



Libertad y Orden

**INSTITUTO COLOMBIANO DE
GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**



**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE
DAGMA**

**INGEOMINAS
SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y
ENTORNO AMBIENTAL**

***ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
DE SANTIAGO DE CALI***

Convenio No.02 de 2002

SUBPROYECTO DE SISMOTECTÓNICA

***Informe No.1-9
Evaluación de la Amenaza Sísmica Regional
en Santiago de Cali***

Bogotá, Diciembre de 2005

**República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS**



JULIAN VILLARRUEL TORO
DIRECTOR GENERAL INGEOMINAS

INES F. CAICEDO HERNANDEZ
DIRECTORA DAGMA

ALBERTO NUÑEZ TELLO, DIRECTOR TECNICO SERVICIO GEOLOGICO, INGEOMINAS
MARTA L. CALVACHE VELASCO, SUBDIRECTORA AMENAZAS GEOLOGICAS, INGEOMINAS
CARLOS E. ALVARADO FLOREZ, JEFE DE PROYECTO, INGEOMINAS

GRUPO TECNICO CONSORCIO SISMICO

ANIBAL OJEDA
JORGE PEREZ

Apoyo Técnico: Cristina Dimaté, Jaime Romero, Carlos Alvarado, INGEOMINAS

EDICION FINAL, INGEOMINAS

ANA I. ALVARADO
ROSA DAZA



TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.2. ASPECTOS METODOLÓGICOS CONSIDERADOS	2
1.2.1 Caracterización sismotectónica.....	2
1.2.2. Espectro Uniforme de Amenaza.....	2
1.2.3. Desagregación y Escenarios Sísmicos	2
1.2.4 Señales para Evaluación de la Respuesta Sísmica.....	4
CAPITULO 2	5
ECUACIONES DE ATENUACIÓN	5
2.1.ECUACIÓN DE ATENUACIÓN COLOMBIA.....	5
2.2.ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE AMBRASEYS.....	5
2.3 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE BOORE	6
2.4 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE SADIGH	6
2.5 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE CAMPBELL	6
2.6 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE YOUNGS.....	7
2.7 MAPAS DE ACELERACIÓN (PGA)	7
CAPITULO 3	10
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	10
3.1 GEOMETRÍA DE LAS FUENTES SÍSMICAS	12
3.2 EVALUACIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN	14
3.3 COMPARACIÓN DE AMBIENTES TECTÓNICOS	14
3.4 COMPARACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS CORTICALES	16
3.5 COMPARACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIAL.....	16
CAPITULO 4	18
DESAGREGACIÓN Y FAMILIAS DE ACELEROGRAMAS	18
4.1 DESAGREGACIÓN PARA TODAS LAS FUENTES	18
4.2 DESAGREGACIÓN PARA LAS FUENTES CORTICALES	18
4.3 CONTRIBUCIÓN A LA AMENAZA SÍSMICA POR FUENTES.....	18
4.4 SEÑALES PARA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA	22
4.5 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES CORTICALES.....	22
4.6 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES DE SUBDUCCIÓN PROFUNDA.....	23
4.7 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIAL	24
CAPITULO 5	26
CONCLUSIONES	26
CAPITULO 6	28
BIBLIOGRAFÍA	28



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Uniforme de Amenaza (EUA), Tomado de Bommer y otros 2000.	3
Figura 2a. Mapa de aceleración para la ecuación de atenuación de Ambraseys.	8
Figura 2b. Mapas de aceleración para la ecuación de atención de Colombia y la ecuación de atenuación de Boore.	9
Figura 2c. Mapas de aceleración para la ecuación de atenuación de Campbell y la ecuación de atenuación de Sadigh.	9
Figura 3. Evaluación de A0 para incrementos y disminuciones de 25%, 20% y 10%.	11
Figura 4 Comparación con A0 – tectónico con el valor de A0 de referencia.	11
Figura 5. Evaluación del b-value para el rango de incertidumbre.	12
Figura 6. Evaluación de la magnitud máxima probable a partir del rango de incertidumbre.	13
Figura 7. Comparación A0 b-value y M, evaluados en el análisis de sensibilidad.	13
Figura 8. Comparación de las fuentes usando buzamiento de las estructuras corticales.	14
Figura 9. Comparación de los diferentes modelos de atenuación.	15
Figura 10. Comparación de diferentes fuentes sísmicas.	15
Figura 11. Comparación de fuentes continentales.	17
Figura 12. Comparación de fuentes sísmicas asociadas a la subducción.	17
Figura 13. Desagregación de la amenaza en función de la distancia y la magnitud.	19
Figura 14. Desagregación de la amenaza sísmica en función de la distancia y la magnitud.	20
Figura 15. Tasa de excedencia para las fuentes sísmicas que más contribuyen a la amenaza.	21

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes sismogénicas que más contribuyen al nivel de amenaza sísmica en la ciudad de Cali.	22
Tabla 2. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes corticales.	23
Tabla 3. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes de subducción profunda.	24
Tabla 4. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes de subducción superficial.	25

ANEXOS

Anexo 1	Modelo Sismotectónico Regional para Evaluación de la Amenaza Sísmica
Anexo 2	Señales de Diseño seleccionadas



CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, INGEOMINAS, UNIANDÉS, 1996), situó a la ciudad de Santiago de Cali en una zona de amenaza sísmica alta con $A_a = 0.25 g$, ($g = 9.81 \text{ m/seg}^2$). Dicho estudio es la base fundamental de las actuales Normas Sismo Resistentes a nivel nacional NSR98 (AIS, 1997; Ley 400 de 1997 - Decreto 33 de 1998), que en su Título A.2.9 recomienda los aspectos mínimos a considerar en los estudios de microzonificación sísmica que se emprendan.

Con base en lo anterior y dentro del marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cali (MZSCali), a través de Convenio con el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) y bajo el desarrollo técnico del INGEOMINAS, se presenta en este informe la Evaluación de la Amenaza Sísmica Regional para la ciudad de Cali.

Para el cálculo de la amenaza sísmica regional se usó el análisis de tipo probabilístico. Se utilizaron varias ecuaciones de atenuación, entre ellas Ambraseys (1996), Boore (1997), Campbell (1997), Sadigh (1997), Youngs (1997), así como una ecuación de atenuación desarrollada en los últimos años específica para Colombia. Se probaron varios modelos y se evaluaron todos los parámetros que intervienen en el cálculo de la amenaza sísmica. Se calculó la desagregación de la amenaza sísmica para evaluar el impacto sobre la ciudad de las diferentes fuentes generadoras de sismos, obteniendo el PGA (Peak Ground Acceleration) para la ciudad a nivel de roca y definiendo los ambientes o escenarios que controlan la amenaza sísmica en función de rangos de distancia y magnitud, entre otros aspectos. Finalmente se seleccionaron los acelerogramas o señales de diseño a considerar en los modelos de respuesta sísmica local del suelo en la ciudad.

1.1. OBJETIVOS

- Evaluar la amenaza sísmica regional en Santiago de Cali a partir del modelo sismotectónico regional establecido, incorporándole las ecuaciones de atenuación más convenientes de acuerdo al conocimiento del área de estudio, y considerando los parámetros de recurrencia y actividad sísmica calculados para cada una de las fuentes que intervienen directamente en el modelo. En este orden de ideas, los parámetros del modelo para el cálculo de la amenaza sísmica, incluirán sus niveles de incertidumbre con el fin de determinar los rangos dentro de los que pueden variar los resultados de la evaluación de la amenaza.
- Obtener señales de diseño a través de un proceso de desagregación de la amenaza, definiendo parejas magnitud-distancia (M-R) representativas de los escenarios que más contribuyen a la amenaza sísmica regional para la ciudad.

1.2. ASPECTOS METODOLÓGICOS CONSIDERADOS

La metodología para el análisis probabilístico de la amenaza sísmica ha sido descrita previamente (ver informe No.1.8, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Para el cálculo de la amenaza sísmica probabilística se toman en cuenta los aspectos que se describen a continuación.

1.2.1 Caracterización sismotectónica

Para la evaluación de la amenaza sísmica regional de Santiago de Cali se requiere de información relevante a las fuentes sísmicas, la cual proviene de un modelo sismotectónico, determinado por la geometría de las fuentes y sus respectivas características que son el sitio de ocurrencia, el tamaño, y la frecuencia de futuros sismos que puedan generar aceleraciones significativas en el área de estudio (Anexo 1). Lo anterior ha sido abordado por el proyecto durante el desarrollo de las investigaciones neotectónicas y sismológicas regionales (ver informe No.1.8, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005).

1.2.2. Espectro Uniforme de Amenaza

Los espectros uniforme de amenaza (EUA), fueron presentados por primera vez por Trifunac y Lee (1987) con el objetivo de mejorar los criterios de diseños utilizados en ese entonces. Los EUA son calculados de la misma manera que se calculan los ya tradicionales valores de aceleración máxima esperada (Aa), lo único adicional que se necesita son ecuaciones de atenuación para diferentes ordenadas espectrales, las cuales (ecuaciones de atenuación espectrales) hoy en día son muy comunes, la idea es que para cada periodo de respuesta que se deseé, se realicen evaluaciones independientes de la amenaza sísmica, donde todas las ordenadas del espectro tienen la misma probabilidad de excedencia, de hecho esta es la única condición que cumple un EUA.

Hoy en día los EUA son ampliamente utilizados como resultados de análisis de amenaza sísmica probabilísticas, sin embargo, como es de esperarse no corresponden a la ocurrencia de un solo sismo, de hecho son el producto de diferentes e independientes análisis de amenaza. En la **Figura 1** se presenta un ejemplo de un EUA, el cual para los periodos cortos (menor a 0.3 seg) está dominado por la ocurrencia de un sismo local, y el mismo EUA para periodos intermedios y largos esta controlado por la ocurrencia de un sismo más lejano.

1.2.3. Desagregación y Escenarios Sísmicos

Como es bien conocido los resultados de un estudio de amenaza sísmica probabilística, incluyen la interacción simultánea de muchos eventos a diferentes distancias, esto conlleva a que los resultados obtenidos correspondan a la agregación de la amenaza potencial de las diferentes fuentes incluidas en el análisis, por lo tanto, los resultados obtenidos a través de un análisis probabilístico de amenaza no están asociados con una magnitud particular y distancia de ocurrencia de un sismo, sin embargo, para fines de estudios de microzonificación sísmica resulta muy útil determinar que combinación de magnitud y distancia controlan el escenario de amenaza sísmica de un lugar en particular, pues esto permite seleccionar y generar señales sísmicas que sean consistentes con el escenario de

amenaza, para después ser utilizadas en la evaluación de la respuesta sísmica local en diferentes sitios de la ciudad.

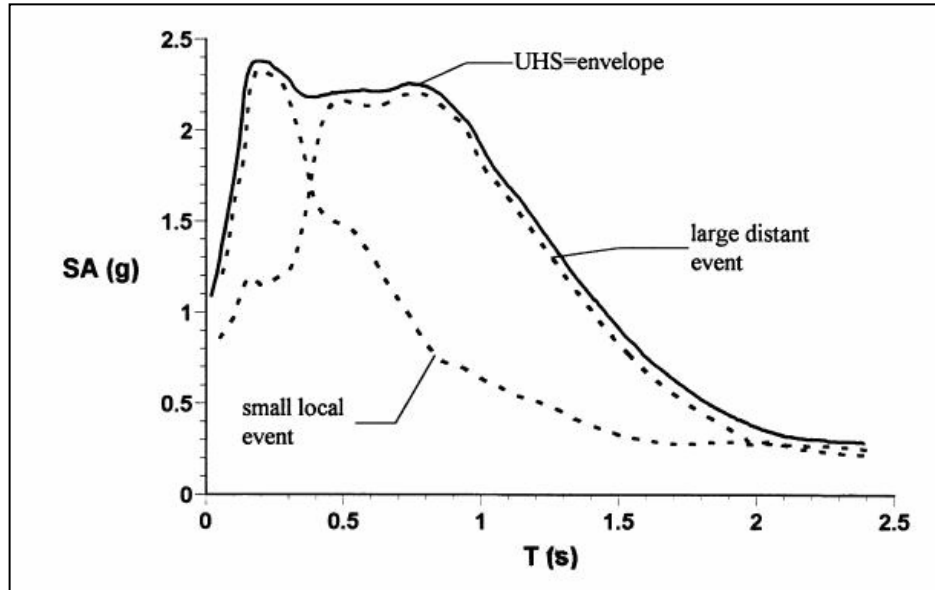


Figura 1. Espectro Uniforme de Amenaza (EUA), Tomado de Bommer y otros 2000.

El proceso por el cual se estima la amenaza sísmica en función de la magnitud y la distancia, es conocido como desagregación, y se expresa mediante las siguientes relaciones:

En la ecuación 1 la tasa anual de excedencia es expresada en función de la magnitud, y de manera similar en la ecuación 2, la tasa anual de excedencia es expresada en función de la distancia, y en la ecuación 3 la tasa anual de excedencia se presenta como función de la magnitud y la distancia.

Para el Proyecto MZSCali, una vez se ha calculado el EUA para la ciudad, se procede a un análisis de desagregación, de manera que se puedan determinar las parejas magnitud - distancia (parejas M-R), que están controlando la amenaza sísmica de la ciudad, estas mismas parejas M-R, corresponderían a los escenarios sísmicos consistentes con el nivel de amenaza.

Ecuación 1. Tasa anual de excedencia en función de magnitud

$$\lambda_{y,*}(m_j) \approx P[M = m_j] \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_r} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[R = r_k]$$

Ecuación 2. Tasa anual de excedencia en función de distancia

$$\lambda_{y^*}(r_k) \approx P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_r} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[M = m_j]$$

Ecuación 3. Tasa anual de excedencia en función de magnitud y distancia

$$\lambda_{y^*}(m_j, r_k) \approx P[M = m_j] P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_s} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k]$$

1.2.4 Señales para Evaluación de la Respuesta Sísmica

Una vez se han determinado los escenarios de amenaza sísmica consistentes, parejas M-R, se procede a la selección de señales sísmicas que logren representar de manera homogénea los diferentes escenarios identificados de interés. Tales señales representan la excitación dinámica de entrada en los diferentes modelos de respuesta local del subsuelo en la ciudad.

CAPITULO 2

ECUACIONES DE ATENUACIÓN

En el presente trabajo se realizaron ensayos con diferentes ecuaciones de atenuación, especialmente con aquellas que se ajustan mejor a la tectónica de la región de estudio, y que son reconocidas a nivel mundial. En este caso, se tomaron las ecuaciones de atenuación de Ambraseys (1996), Boore (1997), Sadigh (1997), Campbell (1997), Youngs (1997). Se desarrolló una ecuación que corresponde a estudios y datos para Colombia, basada en las modelaciones de los sismos de Armenia, Murindó, Paez, Tauramena, y Tumaco.

2.1. ECUACIÓN DE ATENUACIÓN COLOMBIA

Esta ecuación de atenuación, toma información registrada por la Red Nacional de Acelerógrafos (RNAC, INGEOMINAS) de sismos ocurridos en Colombia, específicamente del sismo de Armenia, Murindó, Paez, Tauramena y Tumaco. Para obtener este modelo, se estimó el movimiento del terreno de la falla cercana usando la técnica de simulación híbrida de banda ancha (0.1 a 10 Hz), la cual combina modelamiento determinístico de propagación de onda para baja frecuencias con una técnica semiestocástica para las altas frecuencias. La idea es evaluar el movimiento fuerte del suelo radiado de una fuente finita, con modelo fuente de multi-aspereza. El movimiento del suelo total radiado por cada aspereza se obtiene sumando las ondas de baja frecuencia y alta frecuencia en el dominio del tiempo (Pulido et al., 2004).

$$\log_{10}(PSA) = C_1 + C_2(M - 6) + C_3(M - 6)^2 + C_4 \log_{10} R + C_5 R,$$

Donde $\log_{10}(PSA)$ se da en g, M es magnitud de momento y R es la distancia a media a la fuente.

2.2. ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE AMBRASEYS

Esta ecuación de atenuación es ampliamente usada en Europa, Medio Oriente y Norteamérica, el límite inferior es $M_s = 4.0$, profundidad focal menor a 30 Km. Para la estimación de esta ecuación se utilizaron 416 registros acelerográficos principalmente de Europa (Ambraseys et al., 1996 en Douglas, 2000).

$$\log y = C_1' + C_2 M + C_4 \log r + C_A S_A + C_S S_S,$$

$$\text{Donde } r = \sqrt{d^2 + h_0^2},$$

Donde y se da en g, y

$$C_1' = -1.48, C_2 = 0.266, C_4 = -0.922, C_A = 0.117, C_S = 0.124, h_0 = 3.5, \sigma = 0.25$$

2.3 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE BOORE

Boore para obtener esta ecuación resume los trabajos recientes realizados, para la obtención del espectro de respuesta horizontal y aceleraciones pico para sismos superficiales en el oeste de Norteamérica y California, presenta la ecuación de movimiento del terreno en función de magnitud de momento, distancia y condiciones de sitio para sismos con mecanismo de rumbo, inverso e indeterminados. La ecuación se usa para $5.5 \leq M_w \leq 7.5$ (Boore et al., 1997).

$$\log Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln \frac{V_s}{V_A}$$

Donde $r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2}$, y

$$b1 = \begin{cases} b_{1SS} \rightarrow \text{STRIKE} - \text{SLIP} \\ b_{1RS} \rightarrow \text{REVERSE} - \text{SLIP} \\ b_{1ALL} \rightarrow \text{NO} - \text{ESPECIFICADO} \end{cases}$$

En esta ecuación Y es la aceleración pico en g, M es la magnitud de momento, distancia r_{jb} en Km., y el promedio de velocidad de onda de cizalla a 30m V_s en m/s. Esta ecuación fue calculada para períodos de 0.1 a 2.0 s.

2.4 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE SADIGH

Esta ecuación de atenuación se presenta para aceleraciones pico de sismos superficiales corticales, se basa en registros de movimiento fuerte de California, los cuales tienen mecanismos de rumbo e inverso, registrados en suelos consolidados profundos y roca. Los registros estudiados corresponden a sismos con $4.0 \leq M < 8.0$, y distancias mayores a 100 Km (Sadigh et al., 1997).

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6 M)) + C_7 \ln(r_{rup} + 2)$$

Esta relación de atenuación refleja un amplio rango de magnitudes, $4.0 \leq M < 8.0$ +

2.5 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE CAMPBELL

Esta relación de atenuación es apropiada para predecir amplitudes de movimiento fuerte de sismos en cualquier parte del mundo con $M_w \geq 5.0$, en regiones tectónicamente activas. Para este modelo se tomaron registros sísmicos de varios escenarios a nivel mundial. Esta ecuación es el resultado de la combinación de estudios anteriores del mismo autor maximizando las fortalezas y minimizando las debilidades de cada una de las ecuaciones obtenidas con anterioridad (Campbell, 1997).

$$\ln(A_V) = \ln(A_H) - 1.58 - 0.10M - 1.5 \ln[R_{SEIS} + 0.079 \exp(0.661M)] \\ + 1.89 \ln[R_{SEIS} + 0.361 \exp(0.576M)] - 0.11F + \varepsilon$$

En donde A_V está en unidades de g, A_H es la media de los componentes horizontales de PGA. El error estándar está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Para } A_V, \sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 0.36^2}$$

Donde σ , es el error estándar estimado para $\ln(A_H)$

2.6 ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE YOUNGS

Esta ecuación de atenuación está dada para sismos de interface e intraplaca en zona de subducción, con $M_w \geq 5.0$ y para distancias de $10 \leq r \leq 500$ Km. Los sismos de interface tienen profundidad focal menor a 50 Km, en contraste, los sismos intraplaca se presentan a una profundidad mayor a 50 Km. La mayor cantidad de datos para interface son tomados de Japón, una gran parte de los eventos registrados en roca corresponden a tres grandes sismos registrados por la Red de Acelerógrafos de Guerrero (México), el evento de Petrolia (California) se tomó como sismo en interface (Youngs et al., 1997).

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T$$

En donde y es la aceleración espectral en g, M es la magnitud de momento, r_{rup} es la distancia más cercana a la ruptura en Km, H es la profundidad en Km, Z_T es el tipo de fuente.

La desviación estándar es: $stdev = C_4 + C_5M$

2.7 MAPAS DE ACELERACIÓN (PGA)

Para el presente estudio, se realizaron cálculos de amenaza bajo diferentes modelos, teniendo en cuenta las diferentes ecuaciones de atenuación acorde a las fuentes sísmicas definidas en el modelo sismotectónico.

Los modelos de amenaza que se utilizaron están compuestos por diferentes ecuaciones de atenuación, para las fuentes corticales se usan las ecuaciones de atenuación de Ambraseys, Campbell, Sadigh, Colombia y Boore; para las fuentes asociadas a la subducción se usan dos variantes de la ecuación de atenuación de Youngs, una para las fuentes de subducción superficiales y la otra para la fuente de subducción profunda. En resumen, se toman cinco modelos diferentes, cada uno con tres ecuaciones de atenuación, una para las fuentes corticales y dos para las fuentes de subducción. Las comparaciones que se presentan se dan de acuerdo a la información obtenida de los diferentes ensayos realizados, de los cuales, se tomó la información correspondiente al PGA para cada punto seleccionado de la ciudad de Santiago de Cali. Para los ensayos realizados se tiene un valor de aceleración

alrededor de 200 cm/seg^2 . En la **Figura 2** se presentan los mapas de PGA para los diferentes modelos de atenuación para un período de retorno de 475 años.

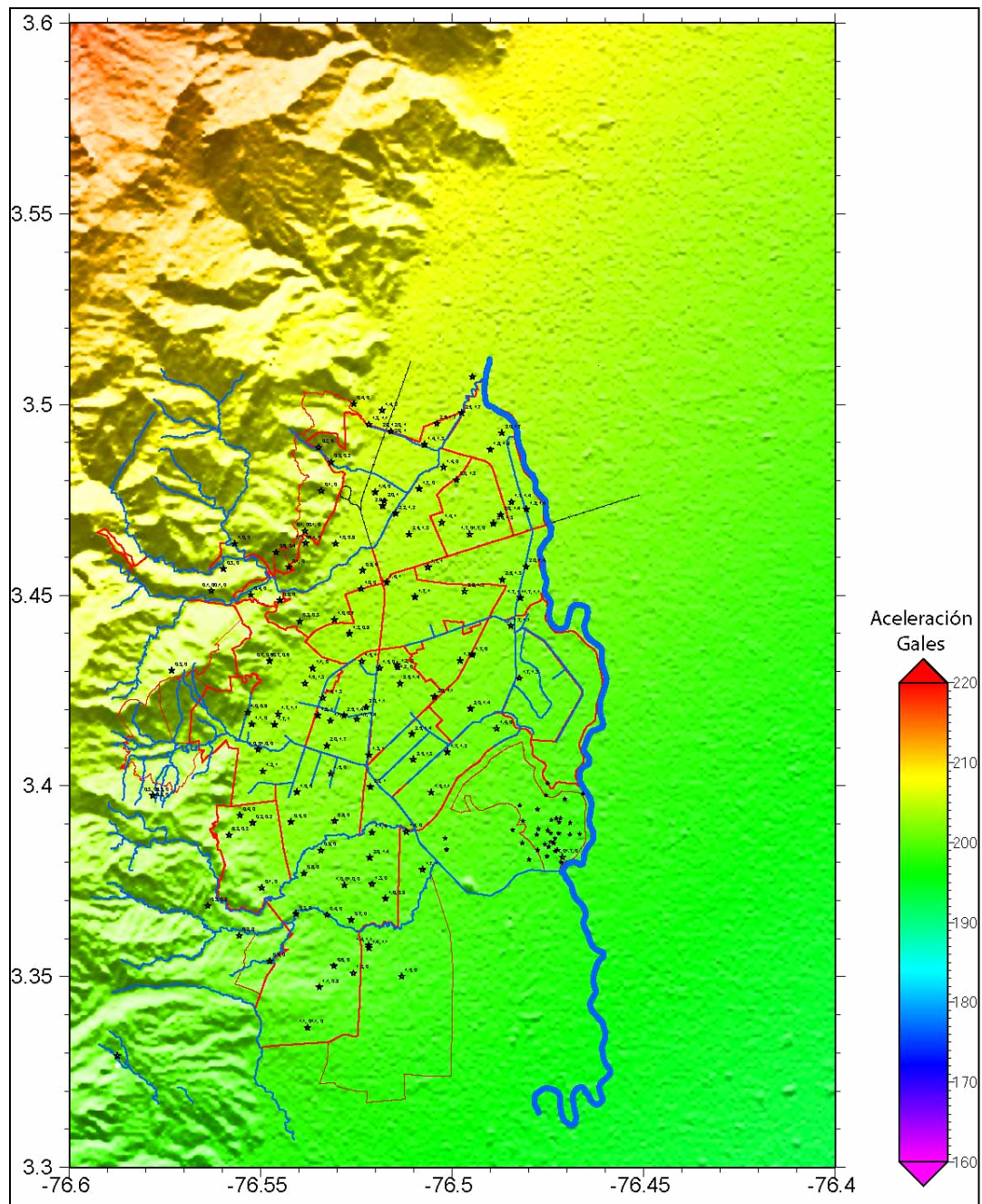


Figura 2a. Mapa de aceleración para la ecuación de atenuación de Ambraseys.

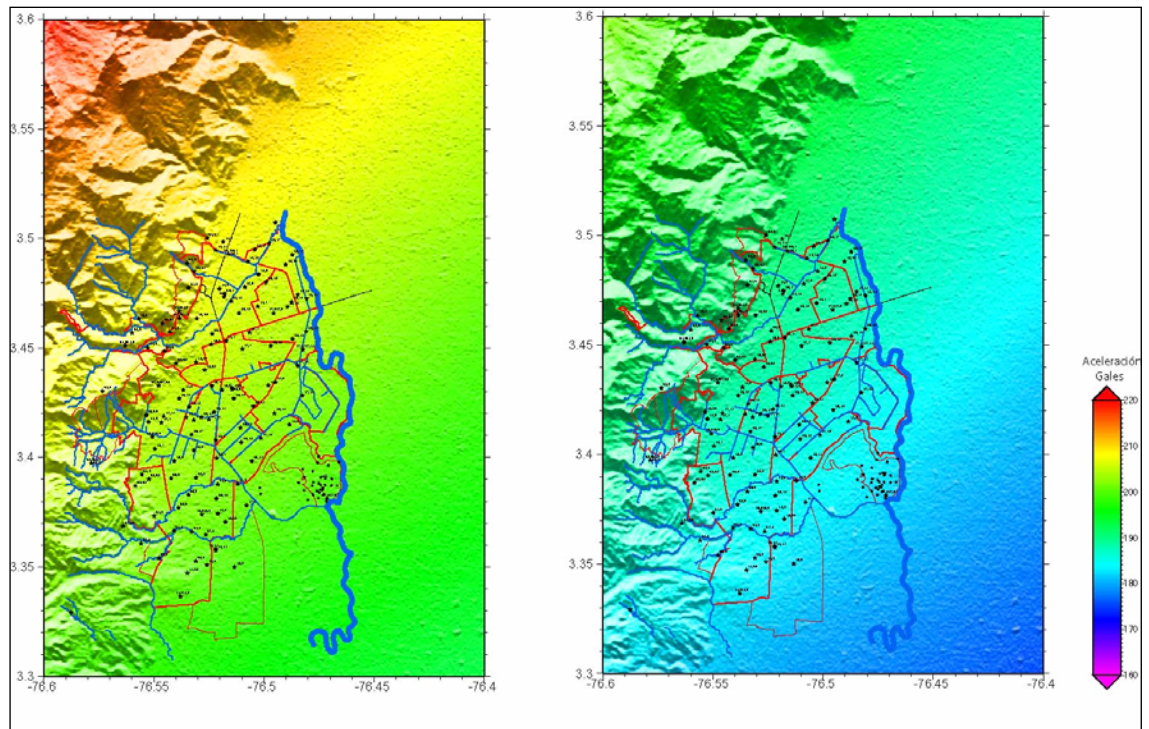


Figura 2b. Mapas de aceleración para la ecuación de atención de Colombia y la ecuación de atenuación de Boore.

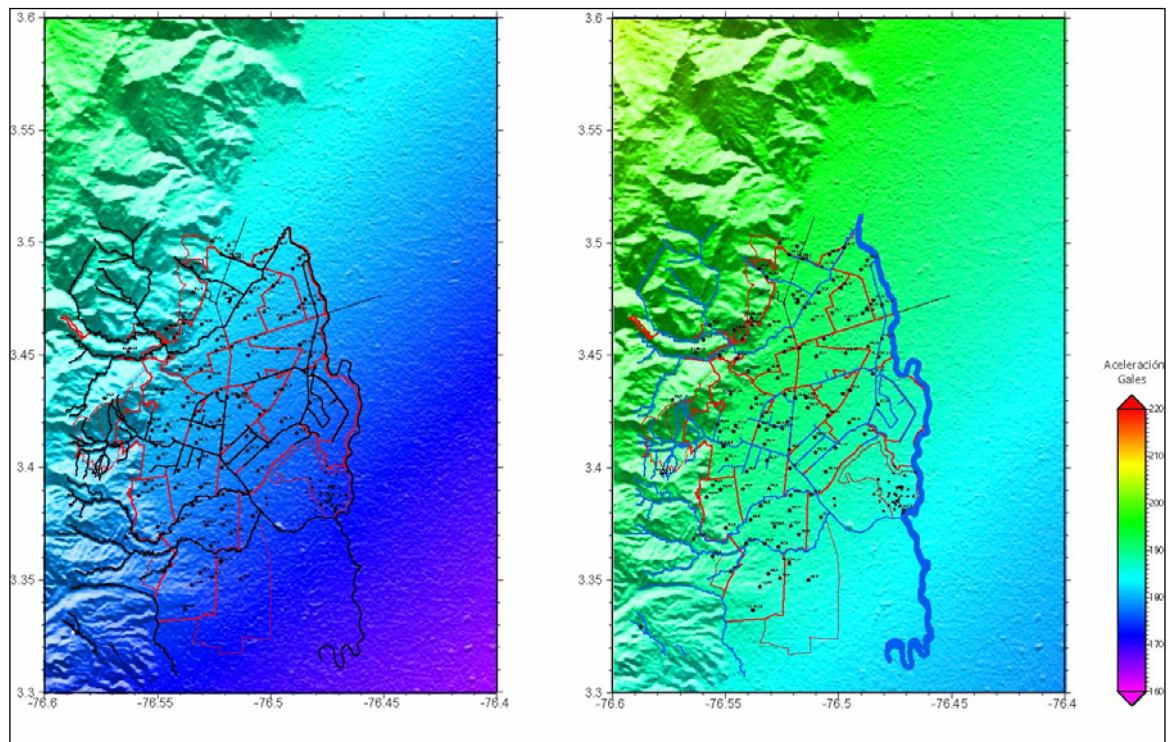


Figura 2c. Mapas de aceleración para la ecuación de atenuación de Campbell y la ecuación de atenuación de Sadigh.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este análisis trata de la sensibilidad del modelo para el cálculo probabilístico de la amenaza sísmica para la ciudad, involucrando la estimación previa de los parámetros de tasa sísmica de cada una de las fuentes. Los EUA con los que se comparan estos parámetros corresponden al punto de referencia de la ciudad de Santiago de Cali, ubicado en las coordenadas 76.50° Longitud W y 3.45° Latitud N.

La evaluación de los parámetros consiste en modificar el valor de cada uno, de forma sistemática, de acuerdo a incertidumbres obtenidas durante los cálculos propios de cada parámetro, seguido se realiza el cálculo de amenaza sísmica con el modelo de atenuación de Ambraseys, definido anteriormente, y se obtienen las aceleraciones para el punto de referencia. Los datos obtenidos se grafican para compararlos con los datos originales.

Las incertidumbres asociadas a los parámetros de las fuentes sísmicas, están sujetas a la interpretación de los datos disponibles, a la aleatoriedad del fenómeno sísmico, el imperfecto conocimiento del fenómeno, falta de datos, o con disponibilidad de múltiples modelos alternativos o de tipos de datos.

El modelo de atenuación de Ambraseys se tomó como el modelo base para el cálculo de la amenaza sísmica de la ciudad de Santiago de Cali, ya que es un modelo que involucra un amplio espectro de elementos tectónicos presentes en Europa. Esta ecuación de atenuación es ampliamente utilizada a nivel mundial. La información generada con este modelo arroja valores medios de aceleración en comparación con los demás modelos tratados en este estudio.

Los gráficos del Espectro Uniforme de Amenaza con los que se comparan los parámetros de fuentes sísmicas, muestran el EUA original para el punto de interés y los EUA calculados con los diferentes valores para un mismo parámetro.

A0: Este parámetro representa la tasa media anual de ocurrencia (ver informe No.1.8, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Para este parámetro se toman incertidumbres de $\pm 25\%$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$ y un valor obtenido por medio de análisis neotectónico que se denomina A0-Tec. Los espectros recalculados de la **Figura 3** son simétricos con respecto al espectro original (negro). El espectro de la **Figura 4** muestra la variación del espectro de amenaza en base al uso del A0-Tec, que fue obtenido por medio de estudios neotectónicos.

B-value: El parámetro b es la pendiente en la relación de Gutenberg-Richter que representa el régimen sísmico en una región (ver informe No.1.8, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Para la evaluación de la sensibilidad del modelo de cálculo de amenaza por este parámetro se elaboraron tablas con b-value aleatorio, se tomaron estos valores y se realizaron cálculos de amenaza para tres grupos de valores distintos. Los espectros calculados de la **Figura 5**, muestran una respuesta bastante homogénea con

respecto al cambio en el valor del parámetro evaluado, se ven dos tendencias, una, es el aumento en el valor de la aceleración y la otra es una leve disminución en los valores de aceleración.

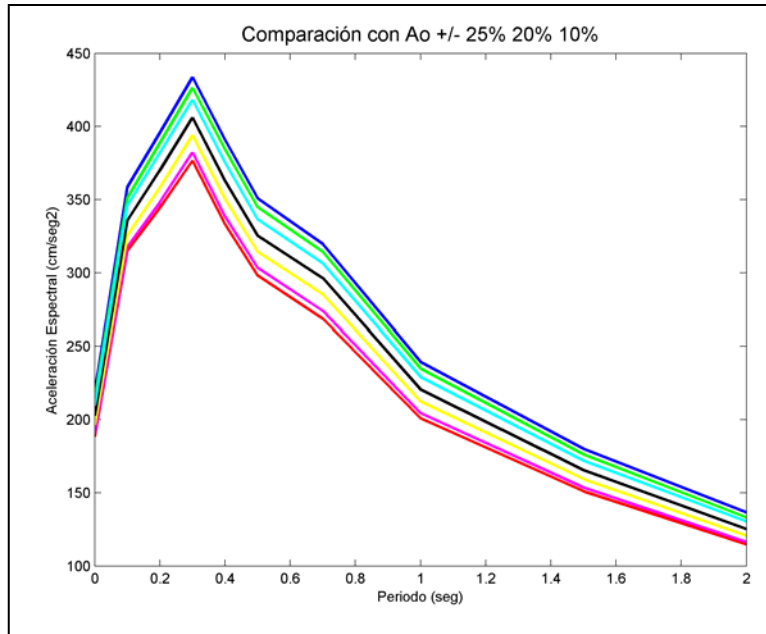


Figura 3. Evaluación de A0 para incrementos y disminuciones de 25%, 20% y 10%.

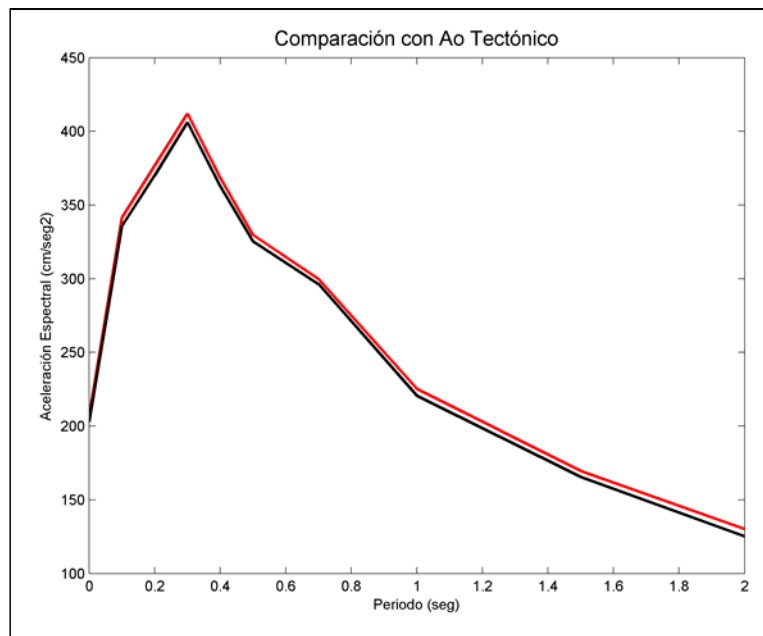


Figura 4 Comparación con A0 – tectónico con el valor de A0 de referencia.

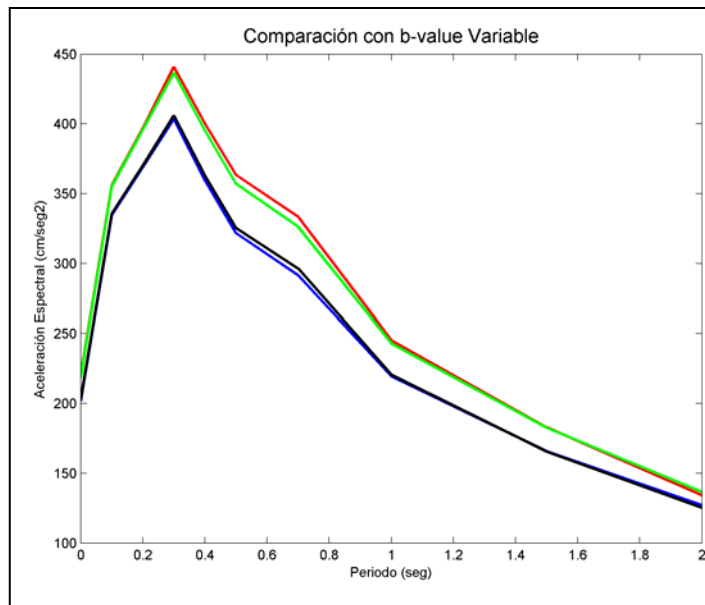


Figura 5. Evaluación del b-value para el rango de incertidumbre.

Magnitud máxima (Mmax): Este parámetro representa el sismo más grande que cada una de las fuentes es capaz de generar, con una incertidumbre estimada de ± 0.2 . Para la evaluación de la sensibilidad del modelo de cálculo de amenaza sísmica, se realizaron dos ensayos adicionales variando el valor de la magnitud de acuerdo al margen de error propuesto (ver informe No.1.8, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Se observa una variación simétrica en los espectros de aceleración (**Figura 6**).

En la **Figura 7** se visualizan los tres parámetros evaluados, A0, b-value y Mmax, con sus respectivas variaciones de acuerdo a las incertidumbres.

3.1 GEOMETRÍA DE LAS FUENTES SÍSMICAS

Adicionalmente a la evaluación de los modelos por la incertidumbre de los diferentes parámetros de caracterización de las fuentes sísmicas, es necesario saber que influencia tiene la geometría de las fuentes en la contribución a la amenaza sísmica, en este caso, se incluyó el buzamiento de las fallas que corresponden a las fuentes corticales.

En la **Figura 8** se ilustran los espectros de aceleración correspondientes a la amenaza sísmica calculada para todas las fuentes con la geometría establecida originalmente (línea negra), y el espectro de aceleración correspondiente a las fuentes con la geometría que incluye el buzamiento de algunas estructuras. Como se aprecia en el gráfico, la variación en el espectro no es muy significativa.

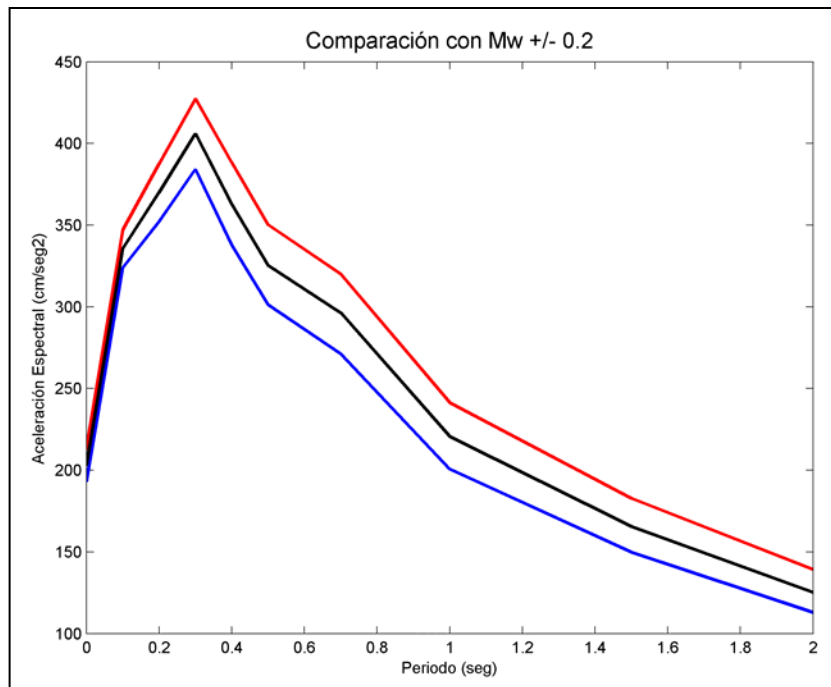


Figura 6. Evaluación de la magnitud máxima probable a partir del rango de incertidumbre.

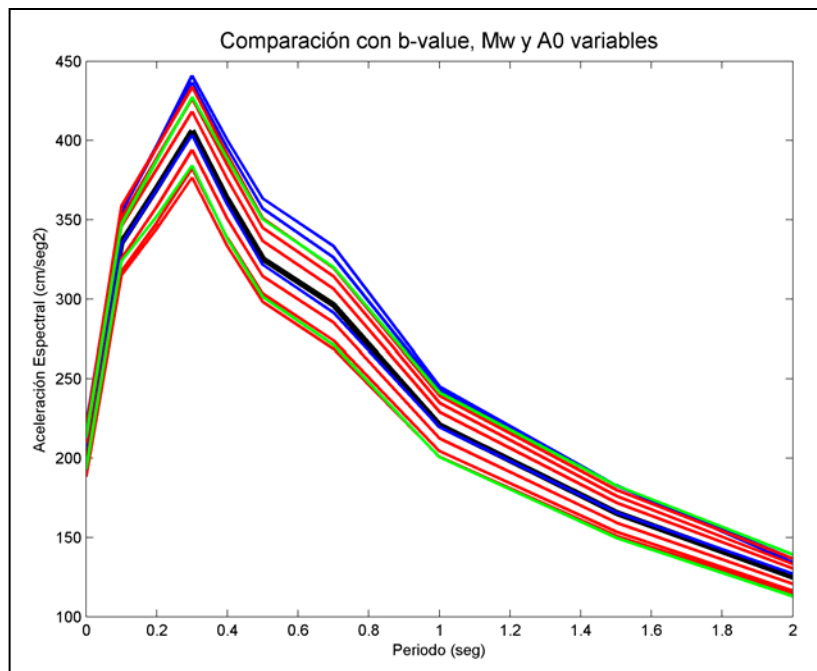


Figura 7. Comparación A_0 b-value y M, evaluados en el análisis de sensibilidad.

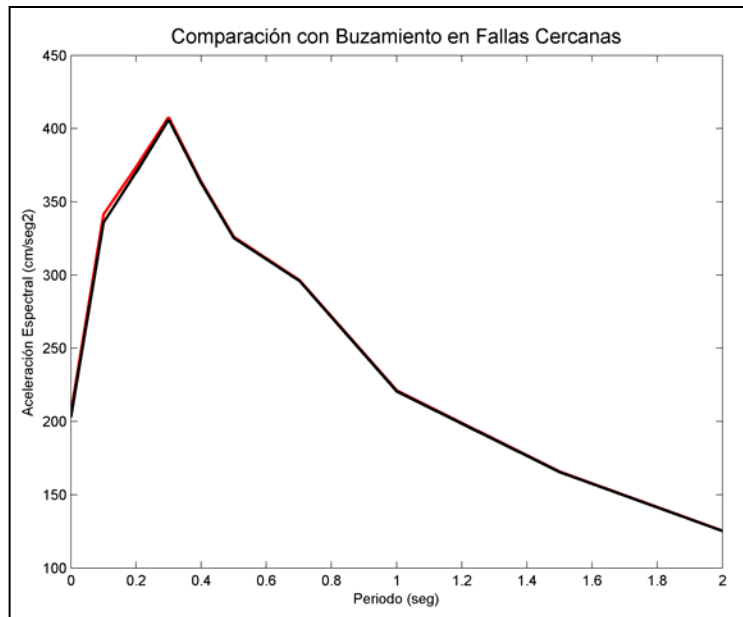


Figura 8. Comparación de las fuentes usando buzamiento de las estructuras corticales.

3.2 EVALUACIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN

Los modelos de atenuación adoptados para este estudio, también son objeto de evaluación para la sensibilidad del cálculo de la amenaza sísmica. En la evaluación de los modelos se tiene variación promedio de hasta ± 10 gales en el PGA. En la **Figura 9** se muestran los espectros de aceleración para los diferentes modelos propuestos, observándose que en los diferentes espectros hay respuestas diferentes de acuerdo al período. Para períodos de 0.1 a 0.5 seg se tienen amplias diferencias en el valor de la aceleración de hasta ± 20 gales, a partir de 0.5 y hasta 2.0 seg se tienen diferencias de hasta ± 30 gales, especialmente con el modelo de Sadigh, para los otros modelos la variación es hasta de ± 20 gales.

3.3 COMPARACIÓN DE AMBIENTES TECTÓNICOS

Las fuentes sísmicas tienen un aporte diferente dentro de la amenaza sísmica regional, como se aprecia en la **Figura 10**, en este gráfico se muestran cinco espectros de aceleración, la contribución a la amenaza de todas las fuentes sísmicas se aprecia en el espectro de color negro, el aporte a la amenaza de las cuatro fuentes asociadas a la subducción se representan por medio del espectro de color azul, el espectro correspondiente a la contribución a la amenaza de la fuente asociada a la Zona de Benioff es el verde, el espectro de aceleración que muestra la contribución de las fuentes corticales es el rojo, y por último el espectro de color azul claro muestra la contribución a la amenaza de las fuentes de subducción superficiales. Como se puede apreciar en la **Figura 10**, la mayor contribución por ambiente tectónico a la amenaza sísmica está dada por la fuente de subducción asociada a la Zona de Benioff, seguida por las fuentes corticales. El aporte a la amenaza sísmica por las fuentes de subducción superficial es muy bajo. Comparando el aporte de las fuentes de subducción (línea azul) con el de las fuentes corticales (línea roja), se observa que la contribución a la amenaza está dominada por las fuentes de subducción desde los 0.2 seg hasta los 1.8 seg.

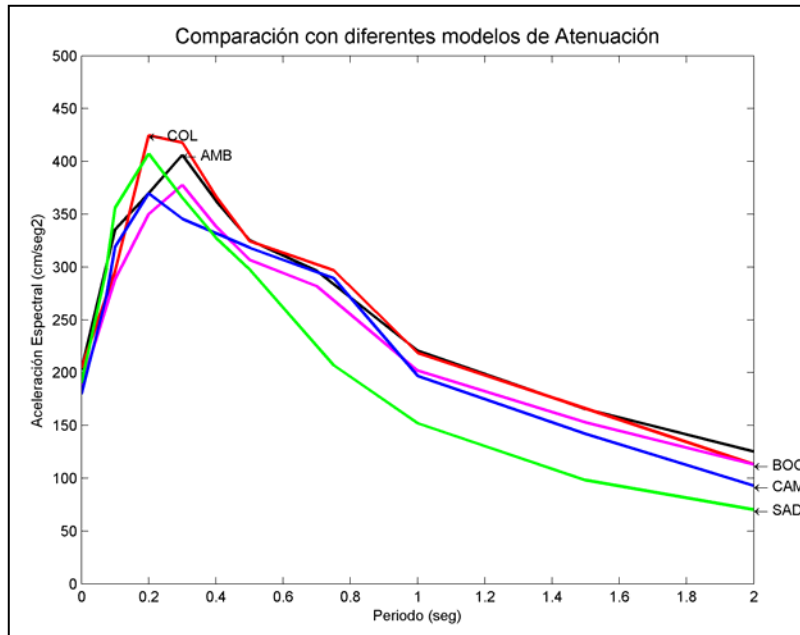


Figura 9. Comparación de los diferentes modelos de atenuación.

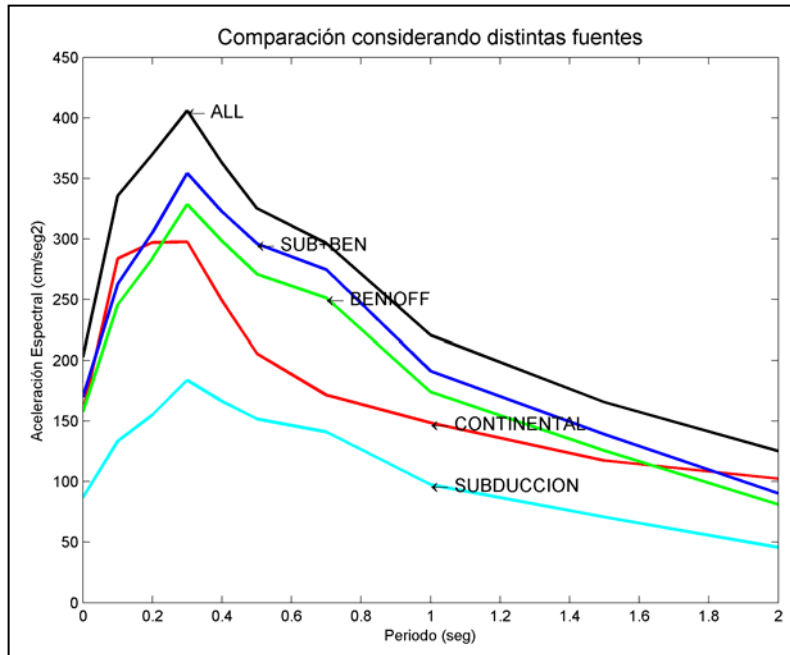


Figura 10. Comparación de diferentes fuentes sísmicas.

3.4 COMPARACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS CORTICALES

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo tanto para los parámetros de las fuentes como para los diferentes tipos de fuentes sísmicas, en este caso se analizaron las fuentes asociadas a la deformación cortical.

En la **Figura 11** se aprecia el aporte a la amenaza sísmica de todas las fuentes, calculada con la ecuación de atenuación de Ambraseys (línea negra). La línea roja muestra el aporte a la amenaza sísmica por parte de las fuentes asociadas a la deformación cortical, estas a su vez se dividieron en dos grupos, el primero corresponde a las fuentes que se encuentran a menos de 50 Km de la ciudad (línea verde), y el segundo grupo corresponde a las fuentes que se encuentran a menos de 100 Km (línea azul).

Al comparar los espectros uniformes de amenaza presentados en la **Figura 11**, se observa que las fuentes corticales que más contribuyen a la amenaza se encuentran a menos de 100 Km de la ciudad de Cali. Por otra parte, las fuentes que se encuentran a menos de 50 Km, en general no tienen un aporte significativo a la amenaza con respecto a la contribución de todas las fuentes corticales y de las fuentes corticales a menos de 100 Km, sin embargo su aporte es especialmente significativo para períodos de 0.1 a 0.3 seg.

3.5 COMPARACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIAL

Como parte del análisis de sensibilidad del modelo de amenaza sísmica, también se tomó consideró el espectro uniforme de amenaza (EUA) de las fuentes de subducción superficial. En la **Figura 12** se muestra el EUA de color negro, el cual muestra el aporte de todas las fuentes a la amenaza sísmica, por otra parte, el EUA de color verde representa la contribución a la amenaza de las fuentes de subducción superficial. La línea de color rojo representa el espectro de aceleración para el Sismo de Tumaco de 1979 con $M_w=8.2$. La línea de color azul representa el espectro de aceleración para el Sismo de Pizarro con $M_w=7.2$, el cual sirvió de referencia para la evaluación de respuesta de sitio en la ciudad de Santiago de Cali y verificar los resultados de la medición de microtrepidaciones. Es de interés notar que las aceleraciones máximas están alrededor de 0.2 y 0.3 seg en los sismos respectivos y en el EUA para las fuentes de subducción.

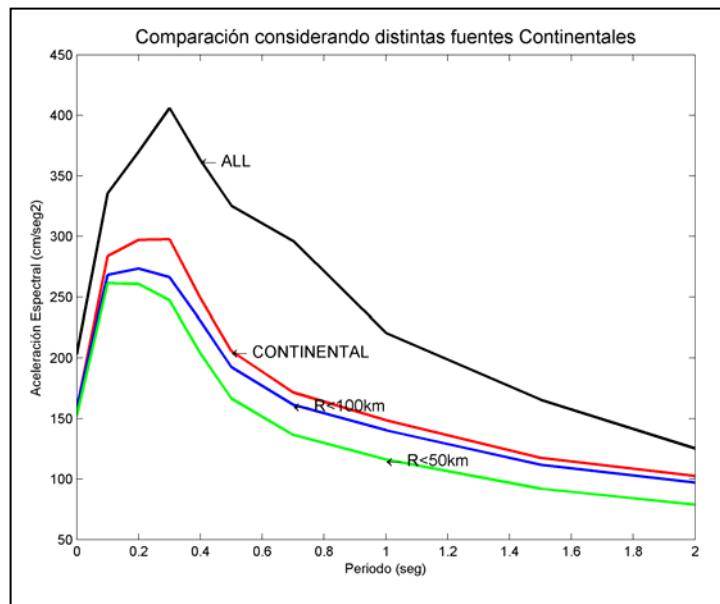


Figura 11. Comparación de fuentes continentales.

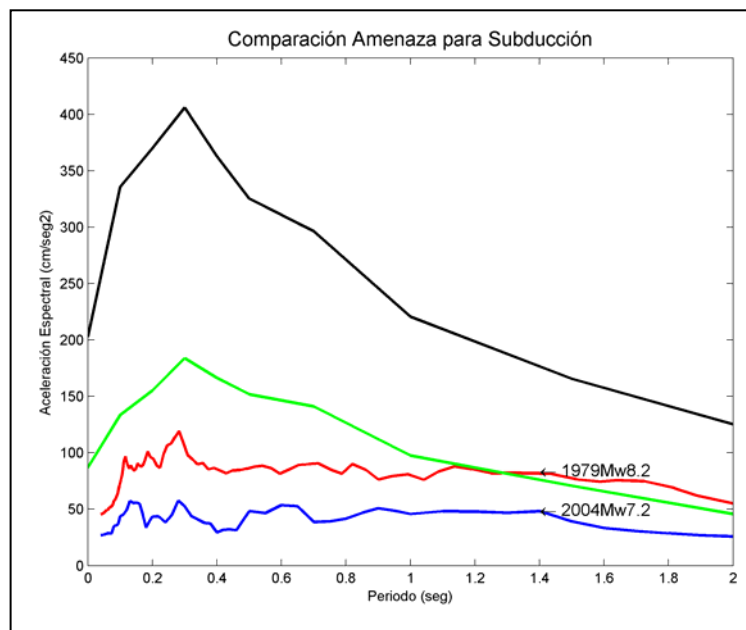


Figura 12. Comparación de fuentes sísmicas asociadas a la subducción.



CAPITULO 4

DESAGREGACIÓN Y FAMILIAS DE ACELEROGRAMAS

La desagregación de la amenaza sísmica es el proceso por el cual se estima la amenaza sísmica en función de la magnitud y la distancia. Para este análisis se tomó un punto de interés localizado en el centro de la ciudad de Santiago de Cali, ubicado en las coordenadas, 76.50° Longitud W y 3.45° Latitud N, realizando el cálculo de la probabilidad de excedencia para un umbral de aceleración estimado de 200 gales.

Este proceso de cálculo de la amenaza sísmica en función de la magnitud y la distancia necesitó de modificaciones en el proceso de cálculo, ya que se requería de una nueva entrada en la que se iteraran estos dos parámetros, que por defecto están fijos en este proceso. El resultado de estos cálculos es la tasa de excedencia en función de la magnitud y la distancia.

4.1 DESAGREGACIÓN PARA TODAS LAS FUENTES

Para el cálculo de la desagregación, se procesaron los datos de dos formas diferentes, primero se agruparon por magnitud, iterando la máxima distancia a la fuente, y se obtuvo la tasa de excedencia neta para cada distancia. En el segundo caso, se agruparon por distancia, iterando la máxima magnitud de cada fuente, obteniendo la tasa de excedencia neta para cada magnitud en función de la distancia.

Tomando en cuenta el resultado de este proceso, que se visualiza en función de la distancia y la magnitud en la **Figura 13**, se tiene que los rangos de distancias que más contribuyen a la amenaza sísmica se encuentran por debajo de los 40 Km y entre 100 a 150 Km. Las magnitudes que más contribuyen están en el rango de 5.5 a 6.7 y de 6.5 a 8.5.

4.2 DESAGREGACIÓN PARA LAS FUENTES CORTICALES

El cálculo de desagregación se realizó para un modelo con las fuentes corticales únicamente. En la **Figura 14** se muestra la contribución a la amenaza por tales fuentes en función de la distancia y la magnitud, en este caso, la contribución más importante la ofrecen las fuentes que están a menos de 40 Km de distancia. La contribución a la amenaza en función de la magnitud en este caso está entre las magnitudes de 5.5 y 6.7.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, se pueden definir las distancias y las magnitudes que más pueden afectar a la ciudad de Santiago de Cali, base para seleccionar los acelerogramas necesarios para modelar la respuesta sísmica de la ciudad.

4.3 CONTRIBUCIÓN A LA AMENAZA SÍSMICA POR FUENTES

Para determinar el aporte de cada fuente a la amenaza sísmica total, se realizó una prueba en la que se calculó la amenaza individualmente. Los resultados se pueden apreciar claramente en la **Figura 15**, en la cual se muestra la tasa de excedencia para cada fuente.

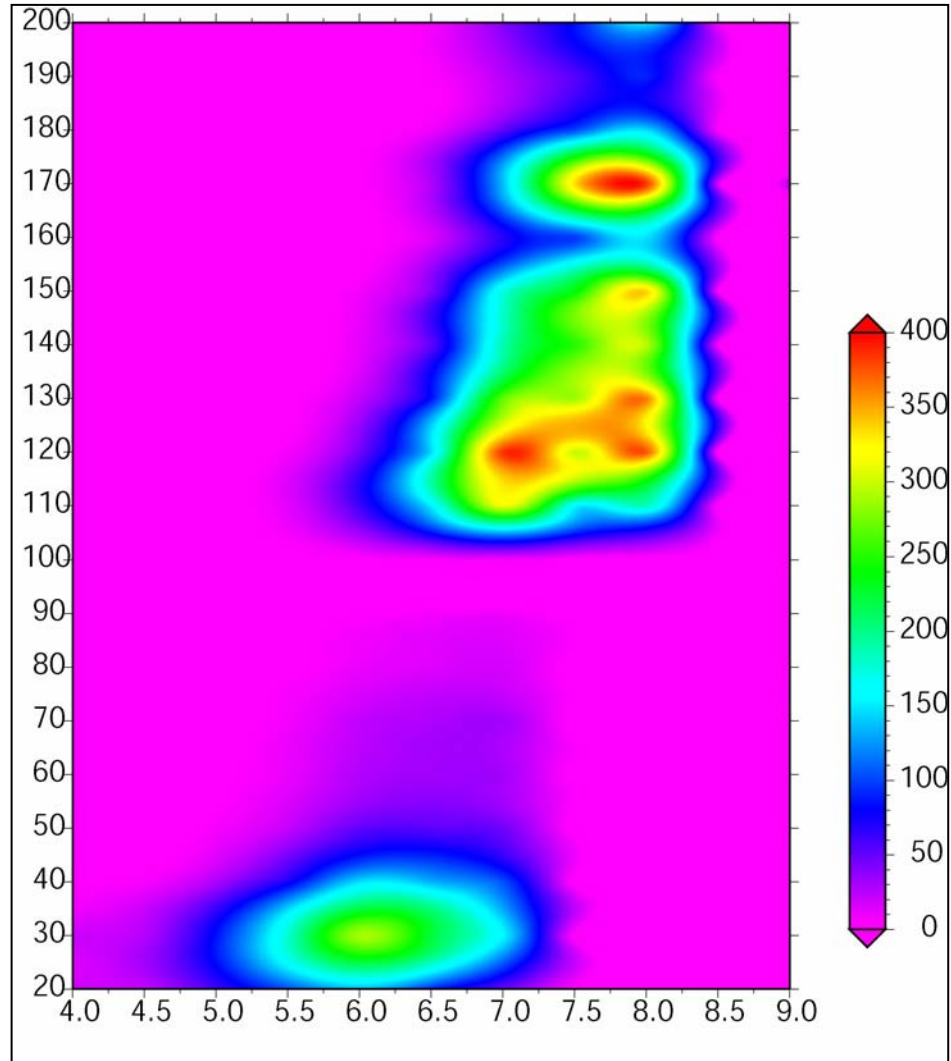


Figura 13. Desagregación de la amenaza en función de la distancia y la magnitud.

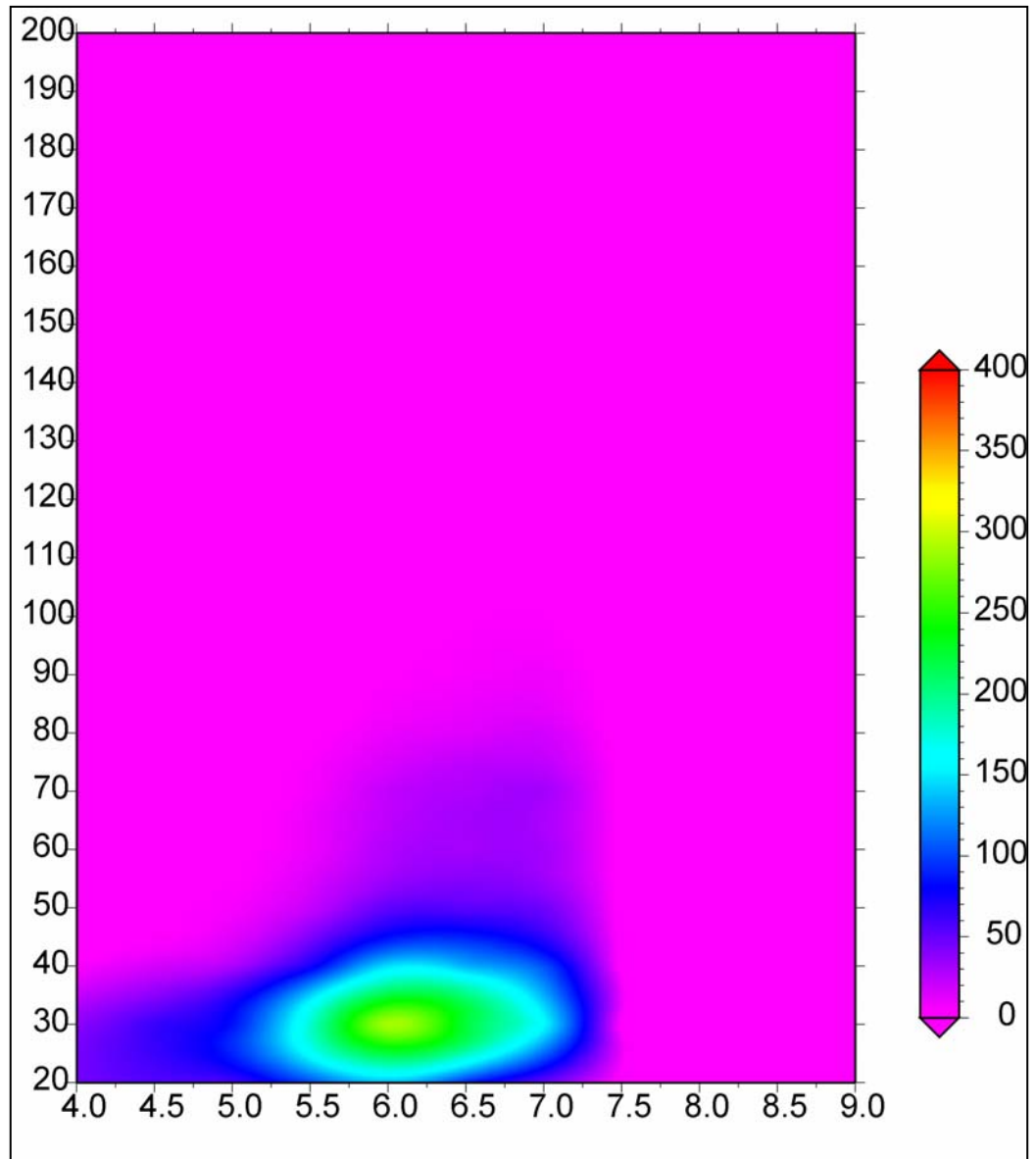


Figura 14. Desagregación de la amenaza sísmica en función de la distancia y la magnitud.

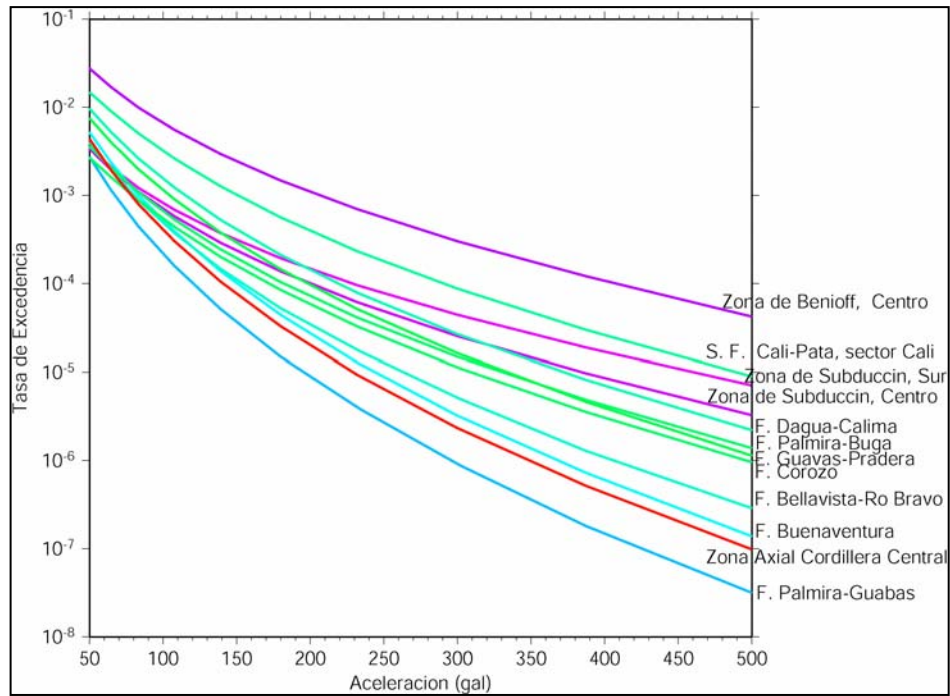


Figura 15. Tasa de excedencia para las fuentes sísmicas que más contribuyen a la amenaza.

Con base en dichos resultados las fuentes que más contribuyen a la amenaza sísmica en la ciudad de Cali se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Fuentes sismogénicas que más contribuyen al nivel de amenaza sísmica en la ciudad de Cali.

No.	FUENTE	Código Fuente	Mwmax	Dist. Media (km)	PGA (cm/seg ²)
1	Zona de Benioff, segmento Centro	BENI	7,8	104,03	157,80
2	S. F. Cali-Patía, sector Cali	CAP2	6,7	14,41	116,46
3	F. Dagua-Calima	DACR	6,8	39,78	89,83
4	F. Guavas-Pradera	GUPA	6,7	25,81	81,60
5	F. Buenaventura	BUEN	6,9	63,33	66,92
6	Zona Axial Cordillera Central	AXCC	6,9	68,56	62,90
7	F. Bellavista-Río Bravo	BERB	6,9	40,70	62,94
8	F. Palmira-Buga	PABU	6,9	36,67	63,93
9	Zona de Subducción, segmento Sur	SUBS	8,8	300,68	64,37
10	Zona de Subducción, segmento Centro	SUBC	7,8	224,09	62,56

4.4 SEÑALES PARA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA

Una vez se determinaron los escenarios de amenaza sísmica consistentes, parejas M-R, se procedió a la selección de señales sísmicas que cumplieran esta condición y se encuentren en el rango de aceleraciones esperado, además de verificar el tensor de momentos del evento y las condiciones locales de la estación acelerográfica donde se logro el registro. Se seleccionaron un número de señales que lograron representar de manera homogénea los diferentes escenarios de interés.

Las señales seleccionadas se utilizan como sismos de entrada para los diferentes modelos y perfiles de suelos seleccionados para la ciudad, la idea es que con estos movimientos fuertes se logre modelar la respuesta dinámica lineal y no-lineal de los suelos, luego con las modelaciones se obtendrían espectros de respuesta en la superficie de los suelos, y a partir de todos los resultados se plantearan los espectros de diseño para diferentes sitios de la ciudad (ver informe No.5.2, Subproyecto de Respuesta Sísmica, Proyecto MZSCali, 2005).

De acuerdo al ejercicio de desagregación de la amenaza sísmica, se seleccionaron diez señales acelerográficas o señales de diseño, agrupadas en los tres ambientes sismotectónicos característicos para la ciudad de Santiago de Cali (Subducción Superficial, Subducción Profundidad y Cortical), las cuales se describen a continuación (Anexo 2).

4.5 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES CORTICALES

Se tomaron cuatro acelerogramas que se describen en la **Tabla 2**. Sus principales características son:

00Profundidad: varía ente 0 y 30 Km.

Magnitud: Mw entre 5.8 y 6.5.

Distancia epicentral: entre 20 y 100 Km.

Aceleración esperada: 170 a 230 cm/seg².

Tipo de movimiento: En este ambiente de deformación predomina el mecanismo Strike - Slip.

Tabla 2. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes corticales.

País	IRAN	JAPÓN	NUEVA ZELANDA	ITALIA
Referencia	ISMN (2005)	K-NET (2005)	Geonet Project (2005)	Amato et al (1998), ESD
Año	2002	2005	1991	1997
Mes	6	3	1	9
Día	22	20	28	26
hora	2	1	18	9
minuto	58	53	0	40
segundo	20.0	48.0	56.9	30.0
Latitud	35.8	33.7	-42.0	43.0
Longitud	49.0	130.0	171.9	12.9
Profundidad	15	12	15	6
Mw	6.5	6.6	5.8	6.0
Mecanismo	Inverso	Rumbo	Inverso	Normal
Código Estación	Razan	FKO001	090A	AS010
Latitud Estación	35.4	33.8	-41.9	43.1
Longitud Estación	49.0	130.5	172.0	12.6
Tasa de muestreo	200	100	50	100
Distancia Epic.	49	33	24	21

4.6 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES DE SUBDUCCIÓN PROFUNDA

Se escogieron tres acelerogramas que se describen en la **Tabla 3**. Sus principales características son:

Profundidad: varía ente 70 y 200 Km.

Magnitud: Mw entre 6.8 y 7.8.

Distancia hypocentral: entre 20 y 200 Km.

Aceleración esperada: 170 a 230 cm/seg².

Tipo de movimiento: En este ambiente de deformación predomina el mecanismo inverso.

Tabla 3. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes de subducción profunda.

País	Japón	Peru	Chile
Referencia	K-NET (2005)	CISMID	Massone
Año	2003	1974	2005
Mes	5	1	6
Día	26	5	13
hora	9	8	22
minuto	24	33	44
segundo	38.8	51.0	33
Latitud	38.9	-12.4	-19.89
Longitud	141.6	-76.3	-69.13
Profundidad	61	91	117
Mw	7.0	6.5	7.9
Mecanismo	Inverso	ND	Inverso
Estación	MYG005	ZAR	Iquique
Latitud estación	38.8	-12.0	-20.22
Longitud estación	140.7	-77.0	-70.14
Tasa de Muestreo	100	50.0	200
Distancia Epic.	89	90	119

4.7 SEÑALES ACELEROGRÁFICAS PARA FUENTES DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIAL

Se identificaron tres acelerogramas que se describen en la **Tabla 4**. Sus principales características son:

Profundidad: varía ente 0 y 30 Km.

Magnitud: Mw entre 7.5 y más.

Distancia epicentral: entre 70 y 300 Km.

Aceleración esperada: 100 a 230 cm/seg².

Tipo de movimiento: En este ambiente de deformación predomina el mecanismo inverso.

Tabla 4. Señales de diseño para evaluación de la respuesta sísmica, correspondientes a fuentes de subducción superficial.

País	MEXICO	MEXICO	NUEVA ZELANDA
Referencia	Base mexicana de datos de sismos fuertes		Geonet Project (2005)
Año	1985	1985	2003
Mes	9	9	8
Día	19	21	21
hora	13	1	12
minuto	17	37	12
segundo	43.0	19.0	59.0
Latitud	17.9	17.6	-45.0
Longitud	-102.0	-101.4	166.9
Profundidad	21	21	32
Mw	8.1	7.5	7.2
Mecanismo	Inverso	Inverso	Inverso
Estación	UNIO	PAPN	JACS
Latitud estación	18.0	17.3	-44.0
Longitud estación	-101.8	-101.0	168.6
Tasa de Muestreo	200	100	50
Distancia Epic.	91	83	185

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Para calcular la amenaza sísmica regional de la ciudad de Santiago de Cali se probaron varios modelos de atenuación. El modelo básico consiste en una ecuación de atenuación para las fuentes corticales (Ambraseys (1996), Campbell (1997), Sadigh (1997), Boore (1997) y Colombia), otra para las fuentes de Subducción superficial (Youngs (1997)) y otra para la fuente de Subducción profunda (Youngs (1997)). La aceleración estimada en el área definida para el análisis varía, de acuerdo al tipo de ecuación de atenuación para fuentes corticales que se tome en el modelo, entre ± 0.02 g.

El cálculo de la amenaza sísmica regional tomando como referencia el modelo de atenuación de Ambraseys, indica un valor medio de aceleración de 200 a 210 gales para la ciudad de Santiago de Cali.

La evaluación de los parámetros probabilísticos para el cálculo de la amenaza sísmica indica una incertidumbre de ± 0.02 g. El b-value, es un parámetro que al ser modificado aleatoriamente en un rango acorde al régimen sísmico del área de estudio, no representa mayores cambios en el valor de aceleración calculado, al igual que la magnitud máxima. La inclusión del buzamiento de las estructuras en la geometría de las fuentes sísmicas, no es un factor que contribuya en gran medida en el aporte de la amenaza sísmica de las fuentes corticales.

El ambiente tectónico que más contribuye a la amenaza sísmica corresponde a la Zona de Benioff hasta los 0.9 seg, y en adelante es dominada por las fuentes corticales. Las fuentes de subducción superficiales presentan picos de aceleración alrededor de 0.2 y 0.3 seg, comparados con espectros de aceleración para dos sismos importantes en la región. Para el caso de las fuentes sísmicas corticales, se tiene que su contribución en la amenaza sísmica está dominada por aquellas fuentes con distancia menores a 100 Km.

La contribución a la amenaza sísmica de cada fuente se estimó por medio del proceso de desagregación de la amenaza. Se obtuvo un rango de distancias y magnitudes, que acorde con el modelo corresponden a fuentes corticales cercanas y fuentes de subducción. El primer grupo de fuentes que más contribuyen a la amenaza se encuentra a menos de 40 Km y tiene magnitudes entre 5.5 y 6.7, el segundo grupo de fuentes se encuentra entre 100 a 150 Km con magnitudes de 6.5 a 8.5.

Las fuentes que más contribuyen a la amenaza en su orden son: Zona de Benioff Centro, Sistema de Fallas Cali-Patía sector Cali, Zona de Subducción Sur, Zona de Subducción Centro, Falla Dagua-Calima, Falla Palmira-Buga, Falla Guabas-Pradera, Falla Corozo, Falla Bellavista-Río Bravo, Falla Buenaventura, Zona Axial Cordillera Central y Falla Palmira-Guabas.



Como resultado del análisis de desagregación se definieron tres ambientes que controlan la amenaza sísmica sobre la ciudad. Se seleccionaron diez señales acelerográficas de bases de datos internacionales de movimiento fuerte, conformadas por cuatro de origen continental, tres de subducción profunda y tres de subducción superficial. Se cuenta con señales de Japón, Nueva Zelanda, Irán, Italia, México, Perú y Chile. Estas señales proporcionan información de aceleración en roca para sismos que ocurren en ambientes similares a los definidos en este estudio



CAPITULO 6

BIBLIOGRAFÍA

AIS300 Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, (1998). Normas Colombianas del diseño y la construcción sismoresistentes, ley 400 de 1997, decreto 33 de 1998

AIS, INGEOMINAS, UNIANDES. (1996). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia.

Anderson J., J. Brune, P. Bodin, J. Prince, R. Quaas, M. Oñate, D. Almora, P. Pérez, 1985, "Preliminary presentation of accelerogram data from the Guerrero strong motion accelerograph array. Michoacan-Guerrero, Mexico earthquake of 19 and 21 September 1985", Vol. GAA-1A, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Amato, A., Azzara, R., Chiarabba, C., Cimini, G., Cocco, M., di Bona, M., Margheriti, L., et al. (1998), Servizio Sismico Nazionale, Ente Nazionale per l'Energia Elettrica (1998): Elaborazioni delle principali registrazioni accelerometriche della sequenza sismica Umbro-Marchigiana del settembre ottobre 1997 (CD-ROM collection). Servizio Sismico Nazionale. Assisi-Stallone, AS010, Italy, SSN strong-motion network <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>

Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., & Bommer, J.J. 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(4), 371–400.

Base mexicana de datos de sismos fuertes
<http://www.mexaccedb.unam.mx/db/spanish/conten.html>

Bommer, J.J., Scott, S.G. and Sarma, S.K. (2000). "Hazard-consistent earthquake scenarios". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 2000, p219-231.

Boore, M. D., Joyner, W.B., Fumal, T.E., 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North America earthquakes: A summary of recent work, Seismological research letters. 68(1), January/February, 128 –153 pp.

Campbell, K. W., Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. Seismological research letters. 68(1), January/February, 154 -179 pp.

CISMID - Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
<http://www.cismid-uni.org/>

Douglas, J., 2001. A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). ESEE Report No.01-1. Imperial College, Civil Engineering Department, London. 138p.
Geonet Project, 2005. <http://www.geonet.net.nz/strongmotion.html>



ISMN – Iran Strong Motion Network, 2005. <http://www.bhrc.gov.ir/Bhrc/d-stgrmo/D-StGrMo.htm>. Building and housing research center Iran Strong Motion Network.

K-NET - Kyoshin Network , 2005. <http://www.k-net.bosai.go.jp/>

Massone, Héctor. 2005. Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Servicio Sismológico, Of. de Análisis de Registros Sísmicos

Pulido, N., et al. 2004. Strong motion estimation in the Sea of Marmara region (Turkey) based on a scenario earthquake. Tectonophysics 391, 357 – 374.

Quaas R., D. Almora, J. Prince, E. Mena, 1985, "Los temblores de Michoacán-Guerrero de septiembre de 1985, instrumentación y registro", Memorias Simposio sobre el temblor de Michoacán 1985 y sus efectos, Unión Geofísica Mexicana, Oaxaca, Oax, México.

Sadigh, K., Chang C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F., Youngs, R. R., 1997, Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. Seismological research letters. 68(1), January/February, 180 -189 pp.

Trifunac. M.D. and Lee, V.W. (1987). "Frequency dependent attenuation of strong earthquake ground motion" in Selection of Earthquake-Resistant Design Criteria for Nuclear Power Plants: Methodology and Technical Cases, Report NUREG/CR-4903, Vol. 1, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J., and Humphrey J., R., 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. Seismological research letters. 68(1), January/February, 58 - 73 pp.



ANEXO 1

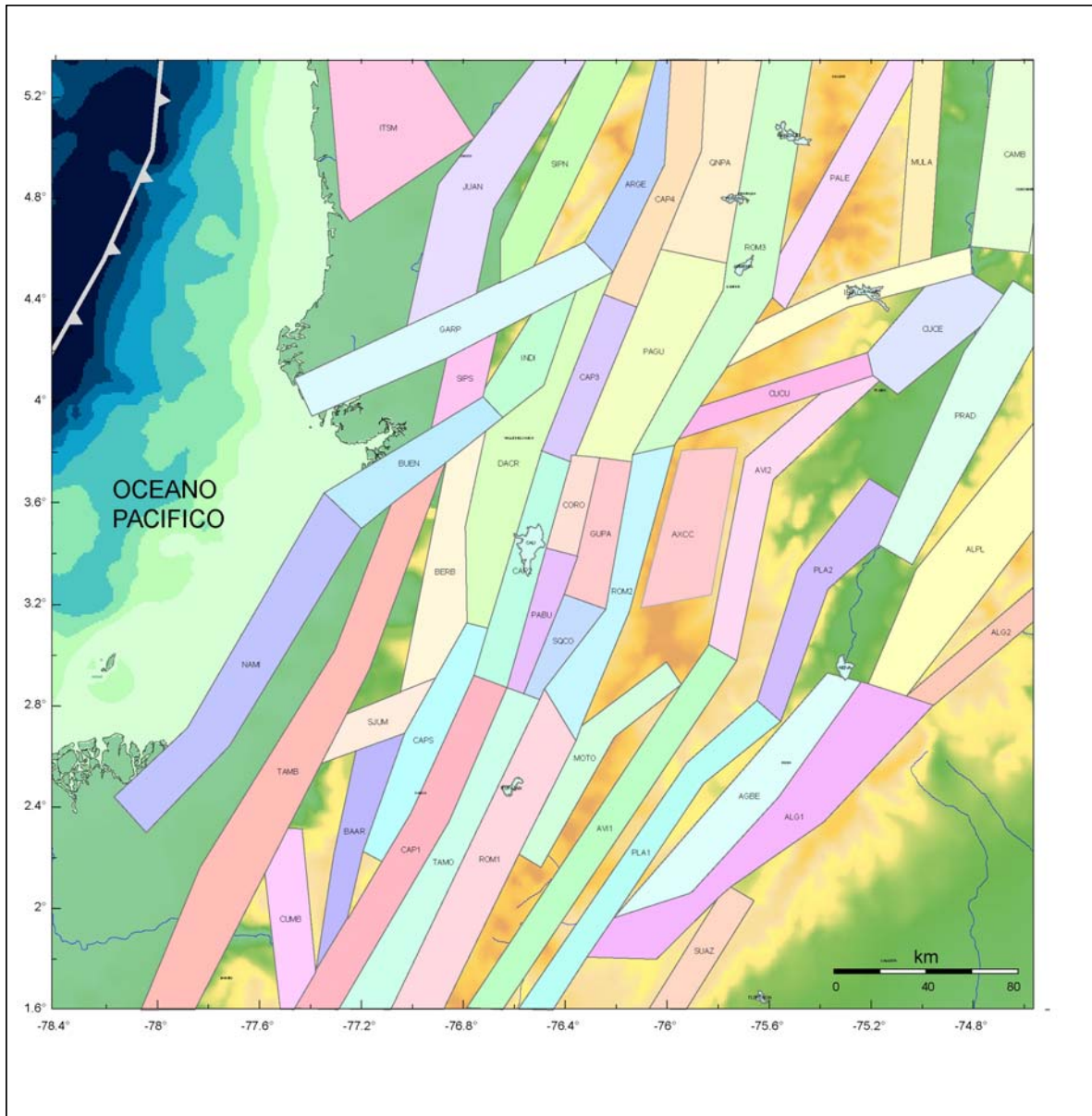
MODELO SISMOTECTÓNICO REGIONAL PARA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE CALI



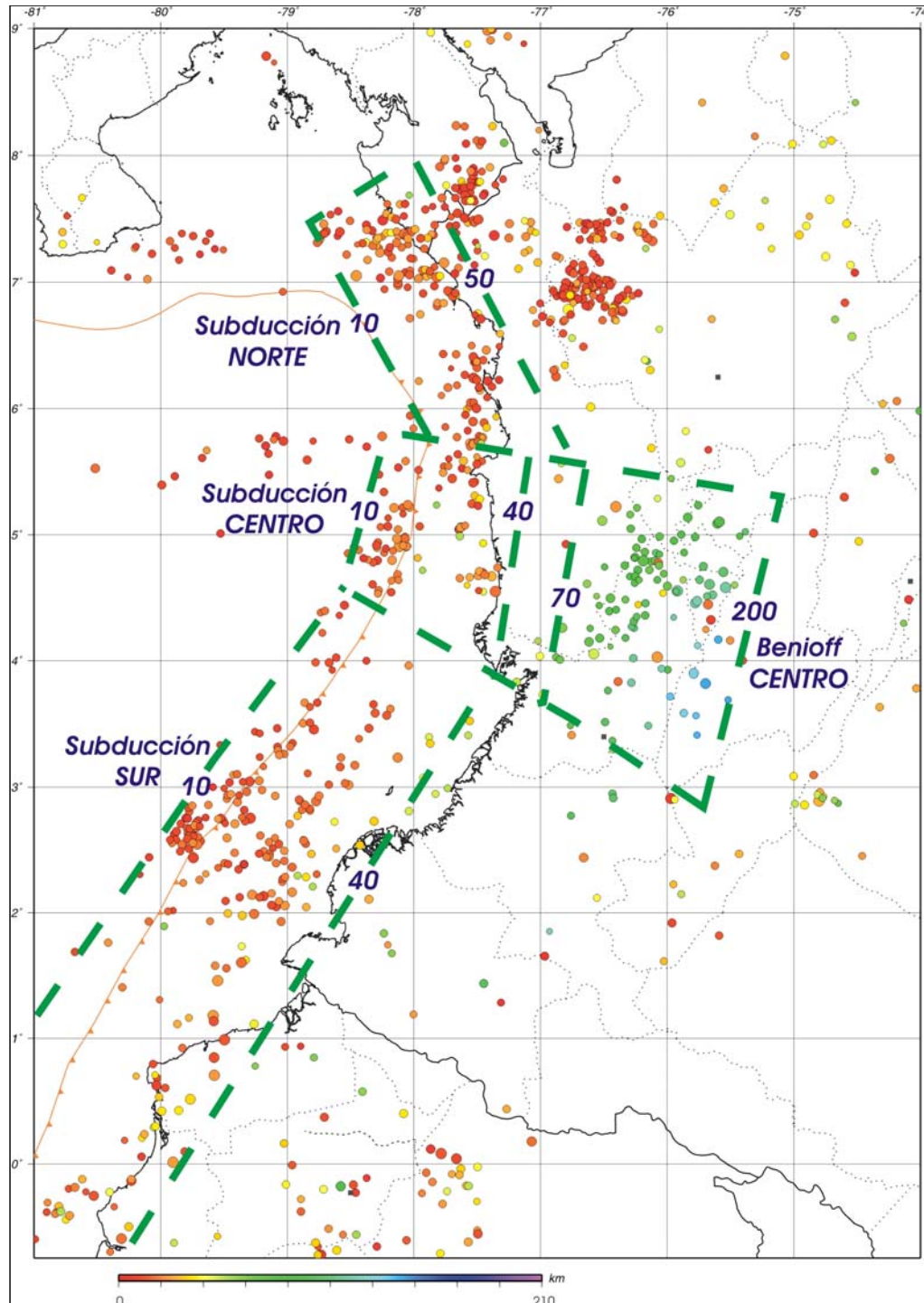
Parámetros de Tasa Sísmica de las fuentes definidas en el Modelo Sismotectónico para el Proyecto MZSCali

NOMBRE FUENTE	CODIGO	b	Ao (sis.)	Ao (tec.)	Mmax	Metodo b	Met. Ao (sis.)	Met. Ao (tec.)	Met. Mmax
F. Agrado-Betania	AGBE	0.87	0.16	0.15	6.9	MB1	MA1	MA3	MM3
F. Algeciras, sector Sur	ALG1	1.10	0.39	1.48	7.4	MB1	MA1	MA3	MM2
F. Algeciras, sector Norte	ALG2	1.00	0.13		7.4	MB1	MA1		MM2
F. Altamira-Platanillal	ALPL	1.13	0.18		7.3	MB1	MA1		MM2
F. Argelia	ARGE	0.94	0.03	0.06	6.9	MB3	MA1	MA3	MM3
F. Avirama, sector Sur	AVI1	0.90	0.05		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Avirama, sector Norte	AVI2	0.90	0.09		6.9	MB4	MA1		MM3
Zona Axial Cordillera Central	AXCC	0.90	0.16		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Balboa-Argelia	BAAR	0.70	0.02		6.9	MB2	MA2		MM3
F. Bellavista-Río Bravo	BERB	0.88	0.06		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Buenaventura	BUEN	0.84	0.16		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Cambao, segmento Sur	CAMB	0.91	0.33	0.11	6.9	MB1	MA1	MA3	MM2
S. F. Cali-Patía, sector Sur	CAP1	0.90	0.06		6.9	MB4	MA1		MM3
S. F. Cali-Patía, sector Cali	CAP2	0.90	0.06		6.7	MB4	MA1		MM1
S. F. Cali-Patía, sector Río Frio	CAP3	1.10	0.06		6.6	MB1	MA1		MM1
S. F. Cali Patía, sector Norte	CAP4	0.90	0.09	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Capitanes	CAPS	0.70	0.02		6.6	MB2	MA2		MM1
F. Corozo	CORO	0.88	0.01		6.4	MB2	MA1		MM1
F. Cucuana, segmento Este	CUCE	0.93	0.08		6.9	MB3	MA1	MA3	MM3
F. Cucuana, segmento Oeste	CUCU	0.93	0.04	0.04	6.9	MB1	MA1	MA3	MM3
F. Cumbitara	CUMB	0.90	0.01		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Dagua-Calima	DACR	0.94	0.08	0.09	6.8	MB1	MA1	MA3	MM1
F. Garrapatas	GARP	0.94	0.21	0.13	6.7	MB1	MA1	MA3	MM1
F. Guavas-Pradera	GUPA	0.88	0.05	0.10	6.7	MB2	MA1	MA3	MM1
F. Ibagué	IBAG	0.93	0.05	0.38	7.0	MB3	MA1	MA3	MM1
F. El Indio	INDI	0.88	0.06		6.6	MB1	MA1		MM1
Zona de Falla de Itsmina	ITSM	0.90	0.02		6.9	MB4	MA1		MM3
F. San Juan	JUAN	0.78	0.21		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Mórcaz-Tóez	MOTO	0.68	0.05		7.0	MB1	MA1		MM2
F. Mulatos	MULA	0.90	0.02	0.05	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
S. F. Naya-Micay	NAMI	0.90	0.03	0.19	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Palmira-Buga	PABU	0.88	0.02		6.9	MB2	MA1		MM3
F. Palmira-Guabas	PAGU	0.88	0.19		6.7	MB2	MA1		MM1,MM2
F. Palestina	PALE	0.90	0.01	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
S. F. Chusma-Plata, sector Sur	PLA1	0.85	0.09	0.16	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
S. F. Chusma-Plata, sector Norte	PLA2	0.85	0.02	0.10	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
F. Prado	PRAD	0.90	0.05		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Quebradanegra-Patía	QNPA	0.88	0.04		6.9	MB2	MA1		MM3
S. F. Romeral, sector Sur	ROM1	0.93	0.80	2.13	6.6	MB1	MA1	MA3	MM2
S. F. Romeral, sector Centro	ROM2	0.88	0.04		6.5	MB2	MA1		MM1
S. F. Romeral, sector Norte	ROM3	0.88	0.09	0.11	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
F. Sipi, segmento Norte	SIPN	0.70	0.14		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Sipi, segmento Sur	SIPS	0.78	0.03		6.7	MB3	MA1		MM3
F. San Juan de Micay	SJUM	0.70	0.01		6.7	MB2	MA2		MM3
F. Santander Quilichao – Corinto	SQCO	0.88	0.01		6.4	MB2	MA1		MM1
F. Suaza	SUAZ	0.90	0.04	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Tambor	TAMB	0.70	0.07	0.07	6.9	MB2	MA2	MA3	MM3
F. Taminango-Morales	TAMO	0.93	0.02		6.9	MB3	MA1		MM3
Zona de Benioff, segmento Centro	BENI	0.74	5.23		7.8	MB1	MA1		MM3
Zona de Subducción, segmento Sur	SUBS	0.98	15.21		8.8	MB1	MA1		MM2
Zona de Subducción, segmento Norte	SUBN	0.84	5.75		7.8	MB1	MA1		MM1
Zona de Subducción, segmento Centro	SUBC	0.83	3.42		7.8	MB1	MA1		MM1

Fuentes Corticales definidas en el Modelo Sismotectónico para el Proyecto MZSCali



Fuentes asociadas al proceso de Subducción definidas en el Modelo Sismotectónico para el Proyecto MZSCali





ANEXO 2

SEÑALES DE DISEÑO SELECCIONADAS

(Valores de Aceleración y Aceleración Espectral en cm/seg²)



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**

**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTI MEDIO AMBIENTE
DAGMA**



ESCENARIO: CORTICAL

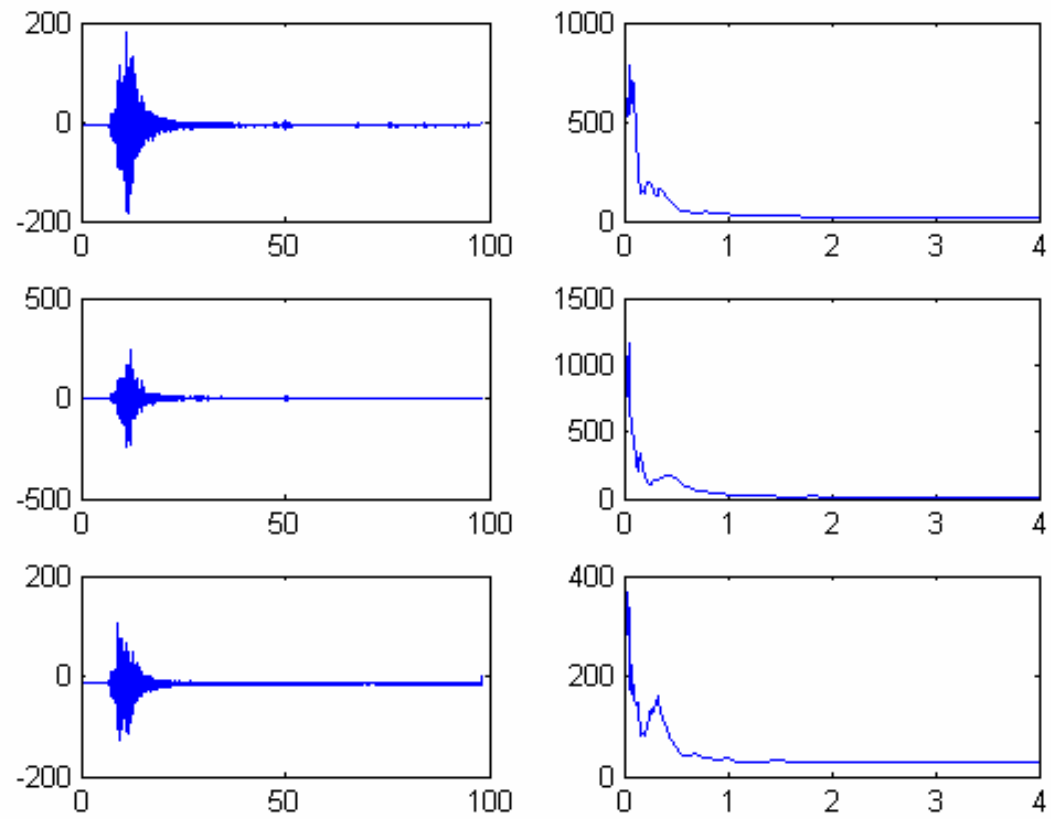


Figura A2.1. Acelerograma para el Sismo de Fukuoka, Japón 2005/03/20

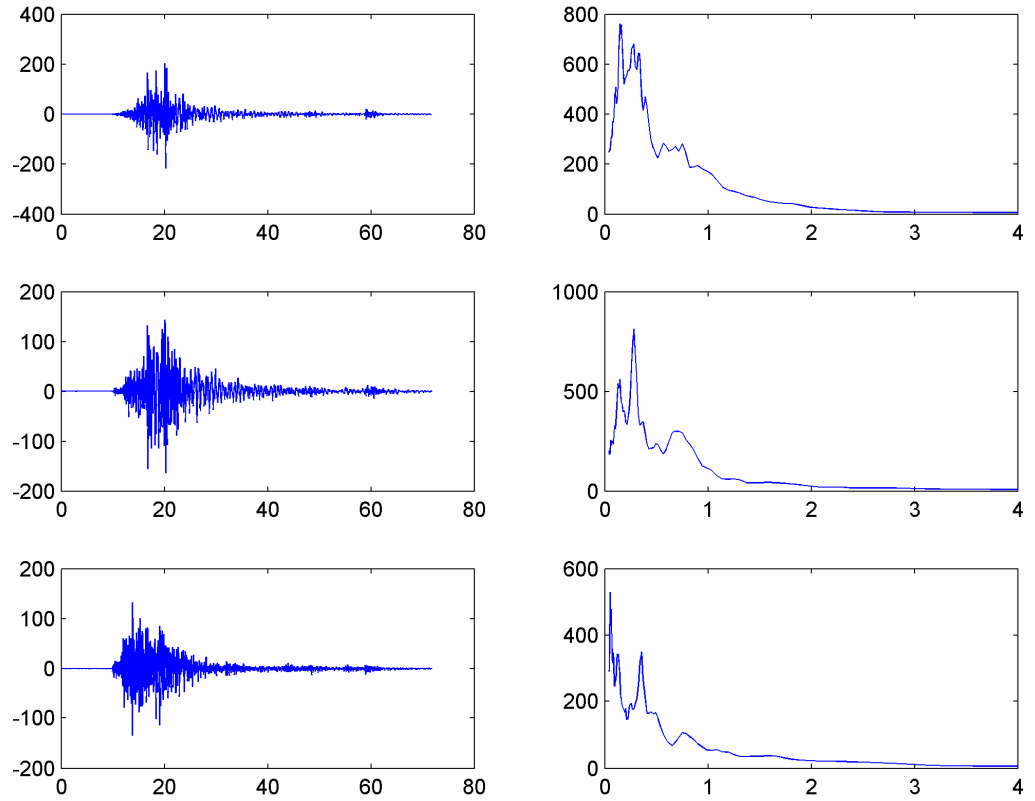


Figura A2.2. Acelerograma para el Sismo de Gilan, Irán 2002/06/22

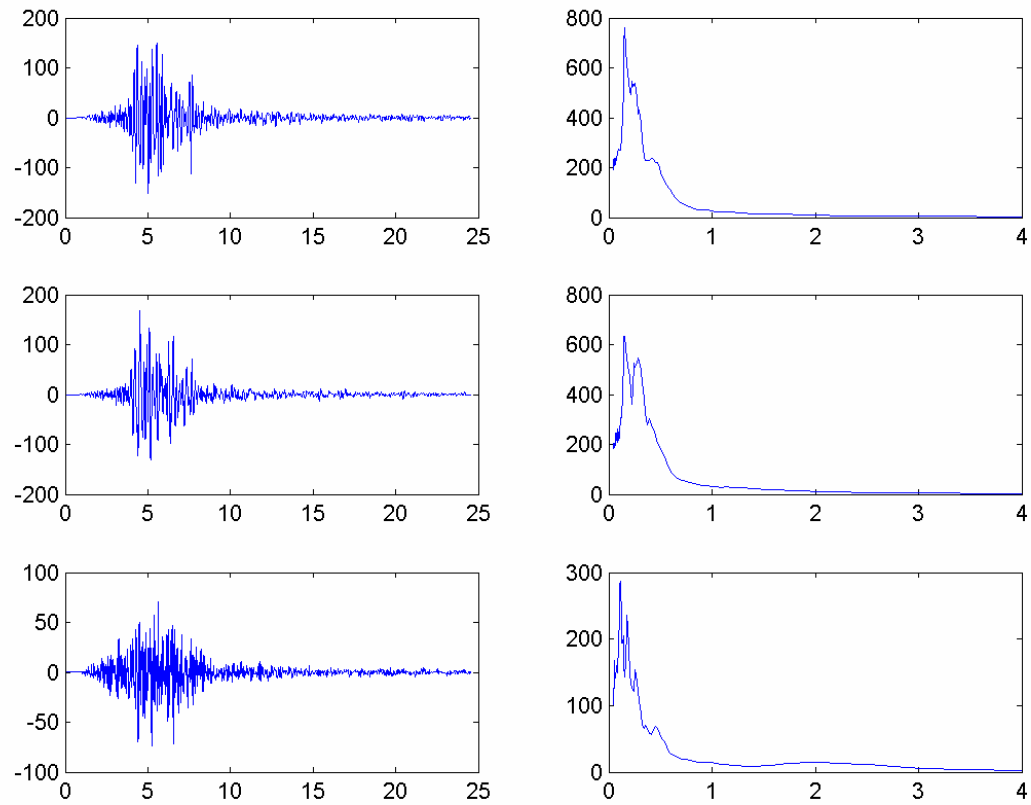


Figura A2.3. Acelerograma para el Sismo de Umbría (Marche), Italia 1997/09/26

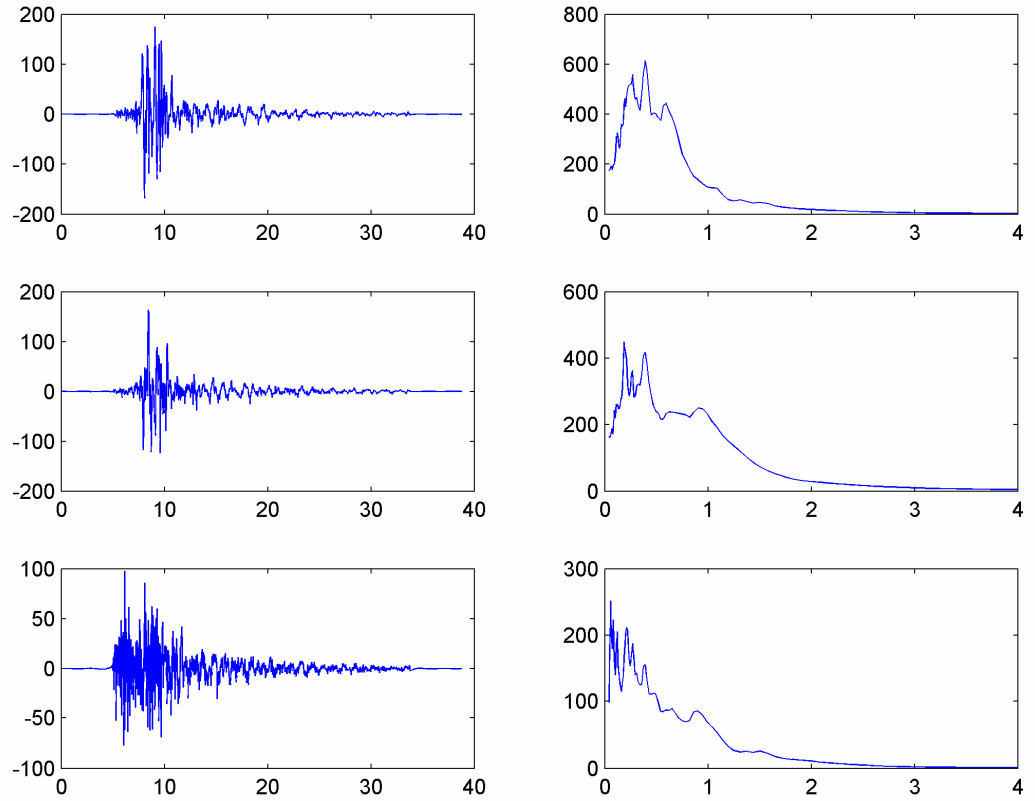


Figura A2.4. Acelerograma para el Sismo de Nueva Zelanda, 1991/01/28



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**

**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTI MEDIO AMBIENTE
DAGMA**



ESCENARIO: SUBDUCCION SUPERFICIAL

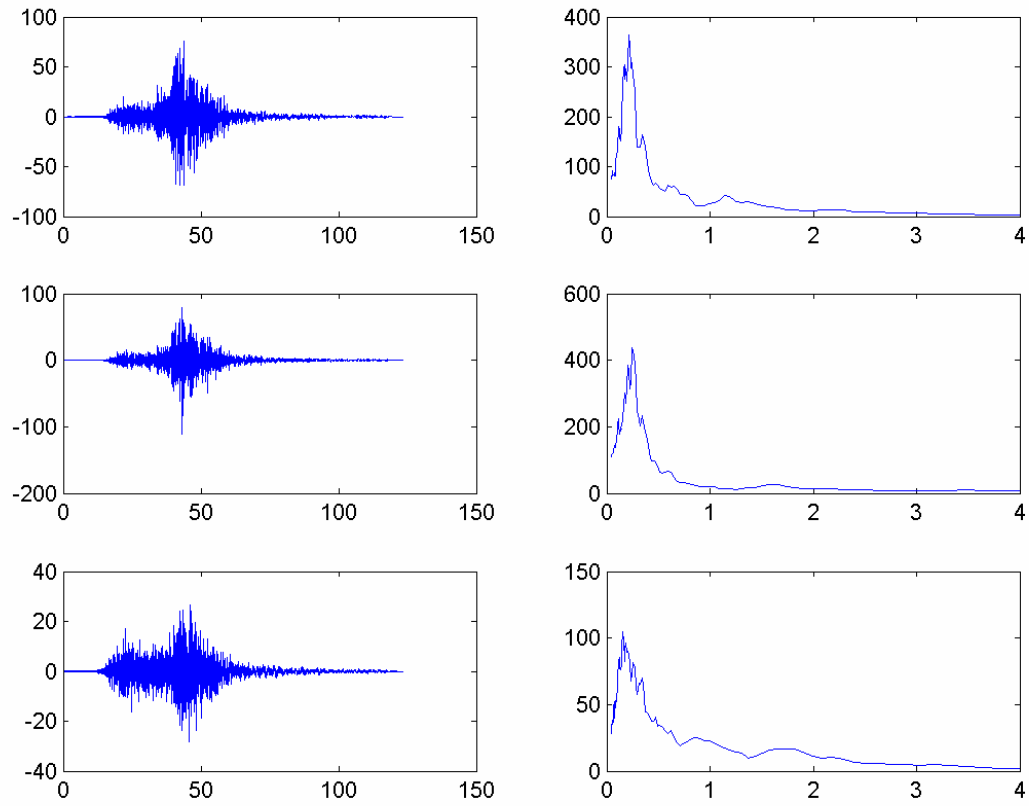


Figura A2.5 Acclerograma para el Sismo de Nueva Zelanda 2003/08/21

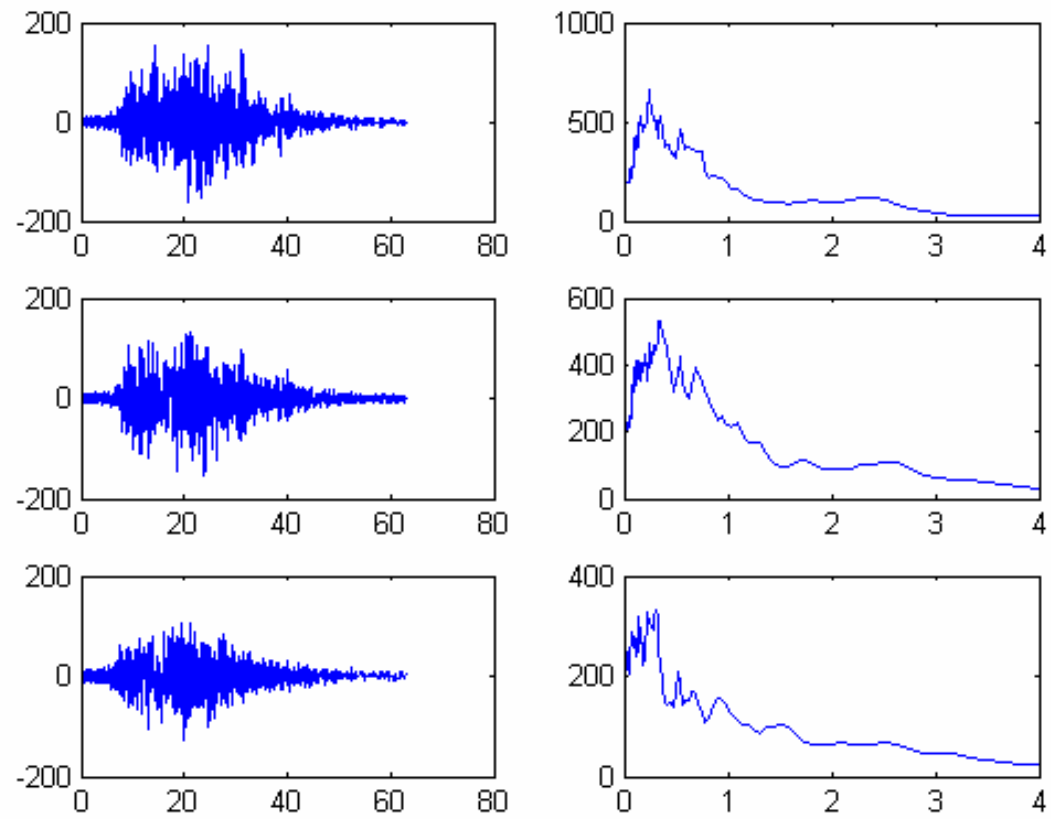


Figura A2.6. Acelerograma para el Sismo de Michoacan, México 1985/09/19

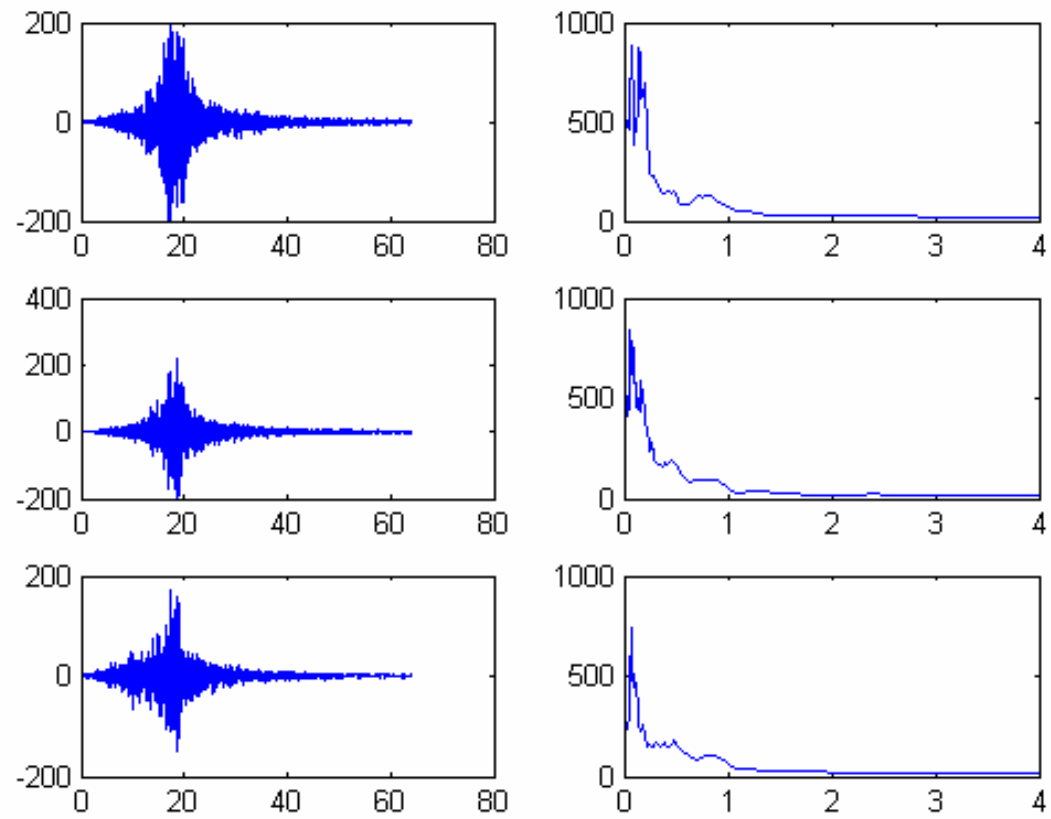


Figura A2.7. Acelerograma para el Sismo de Michoacan, México 1985/09/21



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**

**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTI MEDIO AMBIENTE
DAGMA**



ESCENARIO: SUBDUCCION PROFUNDA

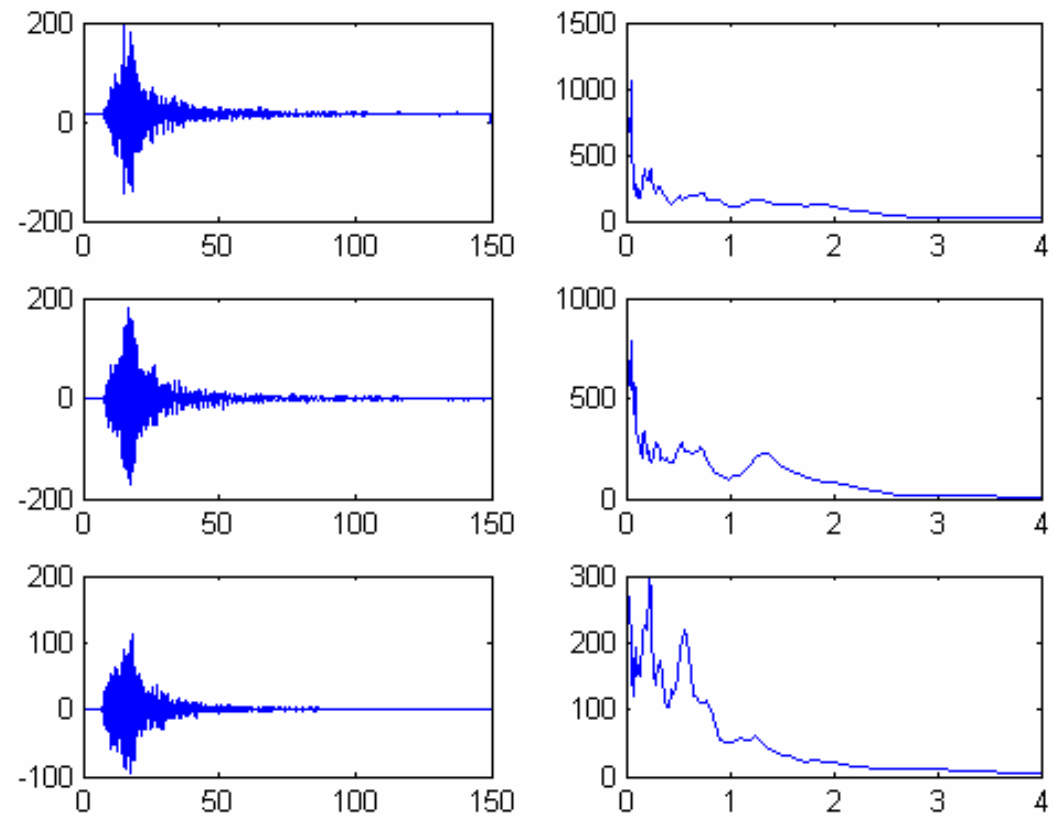


Figura A2.8. Acelerograma para el Sismo de Honshu, Japón 2003/05/26

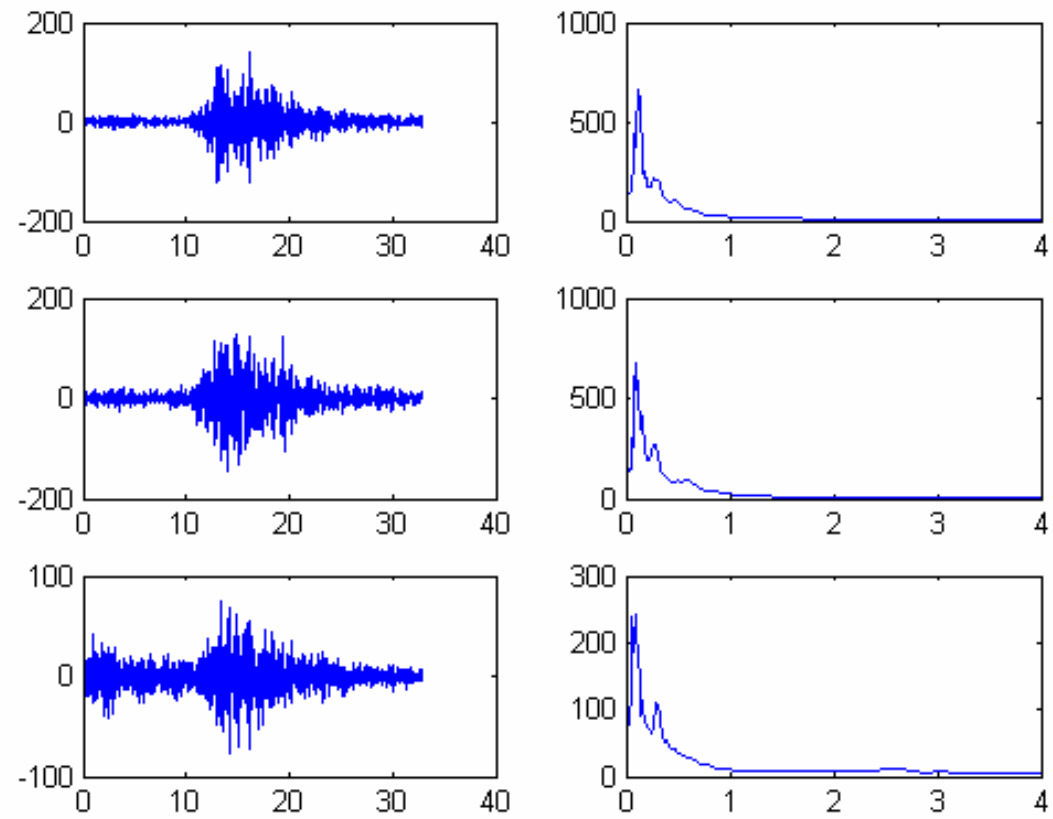


Figura A2.9. Acelerograma para el de Sismo de Perú 1974/01/05

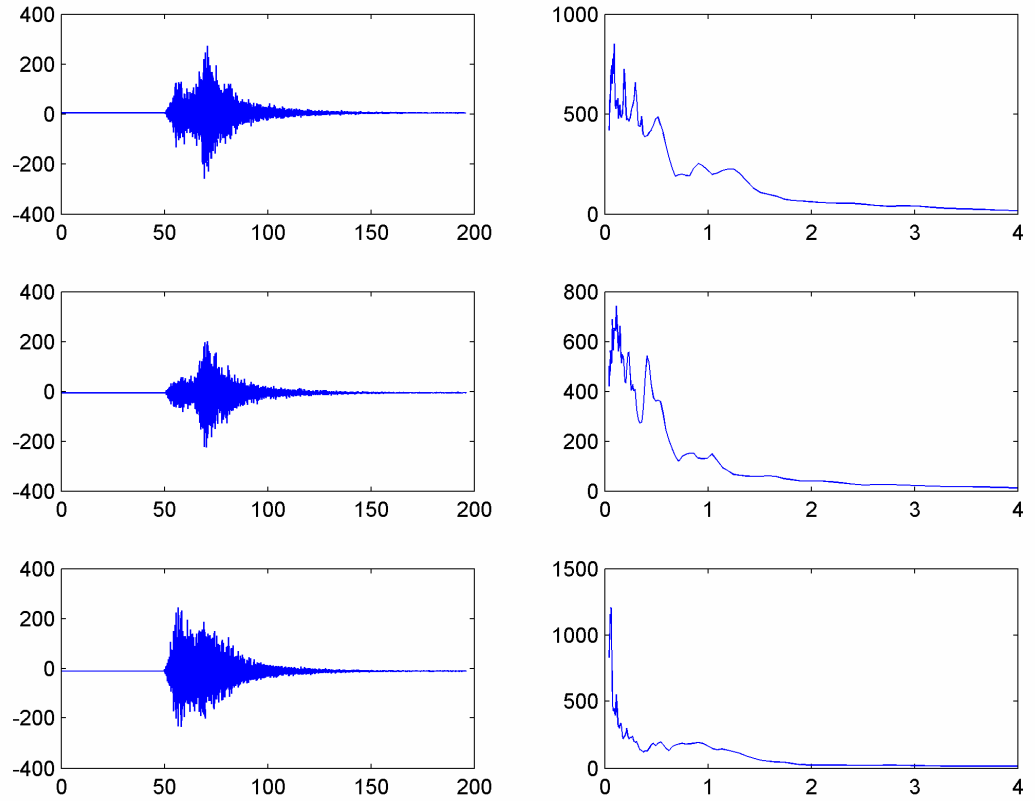


Figura A2.10. Acelerograma para el Sismo de Iquique, Chile 2005/06/13