Nro. 6, pp. 1635-1647.
- Papazachos, B. C., Papaiounnou, C. A., Margaris, V. N., y Theodulidis, N. P. (1992). "Seismic hazard assessment of Greece based on strong motion duration", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, Vol. 1, pp. 425-430.
- Romeo, R. y Prestininzi, A. (2000). Probabilistic versus deterministic hazard analysis: an integrated approach for siting problems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 20, No. 1-4, pp. 75-84.
- Sarma, S. K. y Srbulov, M. (1981). "A uniform estimation of some basic ground motion parameters", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 267-287.
- UniAndes (1999). Estudio de microzonificación sísmica para orientar la reconstrucción de Armenia-Quindío. Agencia para el Desarrollo Internacional USAID, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Universidad de los Andes, Universidad del Quindío, Corporación regional del Quindío, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Upegui, F. M. (2006). "Generación de espectros de respuesta para la ciudad de Armenia con señales obtenidas sintéticamente a partir de funciones empíricas de fase y funciones empíricas de Green" (en proceso), Programa jóvenes investigadores e innovadores, Colciencias.
- Wennerberg, L. (1990). "Stochastic summation of empirical Green's functions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, Nro. 6A, pp. 1418-1432.

