



**ALCALDIA MAYOR
DE BOGOTA D.C**

**Dirección de Prevención
ATENCIÓN DE EMERGENCIAS**

Informe Final

**INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN TENDIENTES A
LA ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN
SÍSMICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

**CENTRO DE ESTUDIOS SOBRE DESASTRES Y RIESGOS
CEDERI**



**FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

**BOGOTÁ COLOMBIA
DICIEMBRE DE 2006**

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2 AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME

2.1 GENERALIDADES

2.2 INFORMACIÓN SÍSMICA DISPONIBLE

2.3 PARÁMETROS DE SISMICIDAD PARA LAS FUENTES EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS

2.4 RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ

2.5 COMENTARIOS SOBRE LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS

2.6 BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 2.1 - METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE AMENAZA SÍSMICA

CAPÍTULO 3 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL ANÁLISIS

3.1 INTRODUCCIÓN

3.2 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA DE BOGOTÁ

3.3 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

3.4 BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 3.1 – MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS DISPONIBLES

ANEXO 3.3 – CORTES ESTRATIGRÁFICOS REPRESENTATIVOS

CAPÍTULO 4 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO Y EFECTOS DE SITIO

4.1 INTRODUCCIÓN

4.2 MARCO TEÓRICO: MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA UNIDIMENSIONAL

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA MEDIANTE MODELOS
UNIDIMENSIONALES

4.4 RESPUESTA DINÁMICA UNIDIMENSIONAL

4.5 BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 4.1 – FUNCIONES DE TRANSFERENCIA NO LINEALES Y ESPECTROS DE AMENAZA
UNIFORME

ANEXO 4.2 – ESPECTROS DE RESPUESTA UNIDIMENSIONAL EN SUPERFICIE

CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

- 5.1 INTRODUCCIÓN
- 5.2 ZONIFICACIÓN EMPLEADA PARA AMENAZA EN SUPERFICIE
- 5.3 SUAVIZADO DE ESPECTROS
- 5.4 ESPECTROS DE DISEÑO
- 5.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
- 5.6 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS
- 5.7 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS
- 5.8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

CAPÍTULO 6 SISTEMA DE INFORMACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ – SISBOG V1.1

- 6.1 INTRODUCCIÓN
 - 6.2 REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN
 - 6.3 INTERFASE DEL USUARIO Y COMANDOS GRÁFICOS
 - 6.4 BASE DE DATOS DEL SISTEMA
 - 6.5 SELECCIÓN, CONTROL DE VISUALIZACIÓN Y CÁLCULO
-

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Diversos son los antecedentes de estudios de amenaza y riesgo en el país. Uno de los principales documentos que tuvo gran impacto en las prácticas de diseño y construcción a nivel nacional corresponde al Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes, Decreto 1400 de 1984, el cual se basó principalmente en la Norma AIS 100, la cual venía desarrollándose durante varios años por parte de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). Casi simultáneamente se publica el primer Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia en el año 1984 también por parte de la AIS, el cual fue actualizado posteriormente en octubre de 1996. Una nueva versión de las normas se legaliza mediante las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, Ley 400 de 1997 y decretos reglamentarios (Decreto 33 de 1998 y 34 de 1999). Esta última es la reglamentación vigente en la actualidad a nivel nacional.

De acuerdo con el literal A.2.9 de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR), Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998, las capitales de Departamento y las ciudades de más de 100 000 habitantes localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, con el fin de tener en cuenta el efecto que sobre las construcciones tenga la propagación de la onda sísmica a través de los estratos de suelo subyacentes, podrán armonizar las reglamentaciones municipales de ordenamiento del uso de la tierra, con un estudio o estudios de microzonificación sísmica que cumpla con una serie de actividades y estudios que se detallan en las Normas NSR-98, adoptadas oficialmente por el Estado con base en las Normas AIS-100 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Por otro lado y reconociendo los importantes efectos que tiene la respuesta sísmica de los depósitos de suelo locales y demás características particulares de cada uno de los sitios en que se ubique una población determinada, se han venido desarrollando en el país diversos estudios de micro zonificación sísmica de ciudades. El primer estudio se desarrolló para la ciudad de Popayán en el año 1992 por parte de la Comunidad Económica Europea, el Ingeominas y la Universidad de los Andes. Posteriormente se realizó el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá en el cual participaron principalmente la Universidad de los Andes y el Ingeominas y cuyo informe final se publicó en el año 1997. También se realizó el estudio para la ciudad de Medellín el cual se publicó en el año 1999 ejecutado por la Universidad EAFIT, Integral, Ingeominas y la Universidad Nacional de Medellín.

Hacia abril de 1999 se realizaron también los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad de Pereira y los municipios de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal bajo la dirección de la Universidad de los Andes y la participación de varias firmas locales.

Luego de la ocurrencia del sismo de Armenia de 1999, la OFDA/AID de los Estados Unidos solicitó a la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, y a la Universidad de los Andes el estudio del comportamiento del suelo de las zonas centro y sur de la ciudad de Armenia ante las solicitaciones del sismo. De esta manera se formuló el Estudio de *Microzonificación Sísmica Indicativa para Orientar la Reconstrucción de Armenia-Quindío*, en el cual también participaron la Universidad del Quindío y el Ingeominas. Este estudio fue realizado con el fin de redefinir el plan de ordenamiento territorial y orientar los programas de reconstrucción bajo el cumplimiento de las normas de diseño y construcción sismorresistente vigentes.

Hacia el año 2001, la ciudad de Bucaramanga también realizó algunos estudios preliminares con la participación directa de Ingeominas.

De la misma manera, más recientemente la Universidad de los Andes adelantó el *Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales*, con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, y de varias firmas consultoras locales. Dicho estudio se entregó a la ciudad a finales del año 2002. Así mismo en el 2005, la Universidad de los Andes adelantó el estudio *Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tuluá y Buga*, y en 2006 los *Estudios de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué*. En dichos estudios se realizaron aportes innovadores a nivel tecnológico que se han tenido en cuenta para desarrollar el presente estudio y se espera sean un insumo fundamental para avanzar en la gestión del riesgo en el Distrito.

Desde hace varios años la Universidad de los Andes ha participado activamente con la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias en el tema del riesgo sísmico de la ciudad. En primer lugar está el estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá, el cual da inicio a una serie de actividades relacionadas con el riesgo sísmico aplicado a la ciudad de Bogotá. . Luego se realiza la implementación de la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB) para administrar la información sísmica proveniente de la red. Posteriormente se desarrolla un esquema de visualización de resultados de la interpretación de la información sísmica de la RAB, que hoy en día hace parte del sistema de información pública SIRE en Internet. Posteriormente las dos entidades firman un convenio cuyos objetivos son estudiar y plantear los escenarios de daño probables ante un sismo de gran magnitud, como insumo importante para la estrategia de fortalecimiento de la capacidad de respuesta de la ciudad.

Finalmente, el 8 de junio de 2006, el Alcalde firma el Decreto No. 193 mediante el cual se complementa y modifica el Código de construcción de Bogotá D.C. y se adoptan los espectros de diseño y las determinantes del estudio de Microzonificación Sísmica. Este Decreto modifica el Decreto 074 de 2001 mediante el cual se habían adoptado los espectros de diseño resultantes del estudio de microzonificación sísmica inicial.

Luego de varios años de vigencia del Decreto 074 de 2001, se tienen las siguientes circunstancias específicas:

- (a) Existe en la actualidad más y mejor información de tipo geotécnica en la zona urbana de la ciudad de Bogotá que la existía en el momento en que se realizó el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad.
- (b) Se cuenta en la actualidad con un mayor número de registros representativos de diferentes fuentes sísmicas, provenientes de varios registros a nivel mundial, que podrían utilizarse con miras a evaluar la respuesta dinámica de los depósitos de suelos típicos de la ciudad con miras a obtener resultados más representativos.
- (c) Se cuenta con mayor experiencia y sensibilidad sobre la utilización de los espectros de diseño propuestos y se ha podido establecer el efecto de utilizar envolventes en los espectros de diseño según las zonas definidas para la ciudad.
- (d) Se han desarrollado nuevas metodologías de análisis que permiten la obtención de resultados con mayor consistencia con respecto a las observaciones de la realidad.

Los anteriores argumentos justifican la realización de una actualización en los estudios de microzonificación sísmica, que es el objetivo principal del presente estudio.

El presente informe incluye los siguientes capítulos:

1. Introducción y antecedentes.
2. Amenaza Sísmica en terreno firme que incluye la modelación probabilística de la amenaza incluyendo todas las fuentes sismogénicas a nivel nacional y permite obtener la amenaza en terreno firme en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento para diferentes ordenadas espectrales.
3. Información geotécnica disponible para la evaluación de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo dominantes en la ciudad.
4. Respuesta dinámica del subsuelo y efectos de sitio en el cual se estudiaron de manera analítica los efectos que sobre la amenaza tienen los suelos y depósitos de la zona.
5. Microzonificación sísmica y espectros de diseño en donde se resume una nueva propuesta de cuantificación de la amenaza sísmica a nivel de la superficie del terreno.
6. Sistema de información sísmica de Bogotá – SISBOG, sistema desarrollado para efectos de mantener actualizada y poder utilizar de manera ágil y efectiva toda la información geográfica y sísmica de la ciudad. En particular permite el manejo y visualización de la información de amenazas y espectros de diseño de sitio.

Los diferentes análisis y modelos que se presentan en la compleja temática de amenaza sísmica representan una primera evaluación y cuantificación aproximada de los posibles efectos y consecuencias que puede llegar a tener un evento sísmico con características destructivas. Los resultados, sumados a futuros estudios de vulnerabilidad y riesgo, constituyen herramientas fundamentales para una adecuada gestión del riesgo que incluye actividades de normalización para diseño y reforzamiento sísmico, estrategias de prevención y mitigación del riesgo, planes de preparación para la atención de la emergencia y para futuras actividades de reconstrucción y estrategias concretas de protección financiera mediante análisis de optimización de retención y transferencia del riesgo, actividades todas ellas en desarrollo en la actualidad.

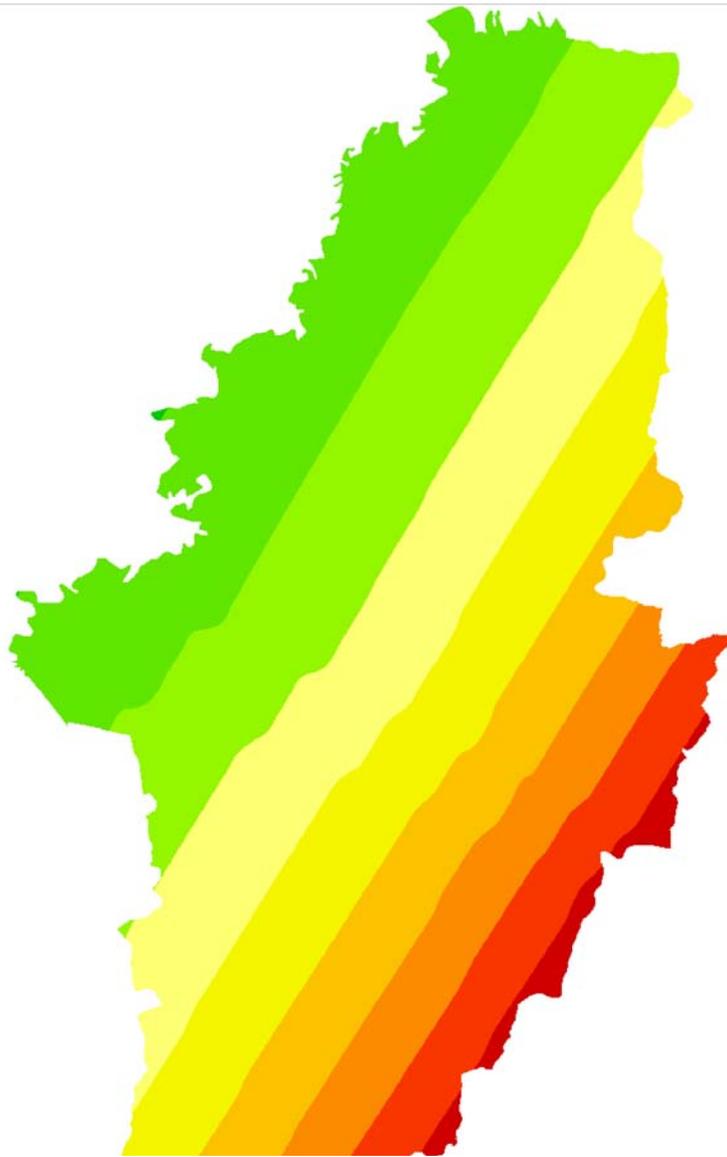
Finalmente la presentación de los resultados del estudio en un sistema general de visualización permiten definir un plan de acción estratégico en el corto, mediano y largo plazo que incluye actividades como normalización basada en los estudios de microzonificación para el diseño sismorresistente y para los estudios de respuesta dinámica de proyectos importantes que permitan mejorar el nivel de información de la microzonificación; refinamiento y ajuste de la información catastral para el SISBOG; estudio de otro tipo de amenazas como inundaciones, avalanchas, deslizamientos y otros para ser incluidos en el sistema de información; y en general planteamiento y desarrollo del sistema general de Gestión del Riesgo en la ciudad.

Se debe resaltar la importancia que los resultados de este estudio significan para efectos de actualizar la normativa local de obligatorio cumplimiento para el diseño sismorresistente de edificaciones en Bogotá D.C.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
-----------------------------------------------	----------

AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME



CAPÍTULO 2 AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME

2.1 GENERALIDADES

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia, según lo estipulado en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, adelantado por la AIS en 1997, debido a su proximidad con fuentes cercanas y regionales de tamaño importante. Ante estas particularidades, se hace necesario identificar de la manera más confiable posible la amenaza sísmica de la ciudad en términos de espectros de aceleraciones y espectros de amplitudes de Fourier en terreno firme, con base en los cuales se puedan establecer eventuales acelerogramas que podrían esperarse a nivel de basamento rocoso.

Una vez definida la amenaza sísmica a nivel del terreno firme mediante cualquiera de los parámetros mencionados, se procede a estimar mediante la propagación hasta la superficie del terreno de las señales en roca, las respuestas esperadas en superficie, bien sea en términos de acelerogramas, espectros de aceleración, aceleraciones máximas o cualquier otra variable relacionada, a partir del modelo del subsuelo adoptado.

La amenaza sísmica de una zona determinada depende de un gran número de variables, algunas de las cuales pueden ser imposibles de cuantificar en la actualidad. Sin embargo, se han desarrollado modelos simplificados que permiten estimar las variables fundamentales involucradas en el cálculo de la amenaza sísmica, lo cual permite dar un tratamiento científico al problema.

Inicialmente es necesario determinar un área de influencia que permita limitar el problema a la zona dentro de la cual la ocurrencia de sismos es relevante. En segundo lugar se requiere identificar las fuentes, que dentro del área de influencia previamente establecida son capaces de generar eventos sísmicos de importancia. Una vez identificadas, estas fuentes deben caracterizarse a través de ecuaciones basadas en los datos sísmicos existentes para la zona. En este punto, se hace posible la evaluación probabilística de parámetros para análisis sísmicos en el sitio de interés. Estos parámetros deben ser modificados y complementados por los efectos locales, lo cual es la esencia misma de los estudios de microzonificación sísmica de ciudades o zonas.

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología de cálculo de la amenaza basada en la teoría sismológica clásica. Con base en la sismicidad de las fuentes del territorio y en las leyes de atenuación de los diferentes parámetros sísmicos, es posible identificar la amenaza sísmica de todas las fuentes que pueden generar efectos importantes sobre la ciudad de Bogotá en términos de espectros de amplitudes de Fourier (EAF), de la aceleración máxima del suelo o de aceleraciones máximas para diferentes ordenadas espectrales. El resultado de este tipo de análisis son tasas de excedencia asociadas a períodos de retorno. Una vez seleccionado el período de retorno, por ejemplo de 475 años como lo establece la ley 400 de 1998 para el diseño de edificaciones, se puede definir entonces el valor del parámetro sísmico de interés.

El proceso se extiende geográficamente a un área de influencia suficiente para visualizar la distribución de las intensidades según la posición de las fuentes y su sismicidad con respecto al

sitio de estudio. Con dichas intensidades y las leyes de atenuación de aceleración de cada tipo de mecanismo focal es posible identificar para las distancias más representativas valores de magnitud y energía liberada. Variables como distancia y magnitud se utilizan en la teoría sismológica para evaluar los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) de cada tipo de mecanismo focal.

Para encontrar los espectros de potencia para cada una de las fuentes que se encuentran en el área de influencia es necesario estimar la duración de la fase intensa de los movimientos, lo cual se realiza mediante un análisis probabilístico con las leyes de atenuación de duración, que se determinan a partir de la frecuencia de esquina y la intensidad de Arias. El resultado se expresa en términos de una tasa de excedencia de duración para cada fuente.

La amenaza sísmica se cuantifica en términos de los periodos de retorno (o sus inversos, las tasas de excedencia) de intensidades sísmicas relevantes en el comportamiento de las estructuras. La tasa de excedencia de una intensidad sísmica se define como el número medio de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de esa intensidad sísmica es excedido.

Es posible determinar la amenaza sísmica contando las veces en que se han excedido valores dados de intensidad en el sitio de interés. Sin embargo, la determinación directa rara vez se puede realizar porque no se dispone de catálogos completos de las aceleraciones que han producido en un sitio los sismos pasados. Por lo anterior, resulta necesario calcular la amenaza sísmica de manera indirecta. Para ello, se evalúa primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes generadoras de temblores y después se integran los efectos que producen, en un sitio dado, los sismos que se generan en la totalidad de las fuentes.

A pesar que en años recientes no se ha generado en el país información sísmica que permita modificar de manera sustancial la información de amenaza en terreno firme previamente existente en el estudio inicial de microzonificación, existen nuevas metodologías de cálculo de la amenaza que vale la pena explorar con miras a un eventual ajuste o modificación de los resultados actuales de amenaza sísmica. Igualmente es necesario repetir este análisis con el fin de extender posteriormente la metodología a la respuesta de los depósitos de suelo locales.

Este capítulo presenta la reevaluación de la amenaza sísmica de la ciudad a la luz de nuevas metodologías de análisis disponibles, como es el método de análisis probabilístico basado en la teoría sismológica clásica mediante el cual es posible determinar los espectros de diseño de amenaza uniforme variando en cada coordenada de la ciudad prácticamente de manera continua. Los resultados que se obtienen aplicando las nuevas metodologías de análisis se comparan con resultados de las metodologías de análisis más tradicionales como las utilizadas en el estudio original de microzonificación sísmica de la ciudad.

2.2 INFORMACIÓN SÍSMICA DISPONIBLE

La evaluación de la amenaza sísmica se basa en buena parte en la información existente, la cual es generalmente insuficiente y defectuosa. En Colombia las informaciones disponibles provienen de registros a grandes distancias, de las redes regionales de cierta apertura como la del Instituto Geofísico de los Andes Colombianos y redes de menor apertura pero más densas y confiables como la del Observatorio Sismológico del Sur Occidente, OSSO, con sede en la Universidad del Valle y mucho más recientemente, de la Red Sismológica Nacional de Colombia, RSNC, operada por el Ingeominas.

Gran parte de la información sismológica nacional se obtiene del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia adelantado por la AIS en 1997. La información proviene de diversas fuentes a las cuales se hace referencia en el presente capítulo. La actual red sismológica que opera el Instituto Geofísico de los Andes cuenta con estaciones en Galerazamba (Bolívar), Floridablanca (Santander), Fúquene (Cundinamarca), Bogotá (Cundinamarca), Chinchiná (Caldas) y Pasto (Nariño). Esta red tiene problemas de diversa índole los cuales deben tenerse en cuenta al interpretar la información del catálogo de sismos ya que una buena parte de la información existente proviene de los datos recolectados en esta red durante más de cuarenta años.

Por otro lado está el Observatorio Sismológico del Sur Occidente Colombiano el cual inició operaciones en 1986 y sus registros sismológicos se inician en 1987. El Observatorio está ubicado en los predios de la Universidad del Valle y cuenta en la actualidad con doce estaciones de registro analógico, con sensores verticales de período corto y una sola componente. Las estaciones están ubicadas en las siguientes localidades: El Hobo, Sevilla, Calima, Guadalajara, Anchicayá, La Horqueta, La Diana, Salvajina, El Peñón, Puracé, El Nudo y Tatamá. La información sismológica del OSSO ha servido, en parte, para confirmar la actividad sísmica en varias zonas del Occidente de Colombia. Los eventos importantes registrados por la Red del OSSO han sido incluidos en los catálogos recientes de sismos, publicados por el Ingeominas.

Finalmente se cuenta con la Red Sísmica Nacional de Colombia la cual cuenta con catorce estaciones de tecnología digital punta a punta, conexión de tipo satelital y estación central de registro. La RSNC es operada por Ingeominas; comenzó a operar oficialmente en abril de 1994, pero sus diferentes estaciones entraron en servicio poco a poco desde el año 1992. Ingeominas publica boletines trimestrales y cuenta con un nivel de operación de alta capacidad.

El catálogo sísmico disponible (Ingeominas) consta de 29332 sismos con magnitud superior a 2.5, ocurridos entre 1 de Junio de 1993 y el 30 de Julio de 2006. Este catálogo fue complementado con el catálogo sísmico actualizado a raíz del Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1997) para conformar un catálogo con un total de 34189 eventos con magnitud superior a 2.5 ocurridos entre 1541 y 2006.

En la Figura 2.1 se presenta un mapa general de Colombia con la ubicación de todos los sismos incluidos en el catálogo mencionado.

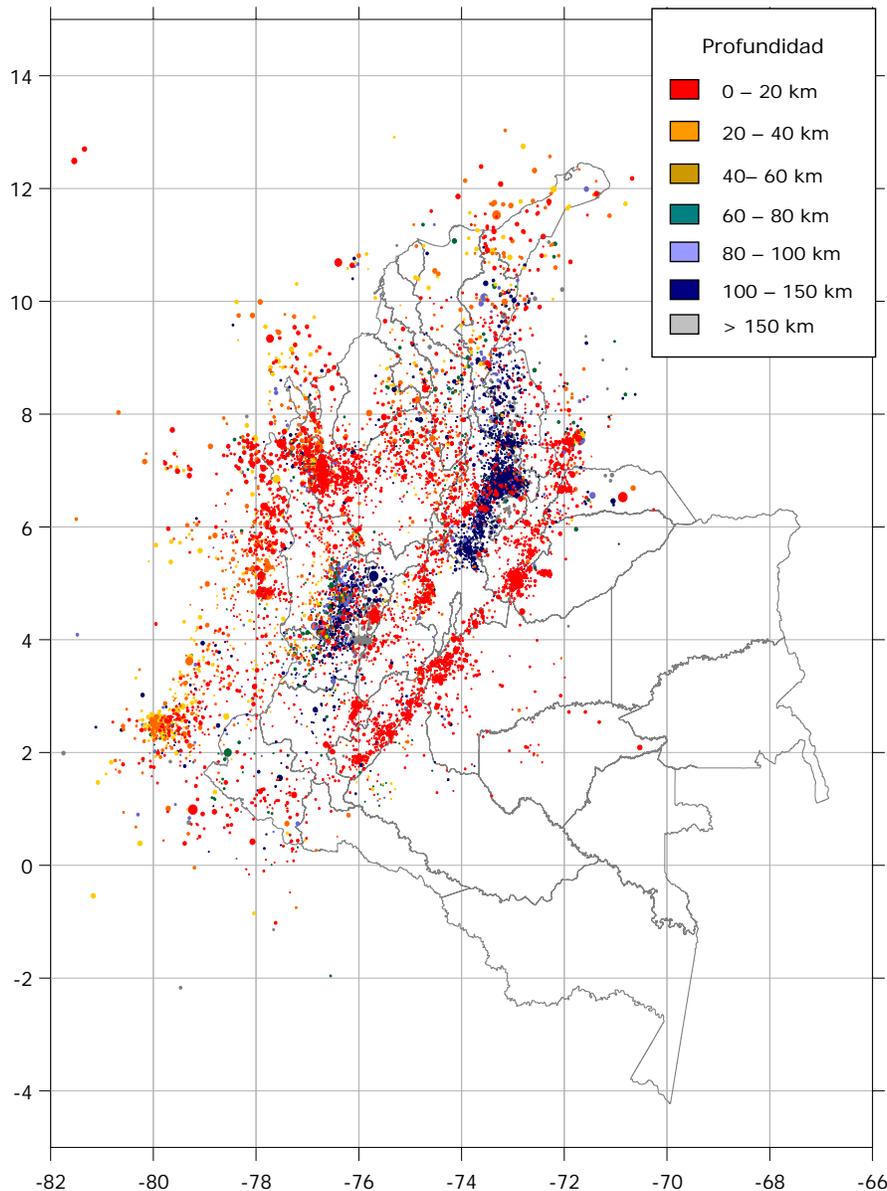


Figura 2.1 Distribución geográfica de los eventos que hacen parte del catálogo sísmico utilizado

Para el caso de la ciudad de Bogotá se presentan dos tipos de fuentes dominantes. En primer lugar están las fuentes cercanas e intermedias que establecen una amenaza significativa como es el caso de las fallas Frontal de la Cordillera Oriental, Salinas, La Cajita e Ibagué. Otro tipo de fuentes que afectan la ciudad de Bogotá son las fuentes existentes a mayores distancias pero con gran capacidad de liberación de energía como la zona de Benioff y la zona de Subducción.

Con base en la información recopilada se realiza la estimación de la amenaza en terreno firme (sin considerar los efectos de sitio) para la ciudad de Bogotá. En la Figuras 2.2 y 2.3 se presenta un esquema de la metodología empleada para el cálculo de la amenaza sísmica.

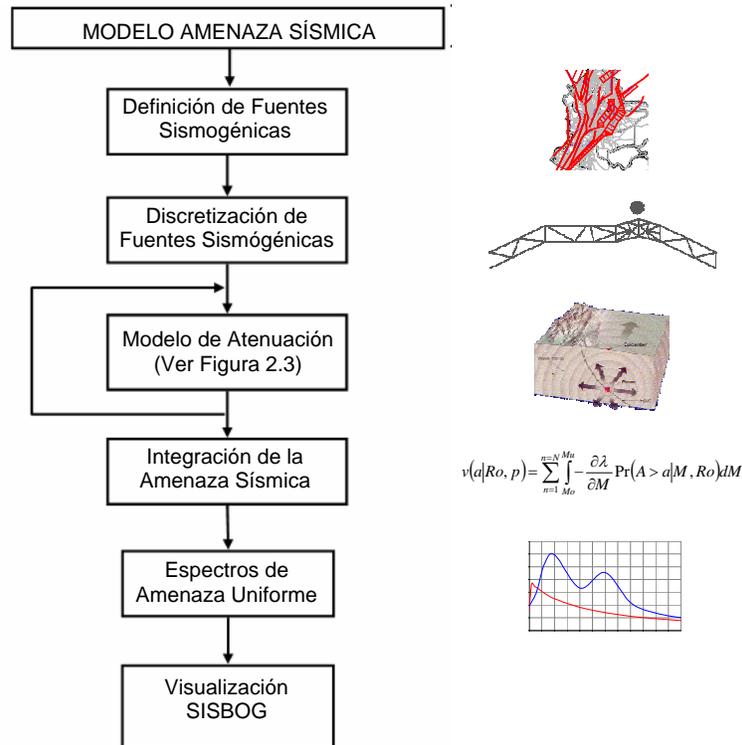


Figura 2.2 Resumen de la metodología para el cálculo de la amenaza sísmica

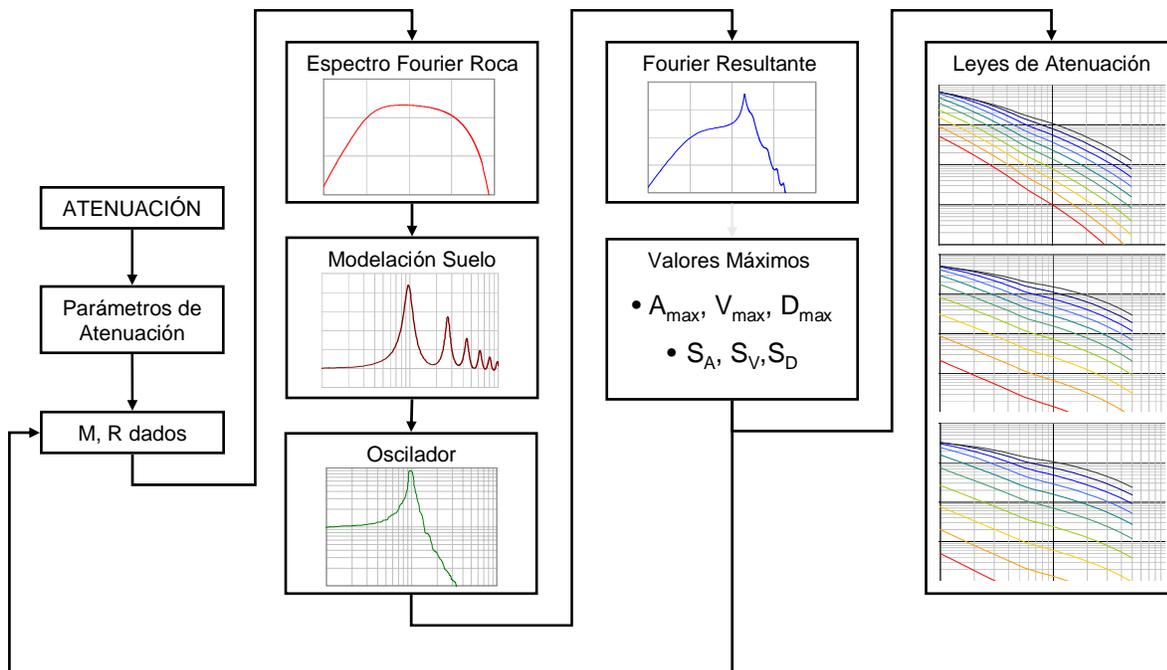


Figura 2.3 Resumen de la metodología para el cálculo de la amenaza sísmica. Modelo de atenuación

A continuación se presentan las características sismológicas de las fuentes empleadas en el análisis que constituyen una base de sistemas sismogénicos a nivel nacional. Las bases teóricas detalladas de las etapas de Atenuación, Integración de la Amenaza Sísmica y Espectros de Amenaza Uniforme se encuentran en el Anexo 2.1 de esta sección.

2.3 PARÁMETROS DE SISMICIDAD PARA LAS FUENTES EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS

2.3.1 Parámetros de sismicidad

Cada una de las fuentes sismogénicas se caracteriza mediante una serie de parámetros de sismicidad los cuales se determinan con base en la información sísmica disponible. Los parámetros definidos son los siguientes:

- Recurrencia de magnitudes: se identifica mediante el parámetro β que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que M , versus magnitud sísmica M) en la zona de magnitudes bajas.
- Magnitud máxima: se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfotectónicas.
- Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que 4.0: corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que 4.0 que ocurren en una determinada fuente.

2.3.2 Fuentes sísmicas empleadas

El modelo de cálculo de la amenaza sísmica se basa en la información de fuentes sismogénicas (fallas intraplaca y subducción) a nivel nacional, la información utilizada proviene del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1997). Los parámetros de las fuentes sísmicas nacionales son los mismos que los determinados en el estudio AIS (AIS, 1997) con la excepción de la zona de Benioff intermedia. El modelo de amenaza sísmica queda conformado por 34 fuentes. En la Tabla 2.1 se presentan los parámetros de caracterización de las fuentes activas usadas en el presente estudio. En la Figura 2.4 se presenta la distribución geográfica de las fuentes sismogénicas a nivel nacional.

Tabla 2.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes.

FUENTE	M_0	M_u	λ_0 (#eventos / año)	β	Prof. Prom(Km)
Arco de Dabeiba	4.0	6.5	0.21	1.043	30
Bahía Solano	4.0	7.5	0.606	0.988	28
Benioff Intermedia 1*	4.0	8.0	0.228	0.945	72
Benioff Intermedia 2*	4.0	8.0	0.152	0.945	72
Benioff Intermedia 3*	4.0	8.0	0.380	0.945	72
Benioff Profunda	4.0	7.5	6.450	1.643	165
Boconó	4.0	8.0	0.052	0.770	38
Bolívar	4.0	6.0	0.051	0.464	16
Bucaramanga-Sta Marta Norte	4.0	6.5	0.105	1.732	29
Bucaramanga-Sta Marta Sur	4.0	6.5	0.264	1.474	39
Cauca	4.0	7.0	0.132	0.700	26
Cimitarra	4.0	6.5	0.078	1.637	16
Compresión Sur Caribe-E	4.0	6.0	0.105	2.188	27
Compresión S. Caribe-O	4.0	6.0	0.131	1.209	27
Cuiza	4.0	7.0	0.105	1.274	24
Cucuana	4.0	7.0	0.011	0.9	23
Espiritu Santo	4.0	6.5	0.105	1.339	32
Fallas del Magdalena	4.0	7.0	0.078	1.852	19
Frontal Cordillera Oriental	4.0	8.0	1.160	0.988	22
Garrapatas	4.0	6.5	0.105	2.123	30
Ibagué	4.0	6.5	0.394	2.697	31
Junin-Sambiambi	4.0	7.0	0.052	1.384	33
Murindó-Atrato	4.0	7.5	0.843	1.057	18
Normal Panamá Pacífico	4.0	7.0	0.184	1.583	24
Oca	4.0	7.4	0.053	1.113	23
Palestina	4.0	6.5	0.132	1.344	21
Perijá	4.0	6.5	0.157	1.415	24
Puerto Rondón	4.0	6.5	0.078	0.616	19
Romeral	4.0	7.6	0.215	1.037	28
Romeral-Norte	4.0	6.5	0.052	0.849	40
Salinas	4.0	6.5	0.158	1.997	30
Sinú	4.0	6.0	0.105	0.531	23
Súarez	4.0	6.5	0.105	1.686	33
Subducción	4.0	8.6	7.890	1.393	26
Uribante-Caparo	4.0	7.0	0.079	0.758	18

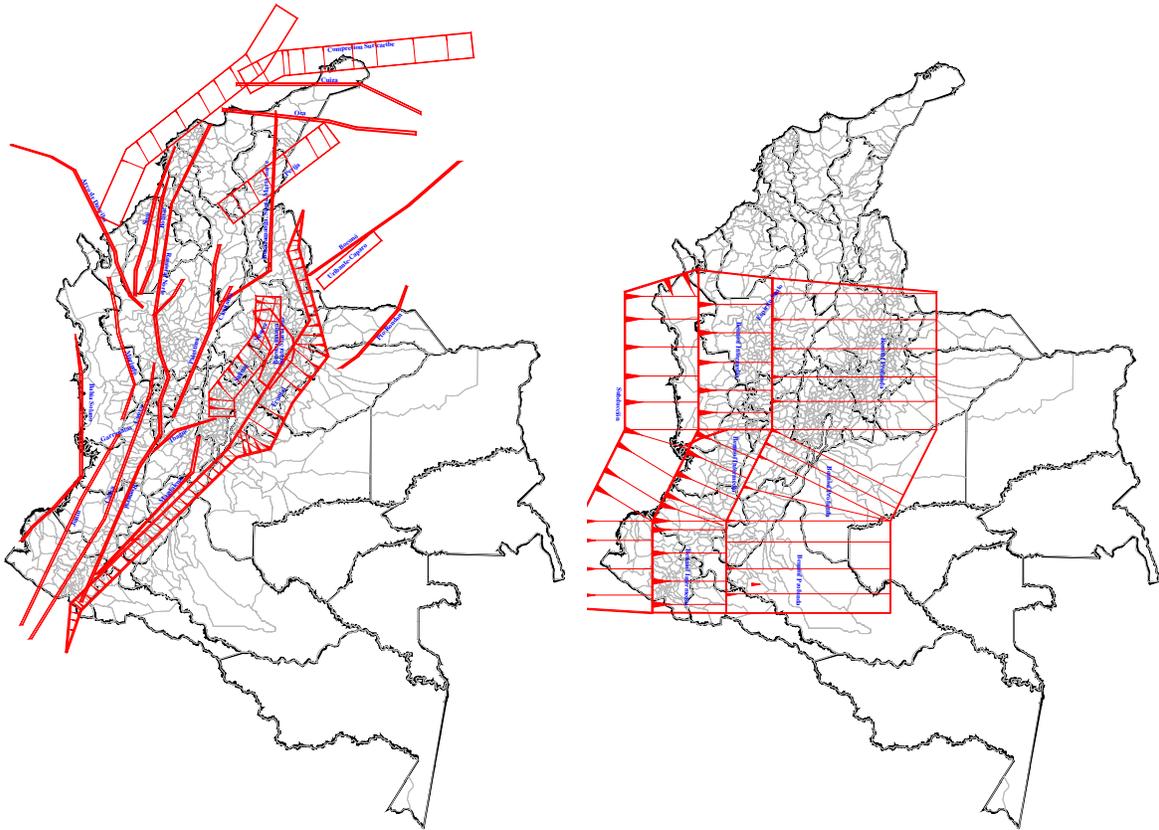


Figura 2.4 Localización geográfica de las fuentes sismogénicas a nivel nacional (AIS, 1997)

2.4 RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ

2.4.1 Amenaza sísmica para la totalidad de las fuentes sismogénicas

En este numeral se presentan los resultados de amenaza sísmica en terreno firme para la ciudad de Bogotá. Se presentan mapas de aceleración máxima, velocidad máxima y desplazamiento máximo del terreno.

Los mapas de amenaza que se presentan corresponden a la respuesta esperada en las formaciones geológicas competentes, con velocidades de onda de cortante en el orden de 800 m/seg o más o con valores del ensayo de penetración estándar, SPT, igual o superior a 50 golpes/pie. Al llegar a estos estratos, la onda sísmica se propagará dentro del subsuelo superficial generalmente menos rígido y competente, hasta alcanzar la cimentación de las estructuras o simplemente el nivel del terreno.

Estos depósitos superficiales relativamente más blandos modifican la señal tanto en amplitud como en contenido frecuencial y duración, básicamente en función del contraste que se presente entre el depósito superior y los inferiores referidos. Esta variación de la señal sísmica conforma el llamado efecto de sitio que desempeña en general un papel fundamental en la magnitud de las fuerzas sísmicas que pueden llegar a sacudir las obras de infraestructura en el futuro y que es la motivación principal de los estudios de microzonificación sísmica de ciudades. La evaluación de estos efectos se presenta en el Capítulo 4 de este informe.

2.4.1.1 Mapas de Amenaza Sísmica

En la Figura 2.5 se presenta la distribución de la aceleración máxima en terreno firme para un periodo de retorno de 475 años. La distribución regional de la aceleración en terreno firme (Figura 2.5) permite visualizar la influencia de cada fuente en la amenaza sísmica departamental. Se hace evidente que la mayor contribución de amenaza corresponde a la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, la cual se encuentra a pocos kilómetros de la ciudad.

Por otro lado las Figuras 2.6, 2.7 y 2.8 presentan la distribución de la aceleración, velocidad y el desplazamiento máximo del terreno respectivamente para la zona urbana Bogotá.

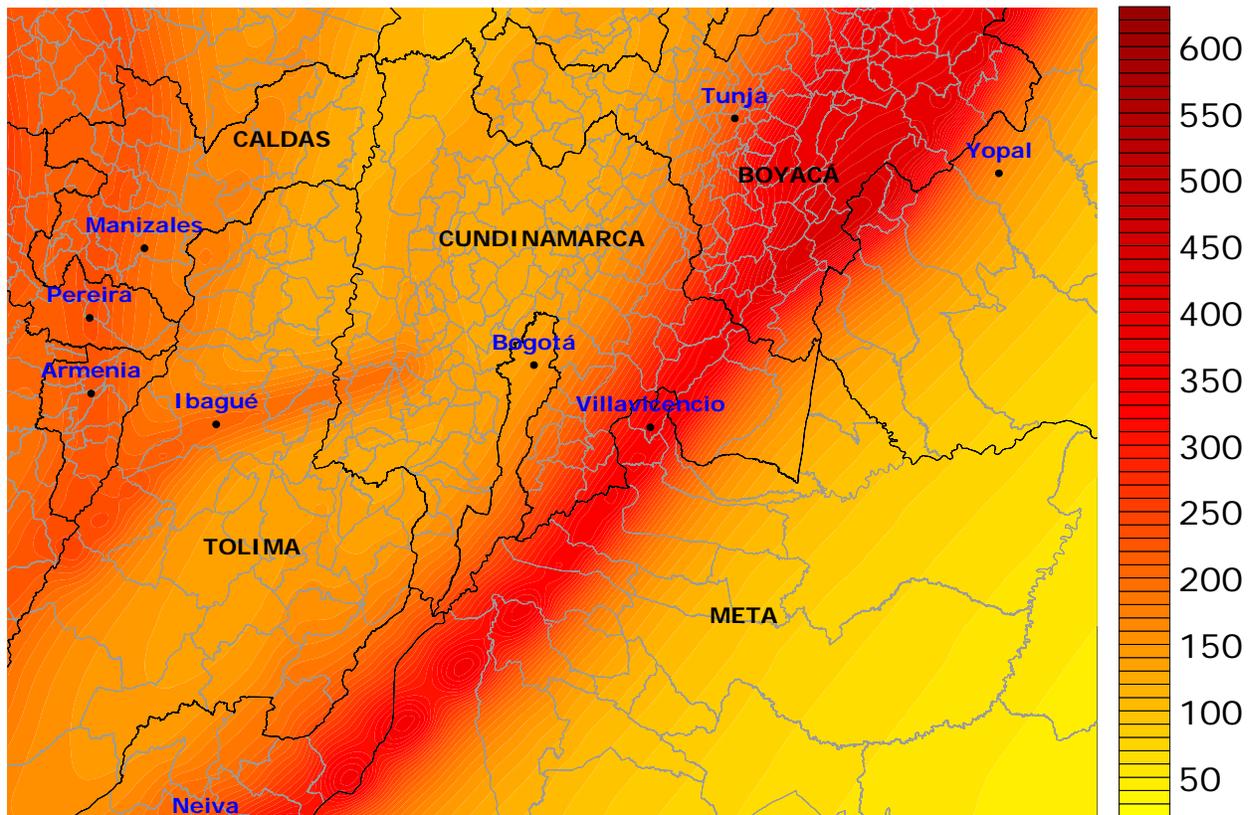


Figura 2.5 Distribución de la aceleración máxima en terreno firme [cm/s²] a nivel departamental (Periodo de Retorno de 475 años)

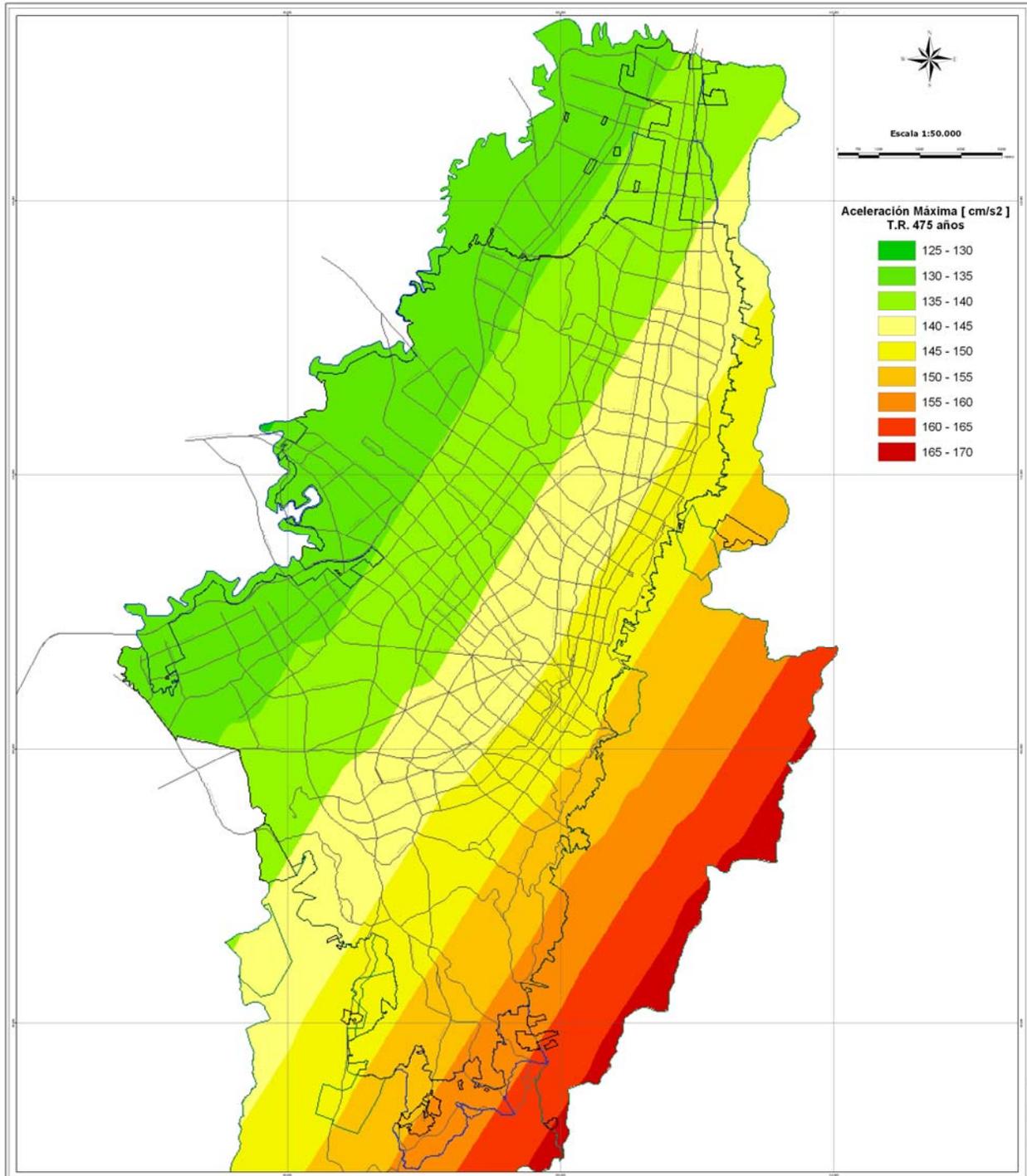


Figura 2.6 Distribución de la aceleración máxima en terreno firme [cm/s²] para la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)

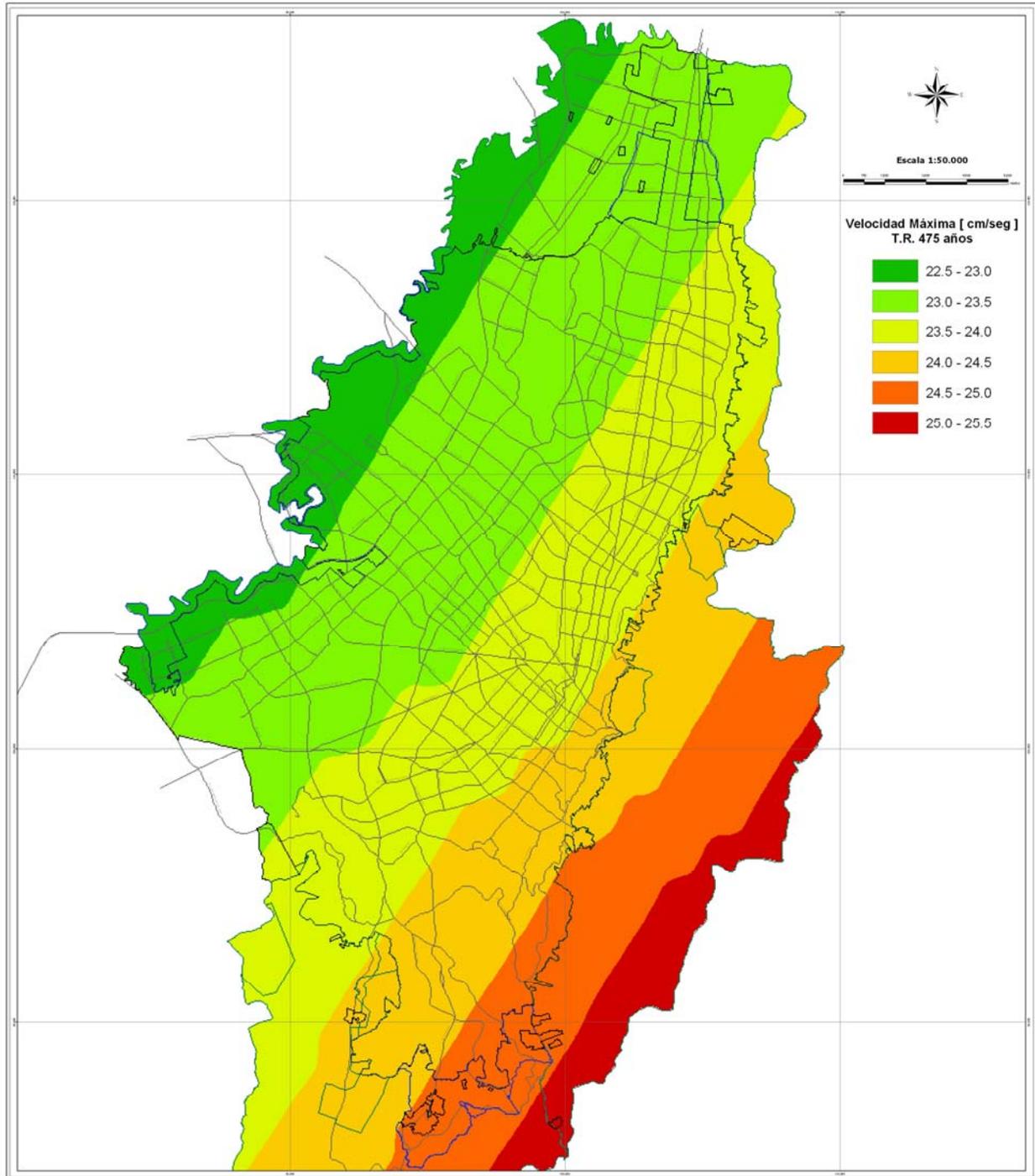


Figura 2.7 Distribución de la velocidad máxima en terreno firme [cm/s] en la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)

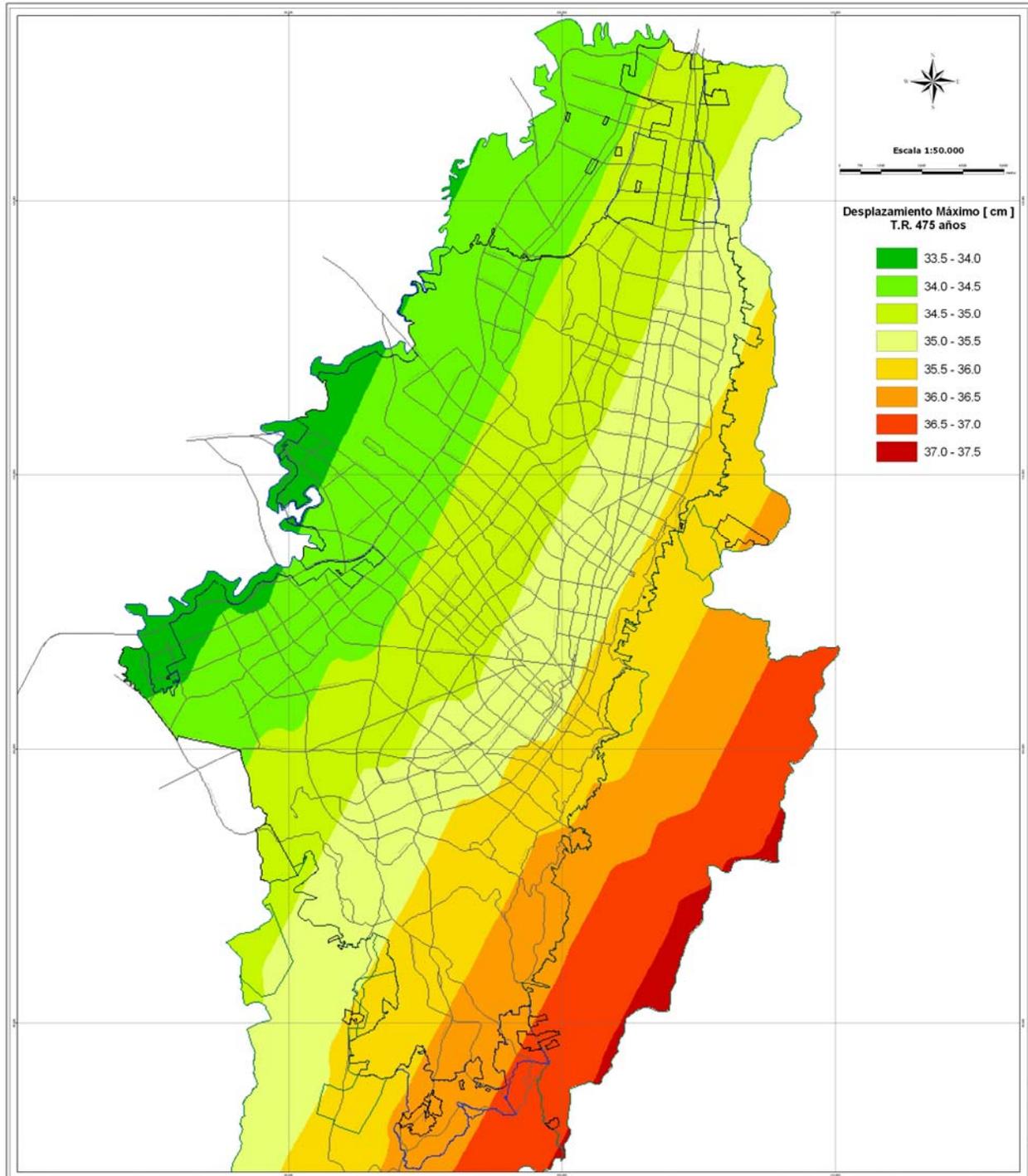


Figura 2.8 Distribución del desplazamiento máximo en terreno firme [cm] en la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)

2.4.1.2 Tasas de Excedencia y aceleraciones máximas en terreno firme

En la Figura 2.9 se presentan las tasas de excedencia en terreno firme de la aceleración máxima del suelo para cada una de las fuentes que aportan amenaza a la ciudad de Bogotá. En la misma Figura se presenta además la tasa total, es decir, la que resulta de sumar las contribuciones de todas las fuentes, para la aceleración máxima sobre terreno firme. Si sobre la Figura 2.9 se establece una tasa de excedencia para un estado de funcionalidad determinado es posible trazar líneas horizontales que intersectan las curvas de las tasas de las diferentes fuentes que aportan amenaza a la ciudad. Por ejemplo, al establecer un periodo de retorno de 475 años como se explicó anteriormente, (tasa de 0.0021 sismos/año) resulta posible encontrar los puntos de aceleración máxima de cada fuente sobre la ciudad. Además siguiendo la teoría clásica de amenaza sísmica es posible calcular la amenaza total de la contribución de todas las fuentes en la ciudad. i

Para un período de retorno de 475 años se obtiene una aceleración máxima probable en terreno firme del orden de 0.17 g (170 gales) en la ciudad de Bogotá la cual debe compararse con la aceleración local máxima probable de 0.20 g establecida en el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia adelantado por la AIS y adoptada por el Decreto Reglamentario 33 de 1999 de la Ley 400 de 1998.

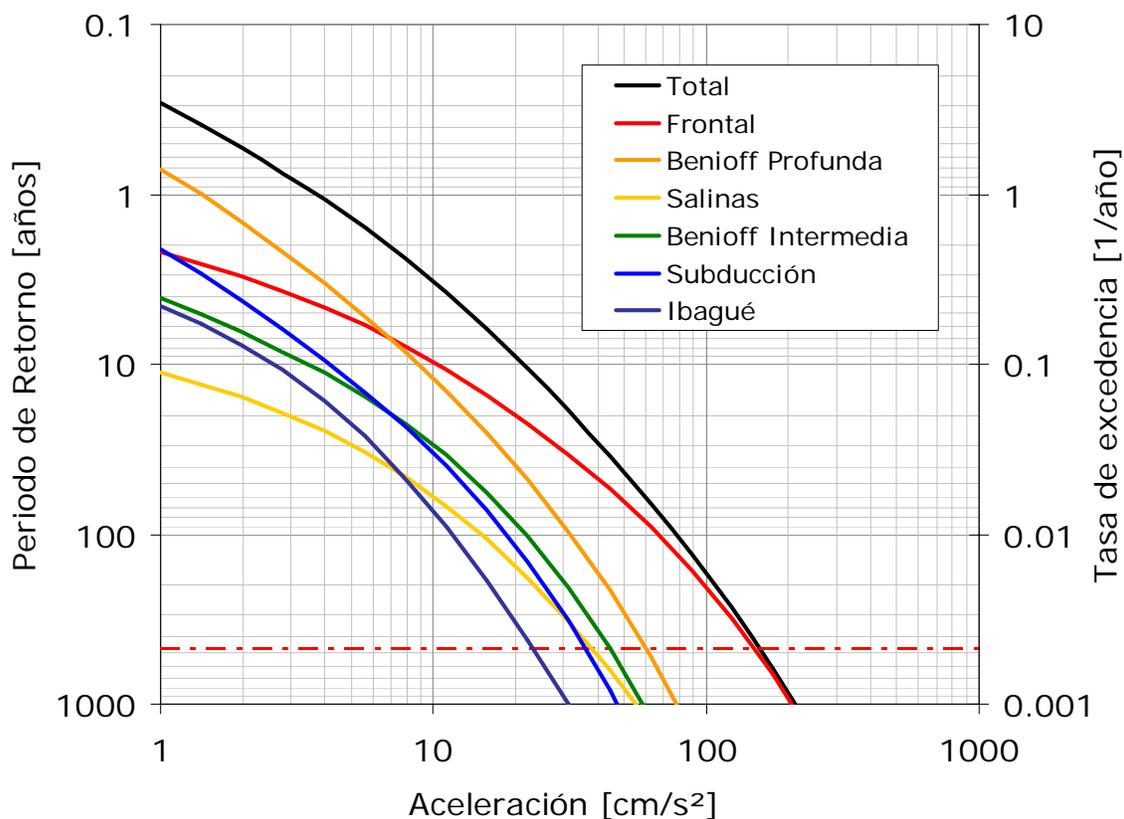


Figura 2.9 Curva de Amenaza para la ciudad de Bogotá

2.4.1.3 Participación por fuente en la amenaza en terreno firme

La participación relativa de cada una de las fallas se presenta en la Figura 2.10. En esta figura se indica en términos de porcentaje la importancia relativa de la aceleración máxima del suelo de las fuentes que aportan amenaza a la ciudad para un periodo de retorno de 475 años. Sin embargo estas contribuciones varían considerablemente dependiendo del contenido frecuencial y de la distancia media de las fuentes, por lo que dicha participación puede verse afectada para tasas de excedencia en períodos estructurales medios y altos.

El cálculo anterior se realizó para unas coordenadas específicas en el centro de la ciudad. Sin embargo es de mucha importancia conocer la distribución geográfica de la amenaza para terreno firme dentro de la región donde se encuentra circunscrita esta, por lo cual el cálculo de las tasas de excedencia se amplió para toda la región. De acuerdo con esto es posible generar mapas de igual tasa de excedencia (o periodo de retorno) de la intensidad de interés, en este caso mapas de aceleración máxima del suelo para diferentes periodos de retorno.

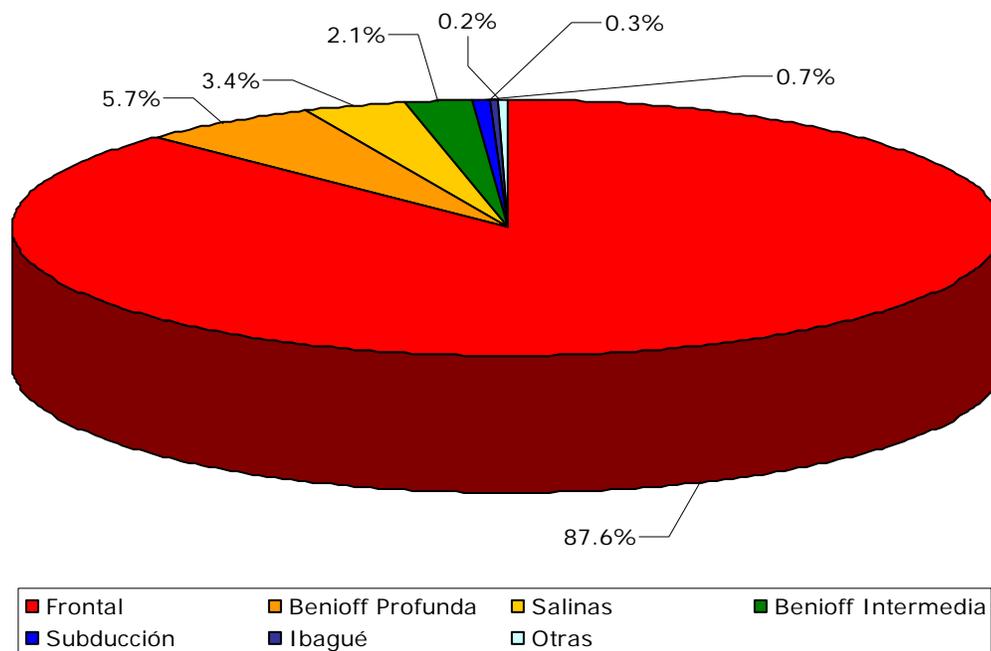


Figura 2.10 Distribución de la amenaza por fuentes para la ciudad de Bogotá

2.4.1.4 Desagregación de la amenaza por magnitud y distancia

En la Figura 2.11 se presenta la desagregación de la amenaza sísmica en función de las diferentes combinaciones de magnitud y distancia para un periodo de retorno de 475 años. Se observa como los eventos que tienen una mayor contribución en la amenaza son aquellos con magnitudes entre 4.3 y 5.1 con distancias hipocentrales entre 175 y 225 km, y eventos con magnitudes entre 5.4 y 6.5 con distancias hipocentrales entre 350 y 400 Km.

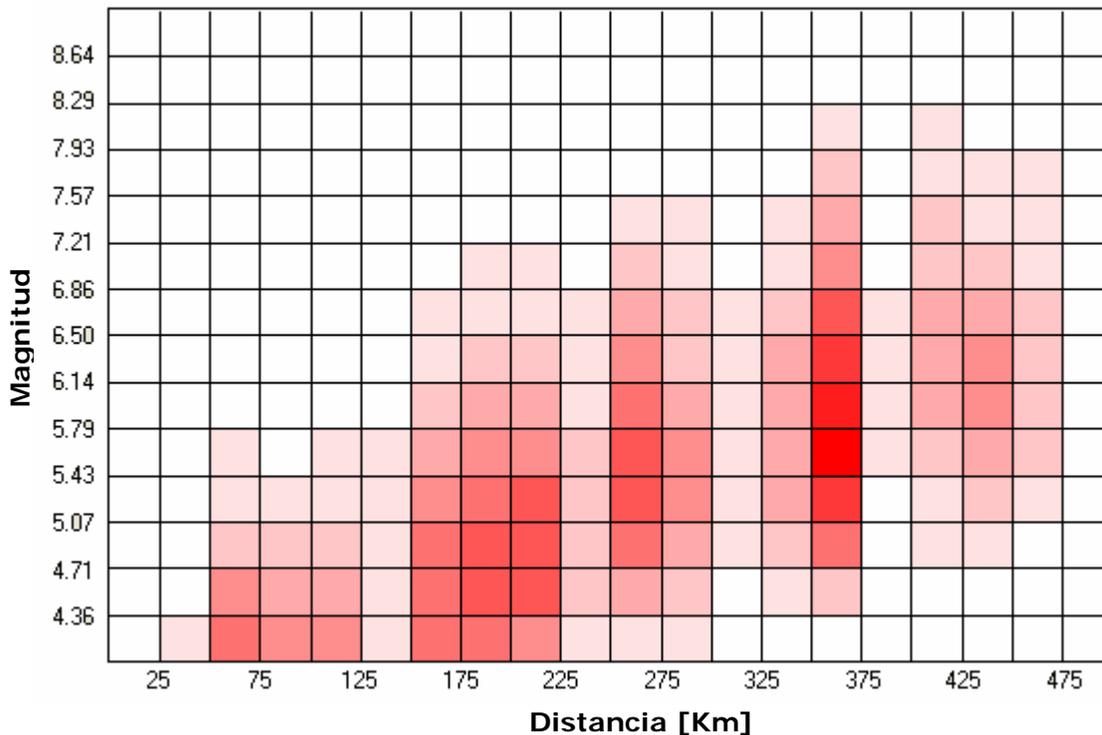


Figura 2.11 Distribución de la amenaza para la ciudad de Bogotá en función de la magnitud y la distancia

2.4.1.5 Espectros de amenaza uniforme en terreno firme

Un análisis clásico de amenaza sobre las leyes de atenuación espectrales de aceleración (Ver Anexo 2.1), permite encontrar las tasas de excedencia de diferentes parámetros sísmicos. En las Figuras 2.12 a 2.14 se presentan los espectros de amenaza uniforme para terreno firme calculados a diferentes períodos de retorno para la ciudad de Bogotá en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral.

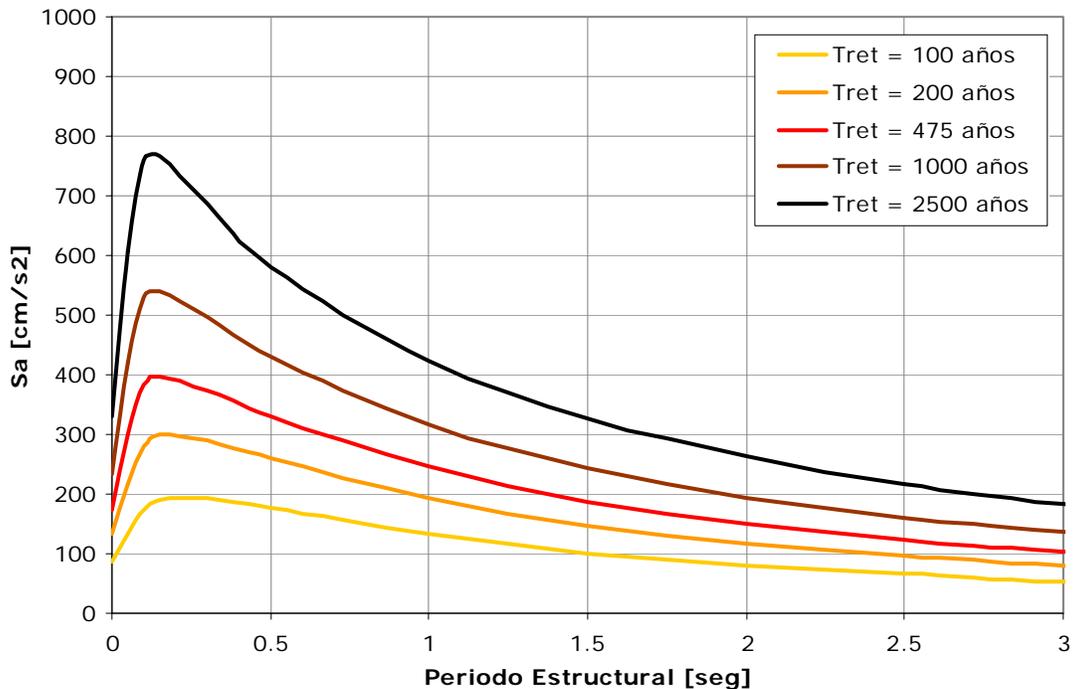


Figura 2.12 Espectros de peligro uniforme en términos de aceleración espectral

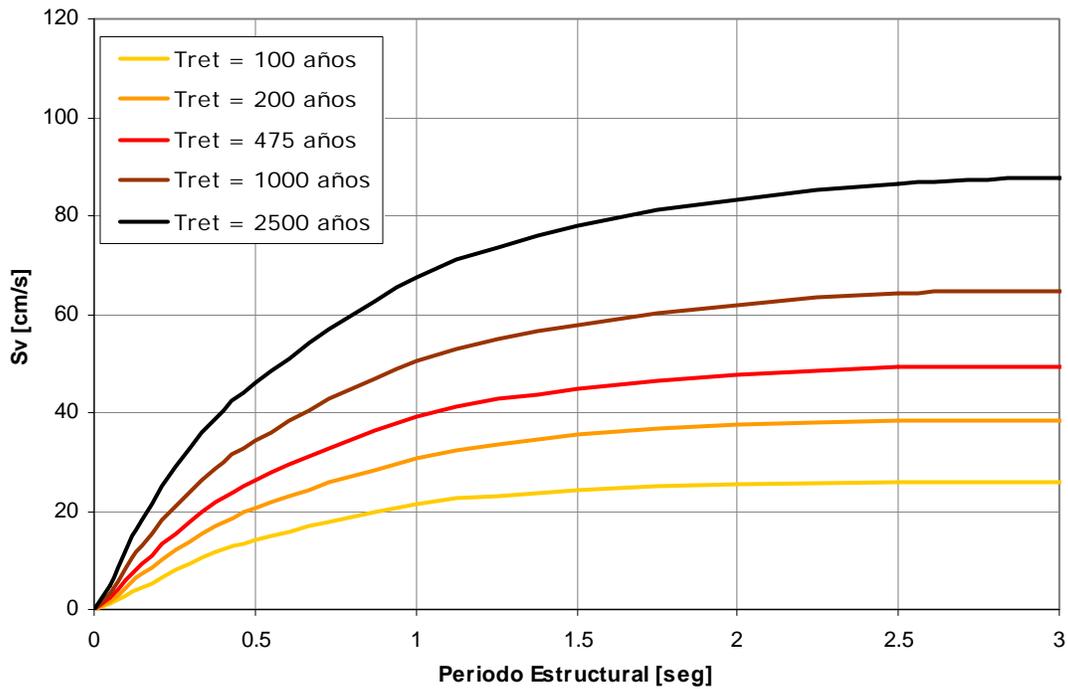


Figura 2.13 Espectros de peligro uniforme en términos de velocidad espectral

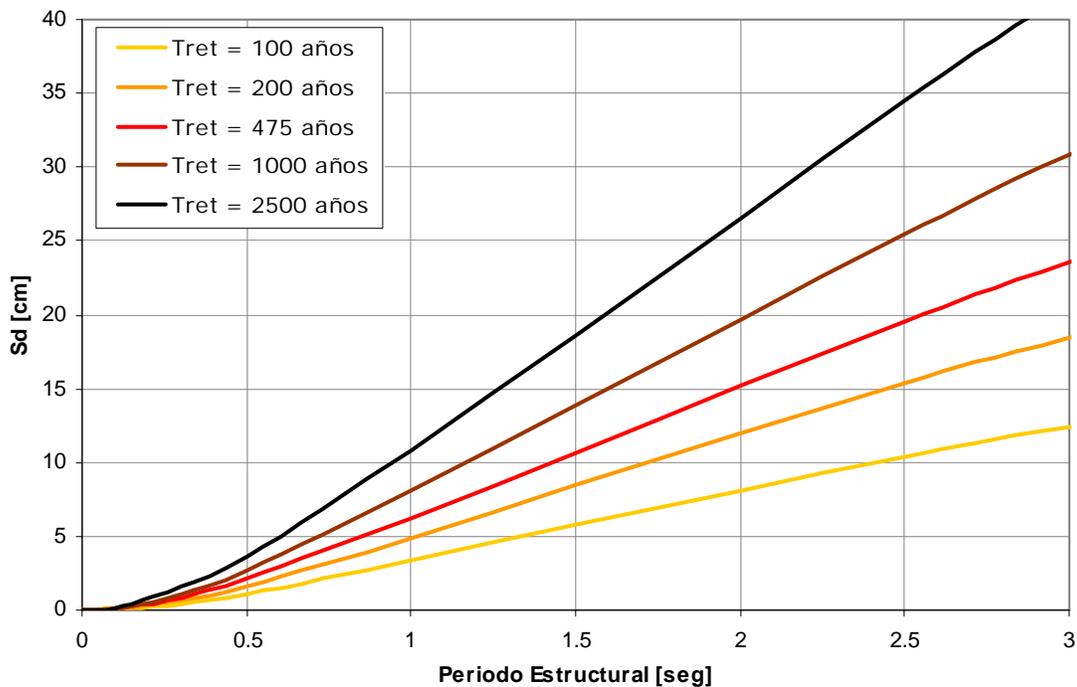


Figura 2.14 Espectros de peligro uniforme en términos de desplazamiento espectral

2.5 COMENTARIOS SOBRE LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La evaluación de la amenaza sísmica a nivel nacional se adelantó en el año 1997 mediante el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia llevado a cabo por la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS. Este estudio sirvió de punto de referencia a nivel nacional en relación a la metodología a seguir en este tipo de estudios. Los resultados del mismo sirvieron de base para la adopción de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, Decreto 33 de 1998, las cuales son de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.

El presente proyecto presenta una metodología de evaluación de la amenaza sísmica más moderna, completa y rigurosa, especialmente en el tratamiento de la incertidumbre general de las variables, aunque en términos generales se basa en la misma información que la anterior. Adicionalmente se cuenta en la actualidad con bases de datos un poco más completas y con algunos estudios locales que permiten mejorar en algún grado la confiabilidad general de resultados con respecto a modelos previos. Sin embargo y considerando que no se han producido eventos sísmicos importantes que modifiquen las bases conceptuales existentes, no es de preverse la ocurrencia de cambios drásticos en los resultados de amenaza de la zona.

La metodología permite en cambio generar información complementaria muy útil en términos de diferentes parámetros de amenaza tales como aceleraciones, velocidades y desplazamiento, parámetros que pueden llevarse a nivel de la roca base y a nivel de la superficie del terreno mediante una metodología consistente y rigurosa. Se plantean así leyes de atenuación de los diferentes parámetros (variación del parámetro con la distancia y la magnitud del sismo) incluso hasta el nivel de la aceleración espectral de respuesta estructural en condiciones no lineales. Estos parámetros, totalmente consistentes con los anteriores, permiten adelantar los diseños de diferentes componentes de la infraestructura con los parámetros sísmicos que mejor representan su respuesta sísmica (como es el caso de la velocidad para tuberías enterradas, aceleraciones para edificaciones menores de 1 y 2 pisos o desplazamientos para edificaciones de altura o puentes).

Algunas de las hipótesis o características del modelo de amenaza sísmica implementado, en comparación con los modelos anteriores, son las siguientes:

- La probabilidad que el foco del sismo se presente en cualquier punto de la falla es uniforme. El modelo utiliza esta suposición para dividir cada una de las fuentes sísmicas en pequeños triángulos (con menores dimensiones entre más cerca se esté del punto de análisis) y así poder suponer que estas subfuentes son fuentes puntuales.
- El sismo se origina en el foco y se propaga simétricamente a ambos lados del foco es decir el patrón de atenuación es esférico, por lo que en el modelo no existen diferencias entre los valores de aceleración horizontal en dos componentes ortogonales.
- El valor de cualquier parámetro de intensidad en el sitio de interés es una función de la magnitud y la distancia más corta entre la distancia de ruptura y el sitio de análisis (distancia hipocentral). La relación que existe entre estas variables está representada en las leyes de atenuación.
- El modelo utiliza planos inclinados para representar las fuentes sísmicas lo que permite tener en cuenta el buzamiento de las fallas. Los modelos anteriores utilizaban en general modelos de falla de línea ubicados a una profundidad constante a lo largo de la falla.

Esta refinación en el modelo minimiza los problemas asociados al análisis para sitios muy cercanos a las fuentes sísmicas.

- Los resultados de amenaza en terreno firme son muy sensibles a la variación de parámetros tales como la magnitud última y la distancia promedio de las fuentes sísmicas al punto de análisis. En este punto se requiere un gran esfuerzo para mejorar la calidad de la información neotectónica, en especial lo relacionado con la geometría tridimensional de la falla y con la caracterización de magnitudes máximas, lo cual solo puede realizarse mediante trabajos de campo que incluyan la realización de trincheras en las zonas de fallas activas.

Aspectos adicionales que deben analizarse se centran en la determinación de los períodos de retorno para el diseño. Ha sido usual en Colombia trabajar con 475 años que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% en un lapso o tiempo de exposición de 50 años. Este período de referencia ha sido tomado de la normativa americana que ha usado este valor por varias décadas. Sin embargo recientemente se han empezado a utilizar periodos de retorno diferentes a los tradicionalmente empleados. El caso de Estados Unidos se fundamenta en la necesidad de contar con mapas de amenaza para eventos de alta capacidad destructiva para la evaluación de daños potenciales de compañías de seguros. En dichos casos se han utilizado mapas para períodos de retorno de 2500 años. Por otro lado en el caso de México se utilizan periodos de retorno para el diseño de estructuras por debajo de los 475 años. Este es un aspecto que requiere evaluación cuidadosa a nivel de política y normativa nacional.

2.6 BIBLIOGRAFÍA

Aguilar A., Arboleda J. & Ordaz M., 1999. Programa Crisis 99. Programa para calcular el Riesgo Sísmico.

Aki, K., 1988. Local Site Effects on Ground Motions, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II- Recent Advances in Ground motion Evaluation, J.L. Von Thun (Editor), Geotechnical Special Publication No.20, Am. Soc. Civil Eng, New York, 103-155.

Ambraseys, N. N., & Tchalenko, J. 1927. Documentation of Faulting Associated With Earthquakes, Part I

Ambraseys, N. N., 1959. A note on the response of an elastic overburden of varying rigidity to an arbitrary ground motion, Bulletin of the Seismic Society of America, Vol. 49, No. 3, July 1959, pp. 211-220.

Ambraseys, N. N., 1960. On the seismic behaviour of earth dams Proceedings 2nd World Conference Earthquake Engineer, Tokyo, Japan, Vol II.

Ambraseys, N. N. & Sarma, S. K., 1967. The response of earth dams to strong earthquakes Geotechnique, Vol. 17 No 3, September 1967, pp. 181 – 213.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1997. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia.

Bath, M. 1973. Introduction to Seismology, John Wiley and Sons.

Centro Regional de Sismología Para América del Sur. 1985. Proyecto SISRA, Sismicidad Regional Andina, Lima, Perú 1985.

Clough, R. W., & Chopra, A. K., 1966. Earthquake stress analysis in earth dams, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.92, EM2, Proceedings Paper 4793, April 1966, pp. 197-212.

Comunidad Económica Europea-Ingeominas., 1992. Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán, Publicaciones Especiales Ingeominas #2, 1992.

Coppersmith, K. J., 1981. Probabilities of earthquake occurrences on San Andreas Fault based on geological risk. EOS, Vol. 62, No 17, pp.322.

Coppersmith, K. J. & Youngs R. R., 1986. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments with intraplate tectonic environments. Proceedings, 3rd U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Charleston, South Carolina, Vol. 1, pp. 301-312.

Corporación Autónoma Regional del Quindío, CRQ. Microzonificación Sísmica Preliminar de la Ciudad de Armenia – Quindío, Universidad de los Andes, Julio de 1997.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDES, 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.

Der Kiureghian, A. & Ang, H. S. 1975. A Line Source Model for Seismic Risk Analysis, University of Illinois, Series N419.

Donovan, N. C. 1973. Earthquake hazards for buildings Building practice for hazard mitigation, building Science Series 46 U.S. Department of Commerce Bureau of Standards.

Espinosa, A. 1996. Sismicidad histórica, Proyecto para la mitigación del riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal”, Carder - Universidad del Quindío.

Ferraro, A. 1983. Características de los Sismos Colombianos, Universidad de los Andes, IC

Gallego M. & Ordaz M. 1999. Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuente y teoría de vibraciones aleatorias, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín técnico no. 53, Julio de 1999.

Gutenberg, B & Richter, C. F. 1942. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 46, pp. 104 – 145.

Housner, G. W., 1970. Strong Ground Motion, Prentice Hall Inc..

Ingeominas, 2.000. Geología de la Plancha 264 Espinal. Escala 1:100.000. Bogotá.

Ingeominas, Red Sismológica Nacional de Colombia RSNC, Catálogo de eventos sísmicos del territorio colombiano. Consulta en línea. 2006

Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2004. SIGHypo V 1.1.46 – Catálogo Histórico de Eventos Sísmicos para Colombia.

Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana, Consultoría Colombiana S.A., Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué, 2000.

ITEC Ltda. Actualización de la Información Sísmica de Colombia 1988. , Informe preparado para ISA.

Kanai, K., 1950. The effect of solid viscosity of surface layer on the earthquake movements, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 28, 1950, pp. 31-35.

Kanai, K., 1952. Relation between the nature of surface layer and the amplitude of earthquake motions, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 30, 1952, pp. 31-37.

Kanai, K., 1961. An empirical formula for spectrum of strong earthquake motions, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 39.

Kramer, S. L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Oficina para la Prevención de Emergencias OPES, Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres DNPAD, INGEOMINAS, UNIANDES., 1996. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Subproyecto No 11 Zonificación Sísmica..

Newmark, N. & Rosenblueth, E., 1972. Fundamental of Earthquake Engineering, Van Nostrand.

Newmark, N; Blume, J.; Kapur, K. 1973. Design Response Analysis For Nuclear Reactor Power Plants, Seminario Int. Ingeniería Sísmica, Universidad de los Andes.

Newmark, N.; Hall, W. 1982. Earthquake, Spectra and Design, EERI Monograph Series.

Observatorio Sismológico del Sur Occidente Colombiano, OSSO, 2004. Catálogo Sísmico Preliminar Red SW Colombiano 1987 – 1992. Octubre 2004.

Ojeda, A. E. & Martínez, S. E., 1999. Modelo para la atenuación de la energía sísmica en Colombia a partir de sismos registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín técnico No. 53, Julio de 1999.

Ordaz, M., 1999. Notas de clase de Ingeniería sísmica, Universidad de los Andes.

Page, W.D., & James, M.E. 1981. Tectonic subsidence and evidence for the recurrence of large magnitude earthquakes near Bahía Solano, Colombia, Resúmenes, III Congreso Colombiano de Geología, Medellín: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, Sociedad Colombiana de Geología and Universidad Nacional de Colombia. p. 19.

Page, W.D., 1983. Popayán earthquake of March 31, 1983, geologic and seismologic aspects. Newsletter, Earthquake Engineering Research Institute v.17 No. 4, pag. 51-53.

Page, W.D. 1986. Seismic geologic and seismicity of Northwestern Colombia informe ISA. pag. 156.

París, G & Marín, P., 1979. Generalidades acerca de la Geología del Departamento del Cauca. INGEOMINAS. Popayán. p.39.

París, G., Marín, W., Romero, O. & Wagner, J.J., 1989. Actividad Neotectónica en el Suroccidente de Colombia. Memorias Seminario Taller sobre Desastres Naturales. Popayán noviembre 1-4 de 1989, en prensa. 1989

París, G., Marín, W., Sauret, B., Bles, J.L., & Vergara, H., 1992. Rasgos Morfotectónicos en la zona de Popayán y alrededores. Memorias I Seminario Andino de Geología Ambiental. I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. III Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia.

París, G. & Sauret, B., 1993. Subproyecto Neotectónica. Proyecto Colombo Europeo No. CCE NA 84/03. INGEOMINAS-BRGM-ADK-KS Microzonificación Sismogeotectónica de Popayán (en preparación). París, G. Sismotectónica del Occidente de Colombia, dentro del proyecto Gersco, Ingeominas 1993.

Paris, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia its Offshore Regions. USGS Open-File report 00-0284. Map at 2,500,000 scale and report, 66 pp.

Pennington, W. 1981. La Subducción de la Cuenca Oriental de Panamá y la Sismotectónica del Noroeste de Sur América, Proyectos Nariño II y III Instituto Geofísico de los Andes Colombianos. Bogotá 1981.

República de Colombia. 1998. Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98.

Richter, C. F. 1958. Elementary Seismology, W. H. Freeman Company.

Sarria, A. 1984. Tectónica y Sismicidad Colombianas, Seminario Sobre Riesgo Sísmico y el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, Medellín 1984.

Sarria, A. 1990. Ingeniería Sísmica, Ediciones Uniandes.

Schnabel, B; Lysmer, J; Seed, H. B. 1972. SHAKE A Computer Program for the Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, University of California, Berkeley, EERC Report 72-12-1972.

Slemmons, D.B. 1977. State of the Art for assessing earthquake hazards in the Unites States – U.S. Army Miscellaneous paper S. 73.I.

Slemmons, D.B. 1977. Faults and earthquake magnitude, Miscellaneous Paper S-73, report 6, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 129 pp.

Slemmons, D.B. 1982. Determination of design earthquakemagnitudes for microzonation. Proceedings, 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, Washington, Vol. 1, pp. 119 -130.

Toussaint, H. F. & Restrepo, J. J., 1989. Terrenos Alóctonos en los Andes Colombianos; Explicación de algunas paradojas Geológicas, Quinto Congreso Colombiano de Geología; Bucaramanga 1989. Memorias publicadas por Ingeominas.

Toussaint, H. F. & Restrepo, J. J., 1989. Acreciones Sucesivas en Colombia. Un Nuevo Modelo de Evolución Geológica. Quinto Congreso Colombiano de Geología; Bucaramanga 1989. Memorias publicadas por Ingeominas.

U.S GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 1045. Lessons Learned from the Loma Prieta Earthquake, October 17, 1989, first printing.

Wastergaard, H. M., 1993. Earthquake shock transmission in tall buildings, Engineering Newsrecord, Vol. III, pp. 654-656, November 1933.

Woodward-Clyde Consultants. 1983. Seismic Hazard Evaluation Calima III Proyect, Colombia: unpublished report for Integral-Planes and ISA. 116 pp, plus appendices and figures.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 2 AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME	2-1
2.1 GENERALIDADES	2-1
2.2 INFORMACIÓN SÍSMICA DISPONIBLE.....	2-3
2.3 PARÁMETROS DE SISMICIDAD PARA LAS FUENTES EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS.....	2-7
2.3.1 Parámetros de sismicidad	2-7
2.3.2 Fuentes sísmicas empleadas	2-7
2.4 RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ.....	2-10
2.4.1 Amenaza sísmica para la totalidad de las fuentes sismogénicas	2-10
2.5 COMENTARIOS SOBRE LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS	2-20
2.6 BIBLIOGRAFÍA.....	2-22
ANEXO 2.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE AMENAZA SÍSMICA	

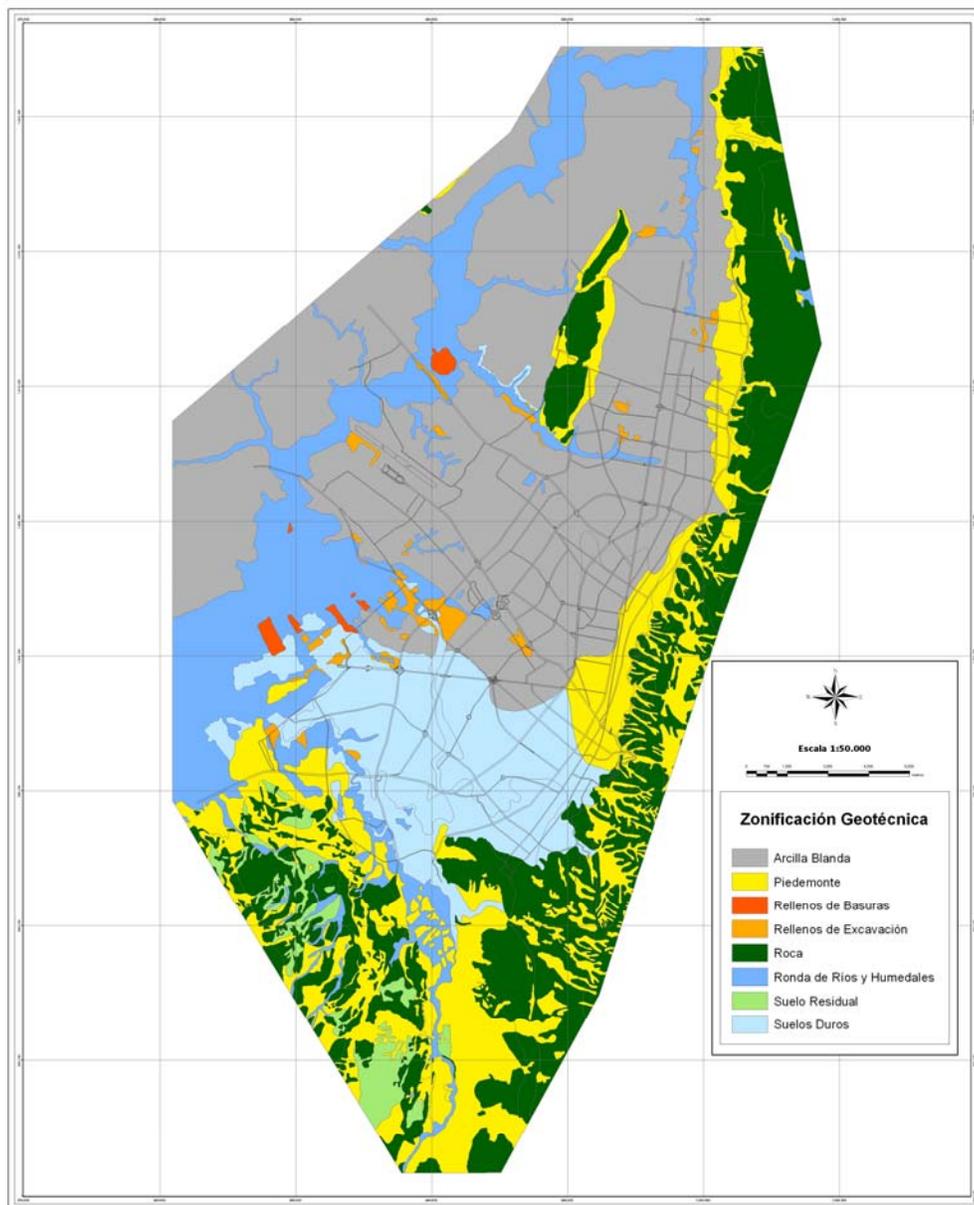
LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribución geográfica de los eventos que hacen parte del catálogo sísmico utilizado	2-4
Figura 2.2 Resumen de la metodología para el cálculo de la amenaza sísmica	2-5
Figura 2.3 Resumen de la metodología para el cálculo de la amenaza sísmica. Modelo de atenuación .	2-5
Figura 2.4 Localización geográfica de las fuentes sismogénicas a nivel nacional (AIS, 1997)	2-9
Figura 2.5 Distribución de la aceleración máxima en terreno firme [cm/s ²] a nivel departamental (Periodo de Retorno de 475 años)	2-11
Figura 2.6 Distribución de la aceleración máxima en terreno firme [cm/s ²] para la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)	2-12
Figura 2.7 Distribución de la velocidad máxima en terreno firme [cm/s] en la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)	2-13
Figura 2.8 Distribución del desplazamiento máximo en terreno firme [cm] en la ciudad de Bogotá (Periodo de Retorno de 475 años)	2-14
Figura 2.9 Curva de Amenaza para la ciudad de Bogotá	2-15
Figura 2.10 Distribución de la amenaza por fuentes para la ciudad de Bogotá	2-16
Figura 2.11 Distribución de la amenaza para la ciudad de Bogotá en función de la magnitud y la distancia	2-17
Figura 2.12 Espectros de peligro uniforme en términos de aceleración espectral	2-18
Figura 2.13 Espectros de peligro uniforme en términos de velocidad espectral	2-19
Figura 2.14 Espectros de peligro uniforme en términos de desplazamiento espectral	2-19

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes. 2-8

INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL ANÁLISIS



CAPÍTULO 3 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL ANÁLISIS

3.1 INTRODUCCIÓN

La información geotécnica existente para Bogotá es el resultado de una serie de estudios que se han llevado a cabo en la ciudad desde hace más de una década. Se cuenta entonces con información geotécnica referente a exploraciones de suelos con fines de evaluación de respuesta dinámica local para proyectos de construcción y de rehabilitación de infraestructura. Adicionalmente se cuenta con información de profundidad de basamento rocoso, periodos dominantes de los depósitos de suelo y amenaza general a nivel de superficie, como resultado del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad.

Dicha base de datos constituye la información disponible de mejor calidad para efectos de microzonificación. Sin embargo, cuenta con algunos problemas importantes como son la falta de información de perfiles de velocidad de onda y comportamiento dinámico de los suelos en algunos sitios, así como la poca profundidad de exploración en relación con la profundidad del basamento rocoso en gran cantidad de sondeos. La evaluación de la respuesta sísmica teniendo como base esta información, requiere de criterios de extrapolación de las propiedades geotécnicas que se adapten a las condiciones de los suelos de la ciudad. Por esta razón, la Sociedad Colombiana de Geotécnica desarrolló un Modelo Geotécnico de Bogotá en el cual se incluyen recomendaciones para extrapolar las propiedades dinámicas de los depósitos blandos, a partir de correlaciones obtenidas de análisis estadísticos de los suelos de Bogotá, y propuestas por diferentes autores a partir de estudios realizados en suelos de características similares. La evaluación de la respuesta dinámica en el presente estudio (ver Capítulo 4) se basa en las recomendaciones propuestas en dicho modelo.

En este capítulo se presenta toda la información geotécnica relevante para la evaluación de la respuesta dinámica y microzonificación sísmica de Bogotá.

3.2 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA DE BOGOTÁ

Para efectos de adelantar la actualización de los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad se conforma una base de datos específica de información geotécnica. La base de datos está conformada por sondeos geotécnicos realizados en el área urbana de la ciudad los cuales para que sean de utilidad para efectos sísmicos deben cumplir en lo posible con la siguiente información mínima:

- (a) Información de suelos al menos para los primeros 20 m de profundidad en las zonas de suelos blandos o menos cuando aparece un estrato rocoso.
- (b) Información de caracterización geotécnica general tales como propiedades índices, calificación, nivel freático, propiedades de resistencia, información de consolidación y otros parámetros generales.
- (c) Velocidad de onda de corte con la profundidad. Alternativamente, información referente a módulos de rigidez para pequeñas deformaciones unitarias del suelo y densidad, variando con la profundidad.
- (d) Curvas de comportamiento dinámico de los depósitos característicos del suelo.

La Base de Datos Geotécnica de Bogotá para efectos de los estudios de microzonificación sísmica se conforma a partir de la siguiente información existente:

- (a) Estudios realizados en 1993 para la Microzonificación Sísmica de Bogotá.
- (b) Estudios recopilados y realizados para el Metro de Bogotá en 1999.
- (c) Estudios locales de respuesta dinámica realizados por particulares o empresas públicas desde el año 2002 hasta el presente.
- (d) Estudios adicionales con información pertinente, no incluidos en los campos anteriores.

En las Tablas 3.1 a 3.5 se resume esta información. En la Figura 3.1 se presenta la ubicación de los 225 sondeos que conforman la Base de Datos Geotécnica de Bogotá para efectos de microzonificación sísmica. El mapa de localización de sondeos se incluye adicionalmente como Anexo 3.1

Tabla 3.1. Sondeos Realizados para Microzonificación de Bogotá

Identificación Sondeo	Localización	Fuente	Este	Norte
N01	Cll. 170 Cra. 9	Microzonificación de Bogotá	1005112	1016788
N02	Autonorte Cll. 200	Microzonificación de Bogotá	1004008	1020975
N04	Cll. 138 Club SubOficiales	Microzonificación de Bogotá	1001422	1014592
N05	Cll. 100 Autonorte	Microzonificación de Bogotá	1002311	1010007
N9A	Sondeo Cll. 126 - Cra. 29	Microzonificación de Bogotá	1003114	1012201
N09	Cll. 127 Autonorte	Microzonificación de Bogotá	1002601	1012248
N13	Clínica Corpas	Microzonificación de Bogotá	998293	1018284
N14	Av Cundinamarca Cll. 139	Microzonificación de Bogotá	997595	1016193
N17	Barrio Bochica Norte Av. Cundinamarca	Microzonificación de Bogotá	996701	1012698
N19	Barrio El Luján Av. Boyacá	Microzonificación de Bogotá	997301	1009209
N20	Cll. 68 Cra. 82	Microzonificación de Bogotá	997001	1010909
N21	Terminal de Transportes	Microzonificación de Bogotá	995812	1006714
N22	Cll. 13 Av. Boyacá	Microzonificación de Bogotá	994499	1005917
N23	Av. 68 Av. Americas	Microzonificación de Bogotá	995009	1003925
N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	Microzonificación de Bogotá	993611	1002527
N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	Microzonificación de Bogotá	992122	1003925
N26	Barrio Patio Bonito BOSA	Microzonificación de Bogotá	989516	1004721
N27	Parque Timiza	Microzonificación de Bogotá	991509	1001533
N28	Autopista Sur Av. 68	Microzonificación de Bogotá	993310	999933
N29	Autopista Sur SOACHA	Microzonificación de Bogotá	989412	1000031
N30	Autopista Sur SOACHA	Microzonificación de Bogotá	988132	1000031
N31	Barrio Bosa Holanda	Microzonificación de Bogotá	988027	1003536
N33	Monumento Los Heroes	Microzonificación de Bogotá	1001912	1007714
N34	Escuela Militar Cll. 80	Microzonificación de Bogotá	1001017	1008713
N36	Cll. 63 Cra. 30	Microzonificación de Bogotá	999397	1006414
N37	Cll. 26 Cra. 50	Microzonificación de Bogotá	998104	1004819
N38	Cra. 53 Cll. 13	Microzonificación de Bogotá	996491	1003924
N39	CAD Av. Americas Cra. 30	Microzonificación de Bogotá	999502	1003225
N42	Cra. 30 Cll. 6	Microzonificación de Bogotá	997699	1001128
N43	Av. 1ero de Mayo Cra. 30	Microzonificación de Bogotá	996002	1000031
N44	Cra. 47 Cll. 44 Sur	Microzonificación de Bogotá	995198	999332
N45	Barrio el Tunal	Microzonificación de Bogotá	993611	997242
N48	Uniagraria Cll. 170 Autonorte	Microzonificación de Bogotá	1002819	1017290
N49	Ingeominas Cll. 53 Cra. 30	Microzonificación de Bogotá	999691	1005022
N50	Cll. 80 Av. Boyacá	Microzonificación de Bogotá	998698	1011006
N51	Aeropuerto El Dorado	Microzonificación de Bogotá	993310	1010908
N52	Sondeo Kennedy	Microzonificación de Bogotá	990529	1004819

Tabla 3.2. Sondeos recopilados para el proyecto Metro de Bogotá

Perforación	Localización	Fuente	Este	Norte
PE1	Cll 72 Cra 11	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002081	1006733
PE2	Cra 13 Cll 73	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001989	1006993
PE3	Av. Chile Cra 31	Metro, Perforaciones Recopiladas	1000729	1007700
PE4	Av. Chile Cra 24	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001168	1007380
PE6	Av. Chile Av. Ciudad de Quito	Metro, Perforaciones Recopiladas	1000461	1007913
PE7	Cra 15 No. 73 - 71	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001854	1007082
PE8	Av. Chile Cra 15	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001767	1006954
PE9	Av. Chile Cra 9	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002285	1006593
PE10	Cll 71 Cra 9	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002226	1006513
PE11	Cll 72 Cra 7	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002453	1006473
PE12	Cll 43 No. 8 - 59	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001319	1003679
PE13	Cra 8 No. 45 - 76	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001368	1003843
PE14	Cll 65 Cra 8 Esq NE	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001945	1005906
PE15	Cra 8 No. 46 - 36	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001409	1003896
PE16	Cra 8 No. 46 - 59	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001436	1004408
PE17	Cra 8 No. 48 - 25	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001436	1004408
PE18	Cra 8 No. 48 - 64	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001436	1006008
PE19	Cra 8 Cll 66 - 67	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002017	1004987
PE20	Cra 6 No. 55 - 30	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001712	1005184
PE21	Cll 57 Cra 7	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001738	1005184
PE22	Cra 6 No. 55 - 10	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001712	1004987
PE23	Cll 55 No. 6 - 20	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001712	1004987
PE24	Cll 62 Cra 7	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001918	1005599
PE25	Cra 7 Cll 27	Metro, Perforaciones Recopiladas	1000941	1002096
PE26	Cra 7 No. 48 - 32	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001523	1004255
PE27	Cll 67 No. 7 - 37	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002163	1006028
PE28	Cra 6 Av. 26	Metro, Perforaciones Recopiladas	1000991	1001831
PE29	Cra 7 Cll 72 - 73	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002462	1006478
PE30	Cra 6 Cll 27	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001043	1002138
PE31	Cra 7 Cll 70	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002336	1006249
PE32	Cra 7 Cll 66 - 67	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002287	1005912
PE33	Cra 7 Cll 65	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002057	1005850
PE34	Cra 7 Cll 64	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002066	1005772
PE35	Cra 6 No. 55 - 45	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001728	1004921
PE36	Cra 7 Cll 32	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001029	1002438
PE37	Cll 47 No. 8 - 07	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001407	1004029
PE38	Cra 7 No. 47 - 75	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001509	1003998
PE39	Cll 69 A Cra 6	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002407	1006146
PE40	Cll 47 No. 8 - 29	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001469	1004330
PE41	Cll 31 No. 6 - 12	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001110	1002315
PE42	Cll 68 Cra 6	Metro, Perforaciones Recopiladas	1002233	1005981
PE43	Cll 47 No. 7 - 35	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001522	1004255
PE44	Cll 40 No. 7 - 55	Metro, Perforaciones Recopiladas	1001296	1003262
PE45	Cll 13 Cra 19	Metro, Perforaciones Recopiladas	999799	1000765
PE46	Cll 13 Cra 30	Metro, Perforaciones Recopiladas	998393	1001995
PE47	Cll 13 Cras 30 - 32	Metro, Perforaciones Recopiladas	998393	1001995
PE48	Av. Caracas Cll 12	Metro, Perforaciones Recopiladas	999686	1000736
PE49	Av. Ferrocarril - Diag. 2 D	Metro, Perforaciones Recopiladas	995778	1002021
PE50	Av. Ferrocarril - Río Fucha	Metro, Perforaciones Recopiladas	995039	1001741
PE51	Av. Ferrocarril - Diag. 5 A	Metro, Perforaciones Recopiladas	996231	1002164
PE52	Av. 1ro. Mayo Cll 30 S	Metro, Perforaciones Recopiladas	993941	1001667
PE53	Av. 1ro. Mayo Diag. 43 S	Metro, Perforaciones Recopiladas	990575	1002087
PE54	Cra 85 Cll 60 S	Metro, Perforaciones Recopiladas	988467	1000891
PE56	Av. 1ro. Mayo Cra 63	Metro, Perforaciones Recopiladas	993559	1001970
PE58	Av. 1ro. Mayo Av. Boyacá	Metro, Perforaciones Recopiladas	993127	1002491

Tabla 3.3. Sondeos Realizados para el proyecto Metro de Bogotá

Perforación	Localización	Fuente	Este	Norte
PA1	Av. Cll. 68 Cra. 110	Metro, Perforaciones Realizadas	994323	1012020
PA2	Av. Cll. 68 Cra. 105 F	Metro, Perforaciones Realizadas	994862	1011721
PA3	Av. Cll. 68 Cra. 102	Metro, Perforaciones Realizadas	995493	1012052
PA4	Av. Cll. 68 Cra. 98	Metro, Perforaciones Realizadas	995352	1011130
PA5	Av. Cll. 68 Cra. 92	Metro, Perforaciones Realizadas	995953	1010787
PA6	Av. Cll. 68 Cra. 86	Metro, Perforaciones Realizadas	996481	1010459
PA7	Av. Cll. 68 Cra. 83	Metro, Perforaciones Realizadas	996705	1010330
PA8	Av. Cll. 68 Cra. 77	Metro, Perforaciones Realizadas	997192	1009899
PA9	Av. Cll. 68 Cra. 74 A	Metro, Perforaciones Realizadas	997405	1009741
PA10	Av. Cll. 68 Av. Boyacá	Metro, Perforaciones Realizadas	993290	1003704
PA11	Av. Cll. 68 Cra. 66	Metro, Perforaciones Realizadas	998147	1009178
PA12	Av. Cll. 68 Cra. 61	Metro, Perforaciones Realizadas	998492	1008948
PA13	Av. Cll. 68 Av. Cra. 68	Metro, Perforaciones Realizadas	997983	1009299
PA14	Av. Cll. 72 Cra. 50	Metro, Perforaciones Realizadas	999601	1008569
PA15	Av. Cll. 72 Cra. 45 A	Metro, Perforaciones Realizadas	999984	1008275
PA16	Av. Cll. 72 Av. Quito	Metro, Perforaciones Realizadas	1000485	1007904
PA17	Av. Cll. 72 Cra. 30	Metro, Perforaciones Realizadas	1000827	1007635
PA18	Av. Cll. 72 Cra. 28	Metro, Perforaciones Realizadas	1000967	1007526
PA19	Av. Cll. 72 Cra. 24	Metro, Perforaciones Realizadas	1001159	1007402
PA20	Av. Cll. 72 Cra. 20	Metro, Perforaciones Realizadas	1001429	1007200
PA21	Av. Cll. 72 Cra. 17	Metro, Perforaciones Realizadas	1001590	1007089
PA22	Av. Cll. 72 Cra. 13	Metro, Perforaciones Realizadas	1001896	1006868
PA23	Cra. 9 Cll. 71	Metro, Perforaciones Realizadas	1002222	1006528
PA24	Cll. 70 Cra. 7 A	Metro, Perforaciones Realizadas	1002251	1006309
PA25	Cra. 7 Cll. 65	Metro, Perforaciones Realizadas	1002044	1005865
PA26	Cra. 7 Cll. 61	Metro, Perforaciones Realizadas	1001872	1005536
PA27	Cra. 7 Cll. 57	Metro, Perforaciones Realizadas	1001719	1005123
PA28	Cra. 7 Cll. 55	Metro, Perforaciones Realizadas	1001685	1004996
PA29	Cra. 7 Cll. 49	Metro, Perforaciones Realizadas	1001540	1004395
PA30	Cra. 7 Cll. 45	Metro, Perforaciones Realizadas	1001482	1003899
PA31	Cra. 7 Cll. 41	Metro, Perforaciones Realizadas	1001384	1003591
PA32	Cra. 7 Cll. 36	Metro, Perforaciones Realizadas	1001240	1003002
PA33	Cra. 7 Cll. 34	Metro, Perforaciones Realizadas	1001147	1002786
PA34	Cra. 7 Cll. 29	Metro, Perforaciones Realizadas	1000980	1002239
PA35	Cra. 10 Cll. 26	Metro, Perforaciones Realizadas	1000770	1001807
PA36	Cra. 10 Cll. 23	Metro, Perforaciones Realizadas	1000597	1001513
PA37	Cra. 10 Cll. 19	Metro, Perforaciones Realizadas	1000401	1001194
PA38	Cra. 10 Cll. 15	Metro, Perforaciones Realizadas	1000164	1000783
PA39	Cra. 10 Cll. 13	Metro, Perforaciones Realizadas	1000080	1000653
PA40	Cll. 13 Cra. 13	Metro, Perforaciones Realizadas	999837	1000719
PA41	Cll. 13 Cra. 16	Metro, Perforaciones Realizadas	999538	1000974
PA42	Cll. 13 Cra. 17	Metro, Perforaciones Realizadas	999440	1001060
PA43	Cll. 13 Cra. 19	Metro, Perforaciones Realizadas	999234	1001244
PA44	Cll. 13 Cra. 23	Metro, Perforaciones Realizadas	998907	1001528
PA45	Cll. 13 Cra. 27	Metro, Perforaciones Realizadas	998679	1001730
PA46	Cll. 13 Av. Ciudad de Quito	Metro, Perforaciones Realizadas	998459	1002001
PA47	Cll. 13 Cra. 35	Metro, Perforaciones Realizadas	997963	1002371
PA48	Cll. 13 Cra. 39	Metro, Perforaciones Realizadas	997533	1002746
PA49	Av. Ferrocarril Cll. 9	Metro, Perforaciones Realizadas	996957	1002490
PA50	Av. Ferrocarril Diag. 5 A	Metro, Perforaciones Realizadas	996429	1002268
PA51	Av. Ferrocarril Diag. 3 B	Metro, Perforaciones Realizadas	995952	1002069
PA52	Av. Ferrocarril Cll 2	Metro, Perforaciones Realizadas	995383	1001850
PA53	Av. Ferrocarril Diag. 17 S	Metro, Perforaciones Realizadas	995056	1001767
PA54	Av. Ferrocarril Diag. 19 S	Metro, Perforaciones Realizadas	995056	1001767
PA55	Av. Ferrocarril Av. 1ro. Mayo	Metro, Perforaciones Realizadas	994135	1001411
PA56	Av. 1ro. Mayo Cra. 57	Metro, Perforaciones Realizadas	993846	1001701
PA57	Av. 1ro. Mayo Cra. 61	Metro, Perforaciones Realizadas	993729	1001809
PA58	Av. 1ro. Mayo Cra. 65	Metro, Perforaciones Realizadas	993429	1002153
PA59	Av. 1ro. Mayo Av. Boyacá	Metro, Perforaciones Realizadas	992884	997990
PA60	Av. 1ro. Mayo Cra. 72	Metro, Perforaciones Realizadas	993153	1002451
PA61	Av. 1ro. Mayo Cra. 74	Metro, Perforaciones Realizadas	992692	1002560
PA62	Av. 1ro. Mayo Cra. 75 B	Metro, Perforaciones Realizadas	993364	1002232
PA63	Av. 1ro. Mayo Transv. 74	Metro, Perforaciones Realizadas	992692	1002560
PA64	Av. 1ro. Mayo Cll 42 S	Metro, Perforaciones Realizadas	995383	1000561
PA65	Diag. 43 S Transv. 81 A	Metro, Perforaciones Realizadas	990450	1002296
PA66	Diag. 43 S Transv. 93 A	Metro, Perforaciones Realizadas	989723	1003445
PA67	Diag. 43 S Cra. 86	Metro, Perforaciones Realizadas	990166	1002745
PA68	Patio Tintalito	Metro, Perforaciones Realizadas		
PA69	Patio Tintalito	Metro, Perforaciones Realizadas		
PA70	Patio Puerto Amor	Metro, Perforaciones Realizadas		
PA71	Patio Puerto Amor	Metro, Perforaciones Realizadas		

Tabla 3.4. Estudios locales recopilados por DPAE.

Identificación Sondeo	Fuente	Localización	Este	Norte
O01	Estudios Locales DPAE	Calle 95 con Carrera 59	1000159	1009979
O02	Estudios Locales DPAE	Carrera 1 este N° 13-51	1001003	1000050
O03	Estudios Locales DPAE	Cra 46A N° 135-95	1002043	1014349
O04	Estudios Locales DPAE	Cra 48F N° 95-80	1000146	1010154
O05	Estudios Locales DPAE	Carrera 46 con calle 140A	1002207	1014747
O06	Estudios Locales DPAE	Calle 55 N° 14-47	1001285	1005116
O07	Estudios Locales DPAE	Carrera 7 N° 45-02/10	1001488	1003903
O08	Estudios Locales DPAE	Av. NQS con Calle 26	999583	1003395
O09	Estudios Locales DPAE	Calle 170 N° 31-20	1004429	1016941
O10	Estudios Locales DPAE	Calle 134 con Cra 46A	1001917	1014065
O11	Estudios Locales DPAE	Carrera 9 N° 151-52	1005043	1014701
O12	Estudios Locales DPAE	Calle 135 con Av Boyacá	1000829	1014547
O13	Estudios Locales DPAE	Carrera 92 N° 153-58	999451	1017063
O14	Estudios Locales DPAE	Av. NQS con Calle 13	998432	1001998
O15	Estudios Locales DPAE	Carrera 68B N° 43B-20	996854	1006499
O16	Estudios Locales DPAE	Carrera 13 No. 31 - 21	1000982	1002523
O17	Estudios Locales DPAE	Carrera 30 - calle 45	999791	1004251
O18	Estudios Locales DPAE	Calle 122 con Carrera 9	1005084	1011338
O19	Estudios Locales DPAE	Calle 59 N° 74-35	996755	1008964
O20	Estudios Locales DPAE	Carrera 52 con calle 147	1001679	1015352
O21	Estudios Locales DPAE	Carrera 6 Calle 40	1001413	1003467
O22	Estudios Locales DPAE	Transversal 5A Calle 127	1005740	1011924
O23	Estudios Locales DPAE	Cra 7 Calle 38	997226	996259
O24	Estudios Locales DPAE	Cra 6 Calle 132	1005404	1012600
O25	Estudios Locales DPAE	Carrera 3 Calle 81	996474	992441
O26	Estudios Locales DPAE	Carrera 3 Calle 77	1003022	1006699
O27	Estudios Locales DPAE	Avenida 9 Calle 154	1005044	1014899
O28	Estudios Locales DPAE	Calle 152 Carrera 28	1004638	1014924
O29	Estudios Locales DPAE	Calle 87 Carrera 8	1003397	1007984
O30	Estudios Locales DPAE	Calle 19 A Carrera 1 Este	1001381	1000703
O31	Estudios Locales DPAE	Cra 9 Calle 93	1003579	1008491
O32	Estudios Locales DPAE	Avenida Suba Diagonal 117A	1001730	1011627
O33	Estudios Locales DPAE	Tranversal 21 Calle 98	1002526	1009856
O34	Estudios Locales DPAE	Calle 22 C Carrera 41	995424	1000785
O35	Estudios Locales DPAE	Avenida 26 Carrera 35	999466	1003648
O36	Estudios Locales DPAE	Calle 106 Calle 8 B	1004556	1009888
O37	Estudios Locales DPAE	Transversal 32 Calle 131	1003103	1013223
O38	Estudios Locales DPAE	Carrera 9 Calle 125	1005178	1011574
O39	Estudios Locales DPAE	Carrera 47 Calle 129	1001498	1012965
O40	Estudios Locales DPAE	Diagonal 152 Transversal 43	1002882	1015603
O41	Estudios Locales DPAE	Calle 136 Carrera 13	1004901	1013060
O42	Estudios Locales DPAE	Calle 138 Carrera 57	1000796	1014826
O43	Estudios Locales DPAE	Carrera 27 Calle 163 A	1004802	1015901
O44	Estudios Locales DPAE	Calle 26 A con Carrera 13	1000729	1001999
O45	Estudios Locales DPAE	Calle 94 N° 10 - 31	1003540	1008916
O46	Estudios Locales DPAE	Diagonal 165 A N° 28	1004836	1016279
O47	Estudios Locales DPAE	Carrera 49 N° 145 - 36	1002283	1015286
O48	Estudios Locales DPAE	Avenida 9 con Calle 166	1005078.19	1016400.19
O49	Estudios Locales DPAE	Av. Carrera 9 con Calle 130 B	1004969	1012417
O50	Estudios Locales DPAE	Calle 32 sur N° 15 C - 97	996145	997684
O51	Estudios Locales DPAE	Transmilenio Tramo Av. C de Vill	990619	999960

Tabla 3.5. Estudios adicionales incluidos.

Nombre Sondeo	Identificación Sondeo	Fuente de Información	Localización	Este	Norte
Puente Autop Sur con Avenida Boyaca	AutoSurB	Estudios Adicionales	Autosur Av Boyaca	992445	999768
Edificio Bel Air	BelAir	Estudios Adicionales	Cll. 88 Cra. 7	1003208	1008062
Centro Administrativo Distrital	CAD	Estudios Adicionales	Cra. 30 Av. Americas	999639	1003258
Estadio Nemesio Camacho "El Campin"	CAMPIN	Estudios Adicionales	Cll. 57 Cra. 30	999991	1005629
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico	CITEC	Estudios Adicionales	Cra 65 B Cll. 17A	996995	1006293
Torres Unidas	Cll114Cr7	Estudios Adicionales	Calle 114 con Carrera 7	1004873	1010605
Abadia del Bosque	Cll134Cr9	Estudios Adicionales	Av. 9 Cll. 134	1004983	1012817
Edificio COLGAS	COLGAS	Estudios Adicionales	Cll. 37 Cra. 8	1001100	1002975
Edificio ESSO	ESSO	Estudios Adicionales	Cll. 39 Cra. 7	1001433	1003528
Puente vehicular Matatigres	Matatigres	Estudios Adicionales	NQS Autosur	994276	999768
Torre Megabanco	Megabanco	Estudios Adicionales	Cll. 100 Cra. 13	1003541	1009499
Múdela del Río	Mudela	Estudios Adicionales		1003800	1025367
Plaza de Toros "La Santamaria"	PlazaToros	Estudios Adicionales	Cra. 6 Cll. 26	1001211	1001759
Puente Calle 170 Autonorte	PteCll170	Estudios Adicionales	Cll. 170 Autonorte	1003541	1017240
Salud Total	SaludTotal	Estudios Adicionales	Cll 100 con Autonorte	1002210	1010052
Terreno Firme Sur	SurDuro	Estudios Adicionales		994220	994239

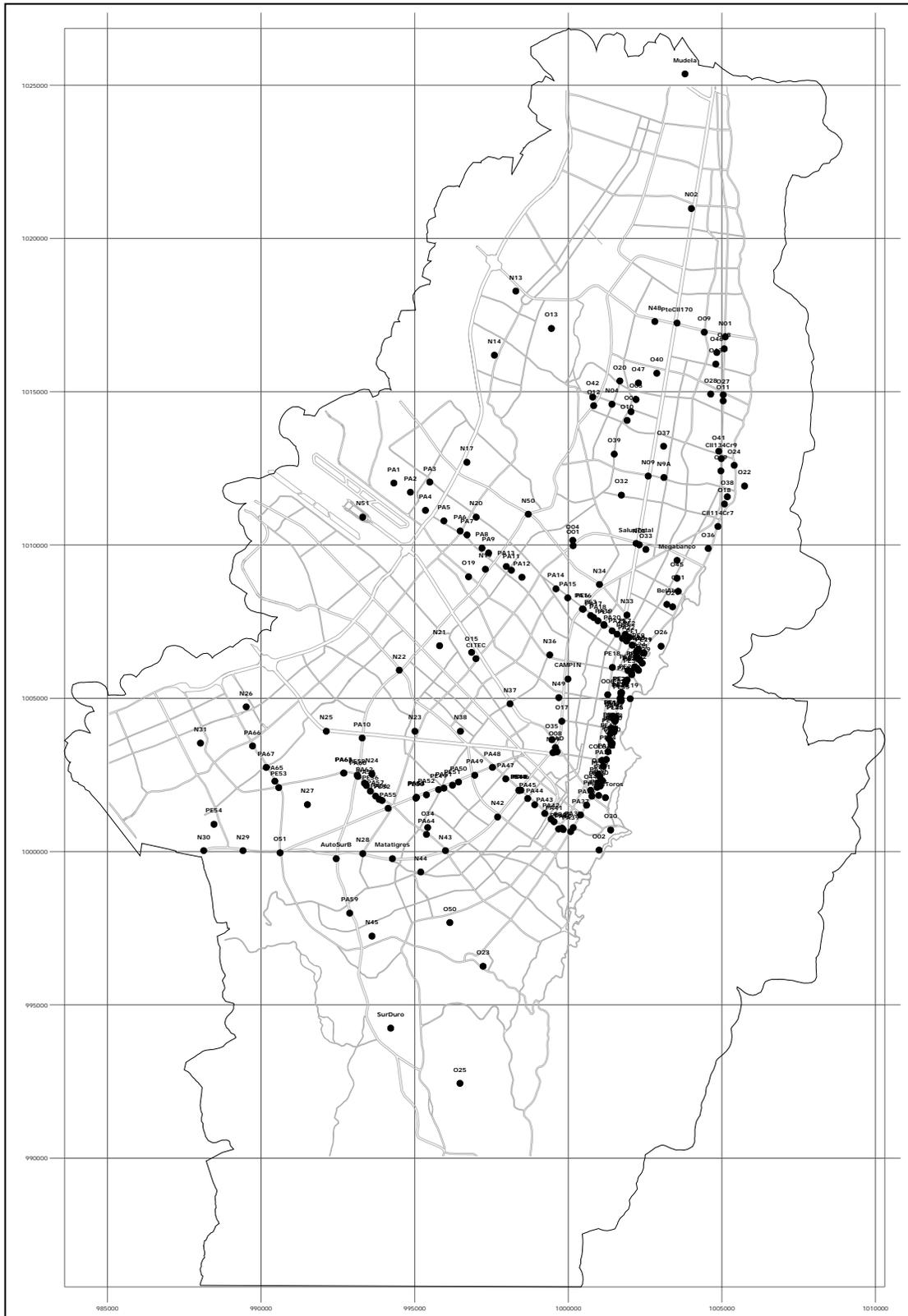


Figura 3.1 Mapa de localización de sondeos

Cada uno de los sondeos incluidos en la Base de Datos fue procesado en un formato que se encuentra dividido en tres partes. La primera parte esta conformada por información general, la segunda incluye el perfil estratigráfico e información de ensayos de laboratorio estáticos, y por último se incluye un formato de análisis de ensayos dinámicos que integra resultados de los ensayos de Columna Resonante, Triaxial Cíclico y Bender Element para una misma muestra. Adicionalmente cada archivo incluye la información de los ensayos tabulada.

A partir de cada formato se conformó una base de datos de información general y otra para los resultados de ensayos dinámicos. En las Tablas 3.6 y 3.7 se especifican los campos que conforman cada una de las bases de datos. En las Figuras 3.2 a 3.4 se presenta a manera de esquema representativo de la conformación de cada uno de los campos de la base de datos para cada uno de los sondeos cuya información se incluye, la información correspondiente al sondeo O28. La base de datos completa se presenta digitalmente como Anexo 3.2.

Tabla 3.6. Base de Datos de información general

Identificador	Número de sondeo	
Nombre Archivo	Nombre del Archivo	
Nombre	Nombre del sondeo	
Municipio	Municipio en el que se encuentra	
Dirección	Dirección del sondeo	
Coordenada E	Coordenada en sentido Este	
Coordenada N	Coordenada en sentido Norte	
Fecha	Fecha de realización del estudio	
Profundidad [m]	Profundidad del perfil	
Nivel Freático	Nivel de agua libre encontrado	
Fuente	Fuente de información	
Elaborador por	Perforación	Ejecutar de la perforación
	Down Hole	Ejecutor del ensayo de Down Hole
	Ensayos Lab. Estáticos	Ejecutor de los ensayos estáticos de Laboratorio
	Ensayos Lab. Dinámicos	Ejecutor de los ensayos dinámicos
Cantidad de ensayos:	Humedad	Cantidad de resultados de ensayos de humedad
	Límites	Cantidad de ensayos de límites
	Densidad	Cantidad de ensayos de densidad
Ensayo Down Hole	Profundidad Vs1	Profundidad hasta la cual el suelo se caracteriza con la velocidad de corte 1
	Vs1	Velocidad de corte 1
	Profundidad Vs2	Profundidad hasta la cual el suelo se caracteriza con la velocidad de corte 2
	Vs2	Velocidad de corte 2
	Profundidad Vs3	Profundidad hasta la cual el suelo se caracteriza con la velocidad de corte 3
	Vs3	Velocidad de corte 3
Cantidad de ensayos:	SPT	Cantidad de resultados de ensayo SPT
	Compresión Inconfinada	Cantidad de resultados del ensayo de Compresión Inconfinada
	Presiómetro	Cantidad de ensayos realizados de Presiómetro
	Ensayos Dinámicos	Cantidad de muestras evaluadas con ensayos dinámicos
	Consolidación	Cantidad de ensayos de consolidación
	Triaxial CU	Cantidad de ensayos de Triaxial Consolidado No Drenado

Tabla 3.7. Campos incluidos en la Base de Datos de Ensayos Dinámicos

Identificador	Número conformado por: [Numero del Sondeo]_[Numero de Muestra analizada]	
Nombre	Nombre del sondeo	
ID Sondeo	Número del Sondeo	
Coordenada E	Coordenada en el sentido Este del sondeo	
Coordenada N	Coordenada en el sentido Norte del sondeo	
Ejecutado por:	Responsable de los ensayos dinámicos	
Profundidad [m]	Profundidad a la que se obtuvo la muestra	
Densidad	Densidad de la muestra [Ton/m ³]	
Relación de Vacíos	Relación de Vacíos en formato decimal	
Límite Líquido	Límite líquido de la muestra en porcentaje	
Límite Plástico	Límite plástico de la muestra en porcentaje	
Índice de Plasticidad	Índice de Plasticidad	
Clasificación	Clasificación del suelo	
Descripción	Descripción del suelo	
Ensayo Velocidad de	Verificación si existe ensayo de Bender	
Vs [m/s]	Velocidad obtenida por Bender	
G₀ [Kg/cm²]	Módulo de corte máximo	
Para cada Ciclo se incluye la siguiente información		
Ciclo	γ %	Porcentaje de deformación angular
	G/G₀	Relación de Módulo de rigidez
	β%	Porcentaje de amortiguamiento

 ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Dirección de Prevención ATENCIÓN DE EMERGENCIAS	BASE DE DATOS GEOTÉCNICA DE BOGOTÁ	
Hacienda el Cedro - E 425	Número: O28	
INFORMACIÓN GENERAL		
Municipio: Bogotá D.C. Dirección: Calle 152 con Carrera 28 Coordenadas: 1014924 N 1004638 E Fecha: 10/10/2003 Nombre de Archivo: Sondeo_O28.xls		
CARACTERÍSTICAS DEL SONDEO		
Número: O28 Profundidad Máxima [m]: 100.0 Nivel Freático [m]: 4.0		
FUENTE DE INFORMACIÓN		
DPAAE - Estudios Locales		
RESPONSABLES DE EJECUCIÓN		
Perforación: Espinosa y Restrepo Ensayos Velocidad de Onda: PSI Ensayos de Lab. Estáticos: Espinosa y Restrepo Ensayos de Lab. Dinámicos: Universidad de los Andes		
OBSERVACIONES		
Hoja 1 de 16		

Figura 3.2 Formato de Información general de los sondeos

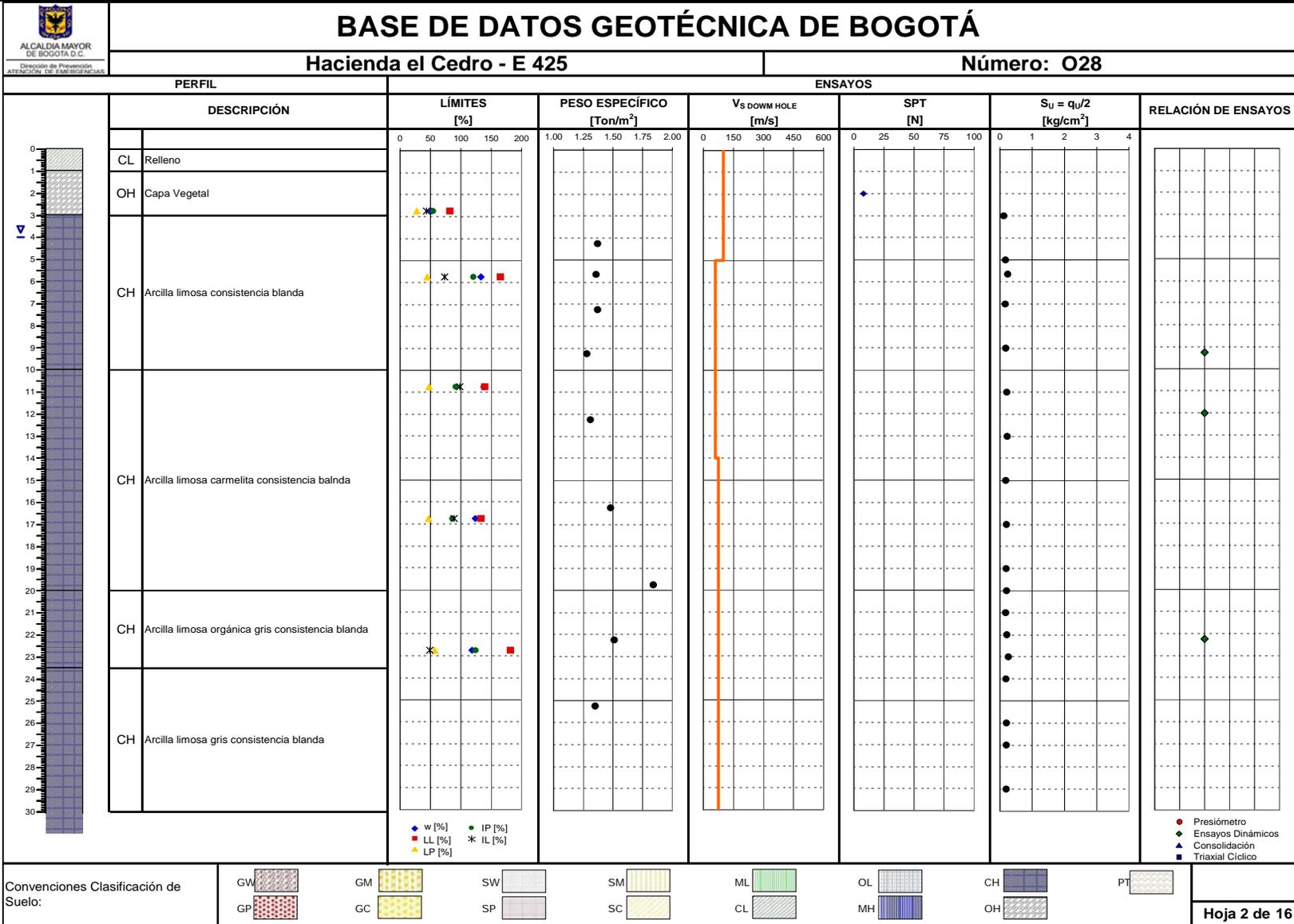


Figura 3.3 Formato de Información estratigráfica y de ensayos estáticos

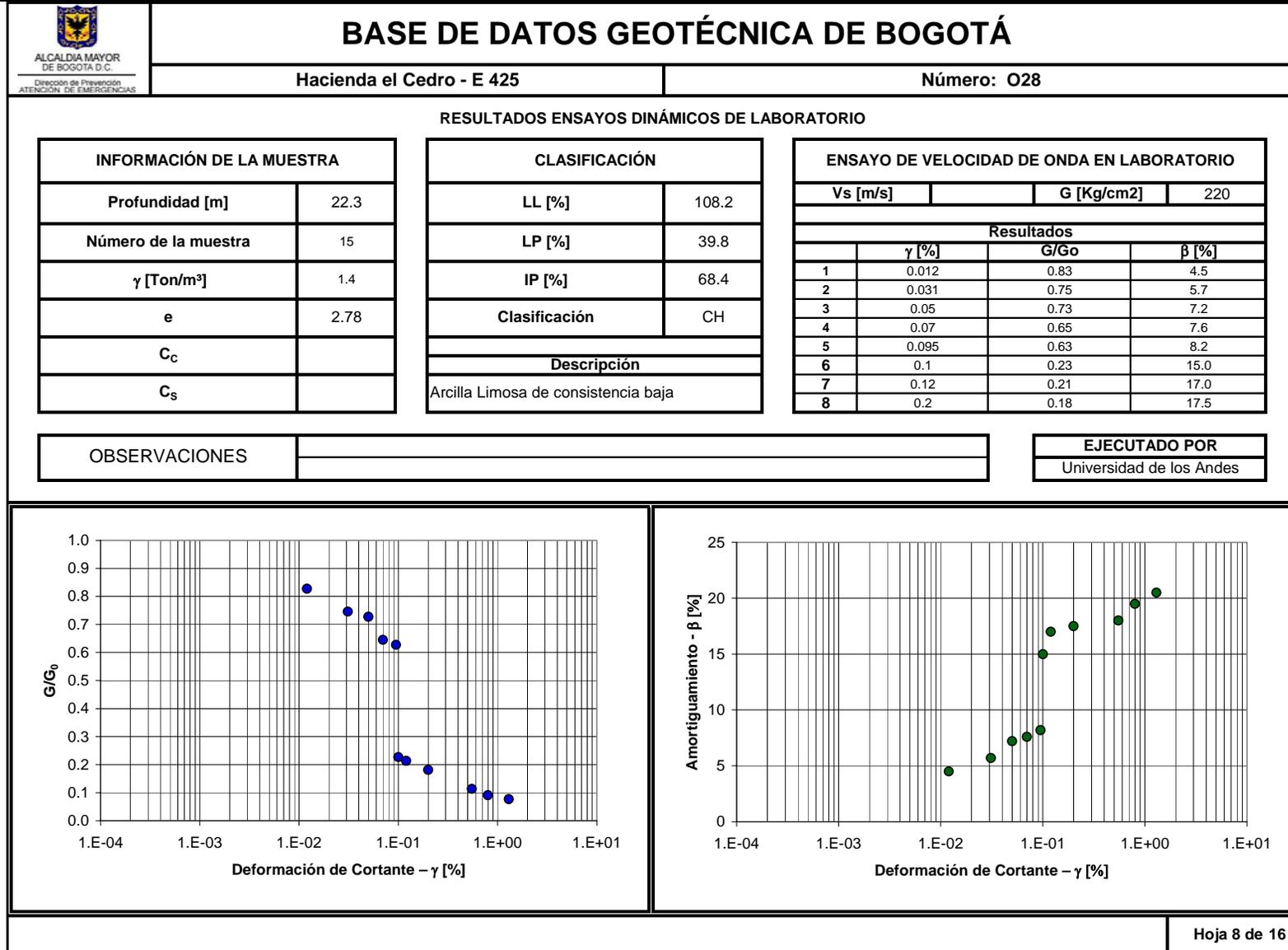


Figura 3.4 Formato de Información de ensayos dinámicos

3.3 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En este numeral se presenta en forma consolidada la información disponible para toda la ciudad. Inicialmente se presentan unos mapas según los resultados del estudio de microzonificación sísmica, junto con un resumen de parámetros por zonas geotécnicas de la ciudad, también se presentan en forma agrupada los resultados de algunos ensayos de laboratorio relevantes y finalmente algunos cortes estratigráficos ilustrativos.

En los resultados que se presentan no se incluye ningún tipo de interpretación de manera que el ingeniero pueda realizar la interpretación que desee.

3.3.1 Mapas disponibles

En este numeral se presentan los siguientes mapas disponibles:

- a. Mapa de Zonificación Geotécnica – Figura 3.5
- b. Mapa de Espesor de Deposito Blando – Figura 3.6
- c. Mapa de Profundidad Estimada de la Formación Subachoque – Figura 3.7
- d. Mapa de Isoperiodos Dominantes del Suelo – Figura 3.8
- e. Mapa de Microzonificación Sísmica (Decreto 193 de 2006) – Figura 3.9
- f. Mapa de la Red de acelerógrafos de Bogotá – Figura 3.10

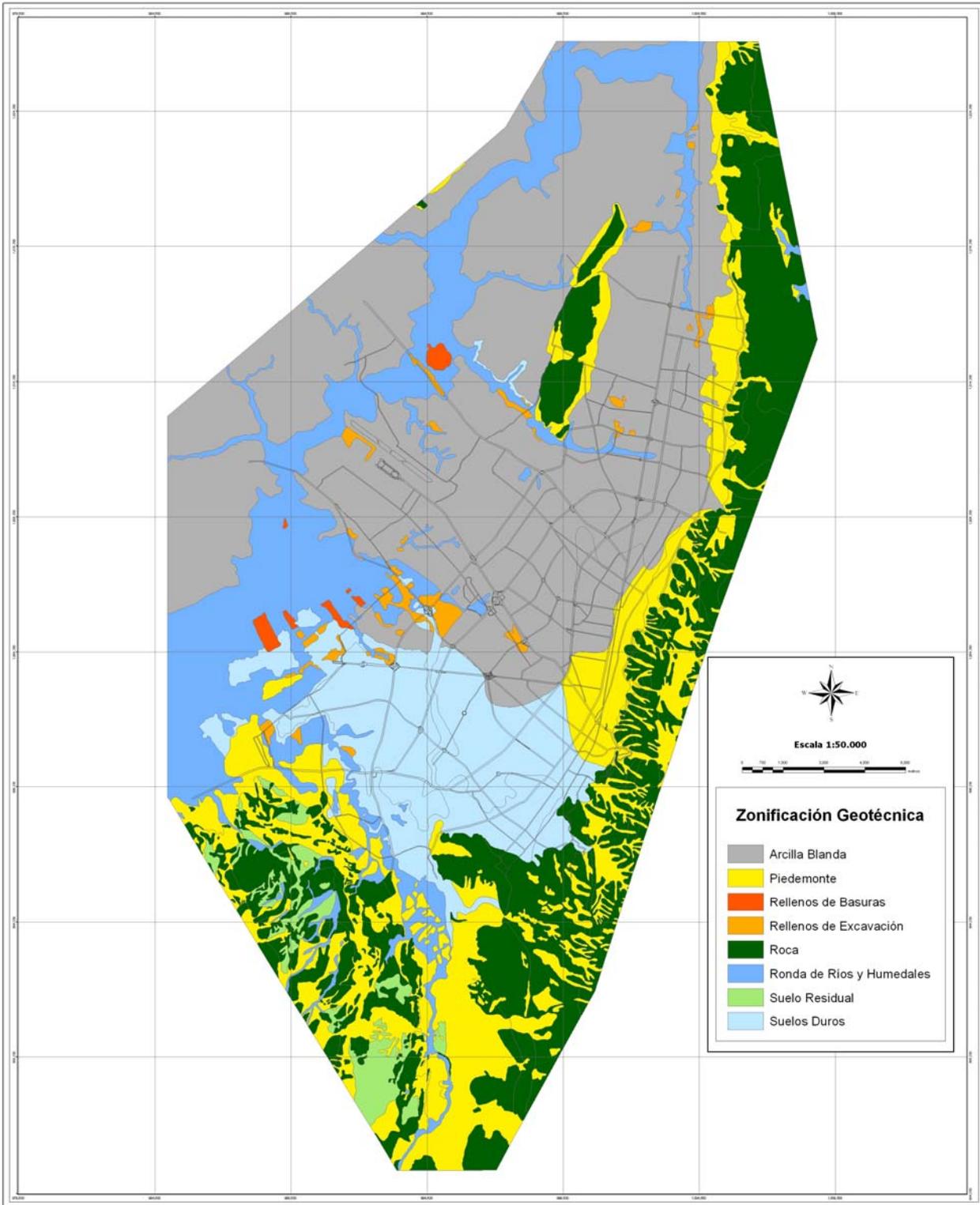


Figura 3.5 Mapa de Zonificación Geotécnica

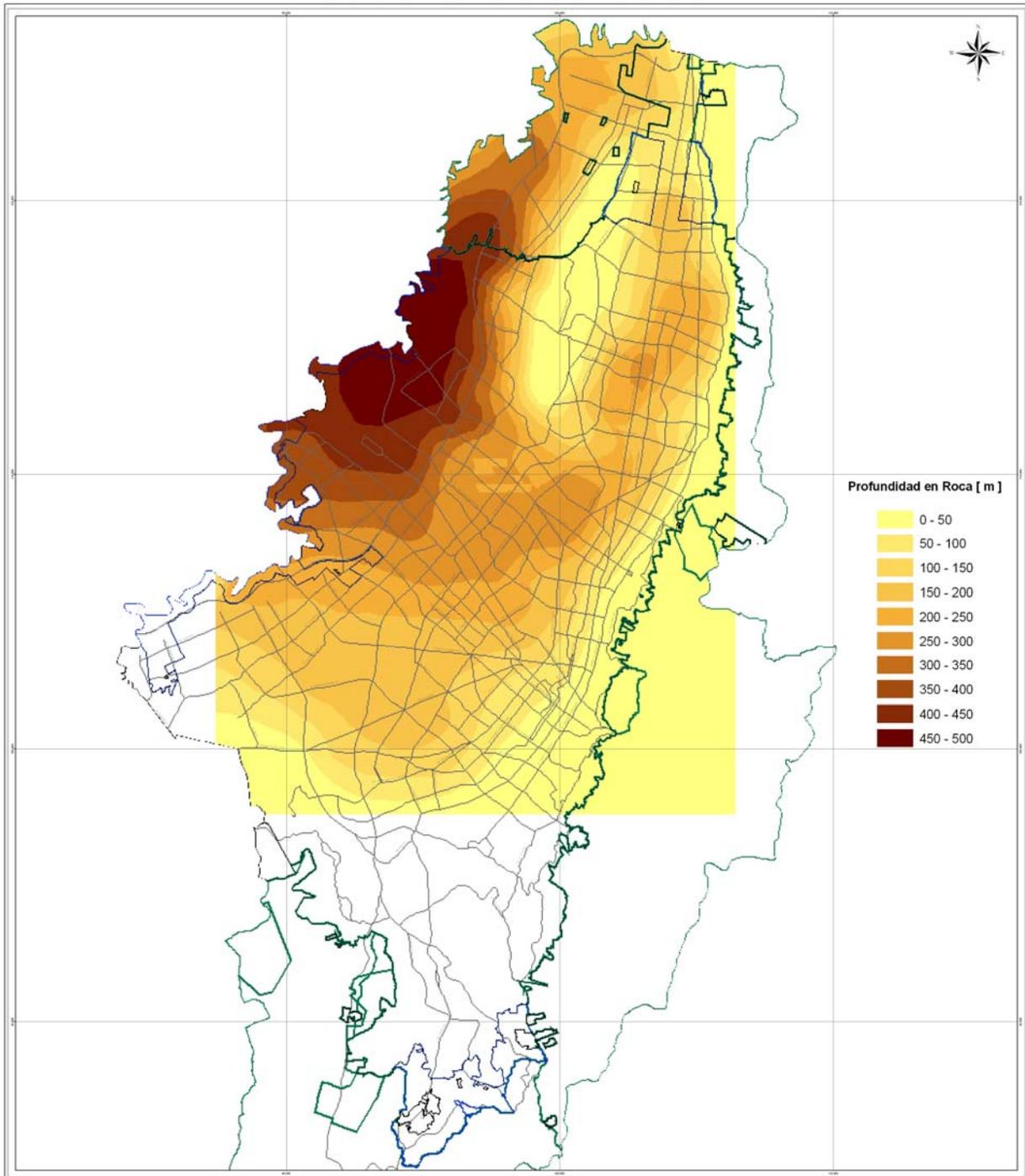


Figura 3.6 Mapa de profundidad de depósito blando [m]

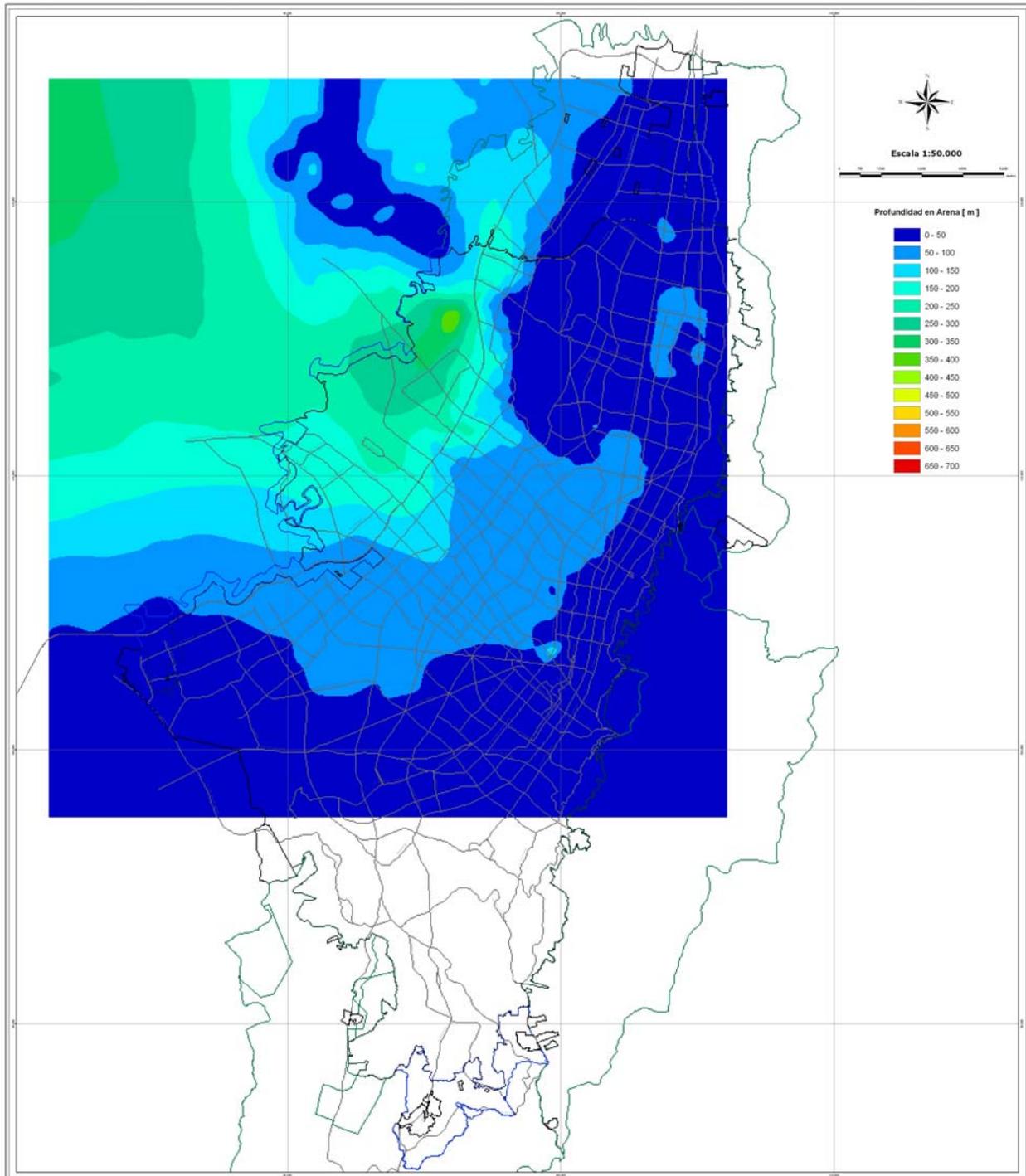


Figura 3.7 Mapa de profundidad estimada de la formación Subachoque [m]

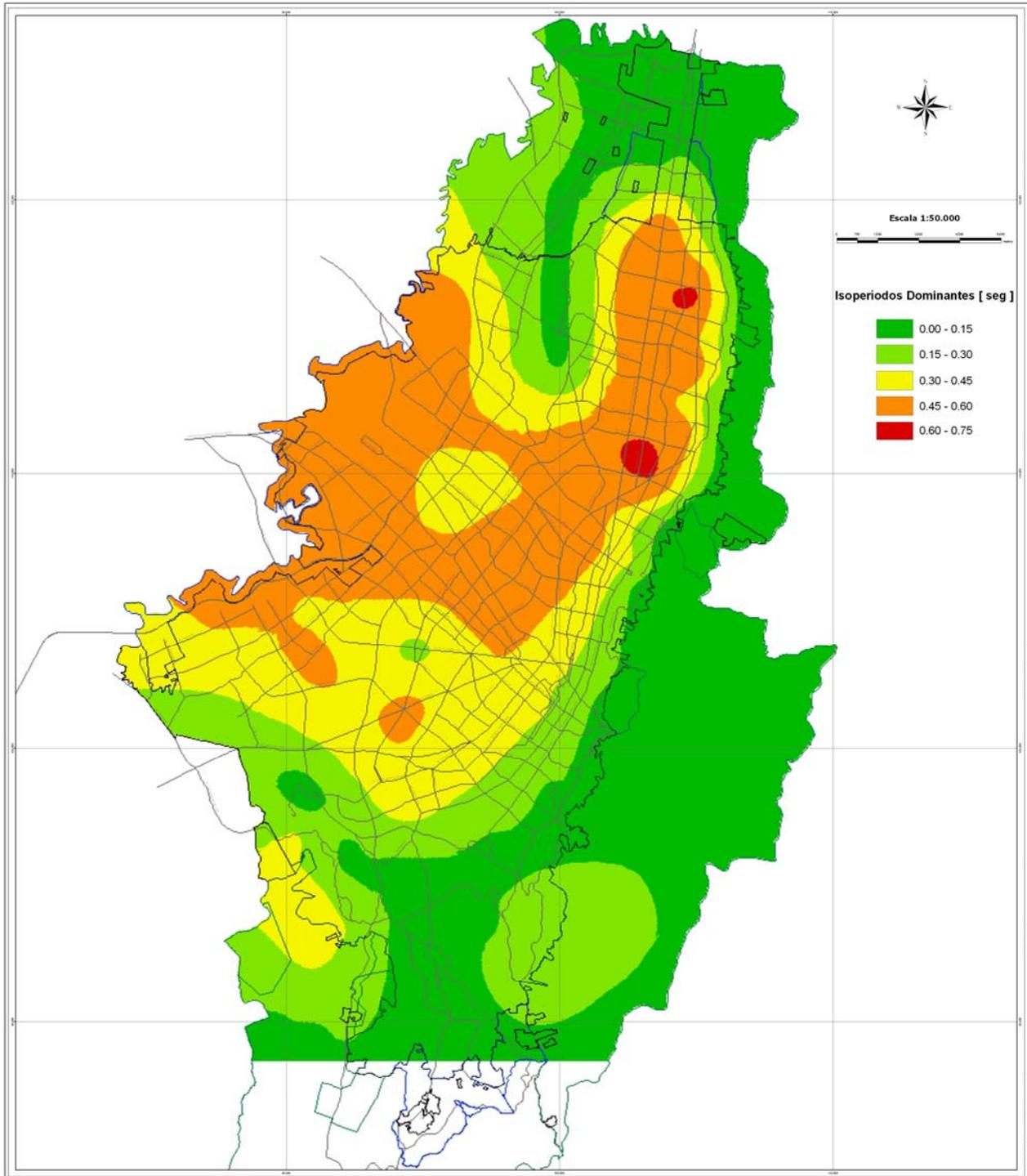


Figura 3.8 Mapa de isoperiodos dominantes del suelo

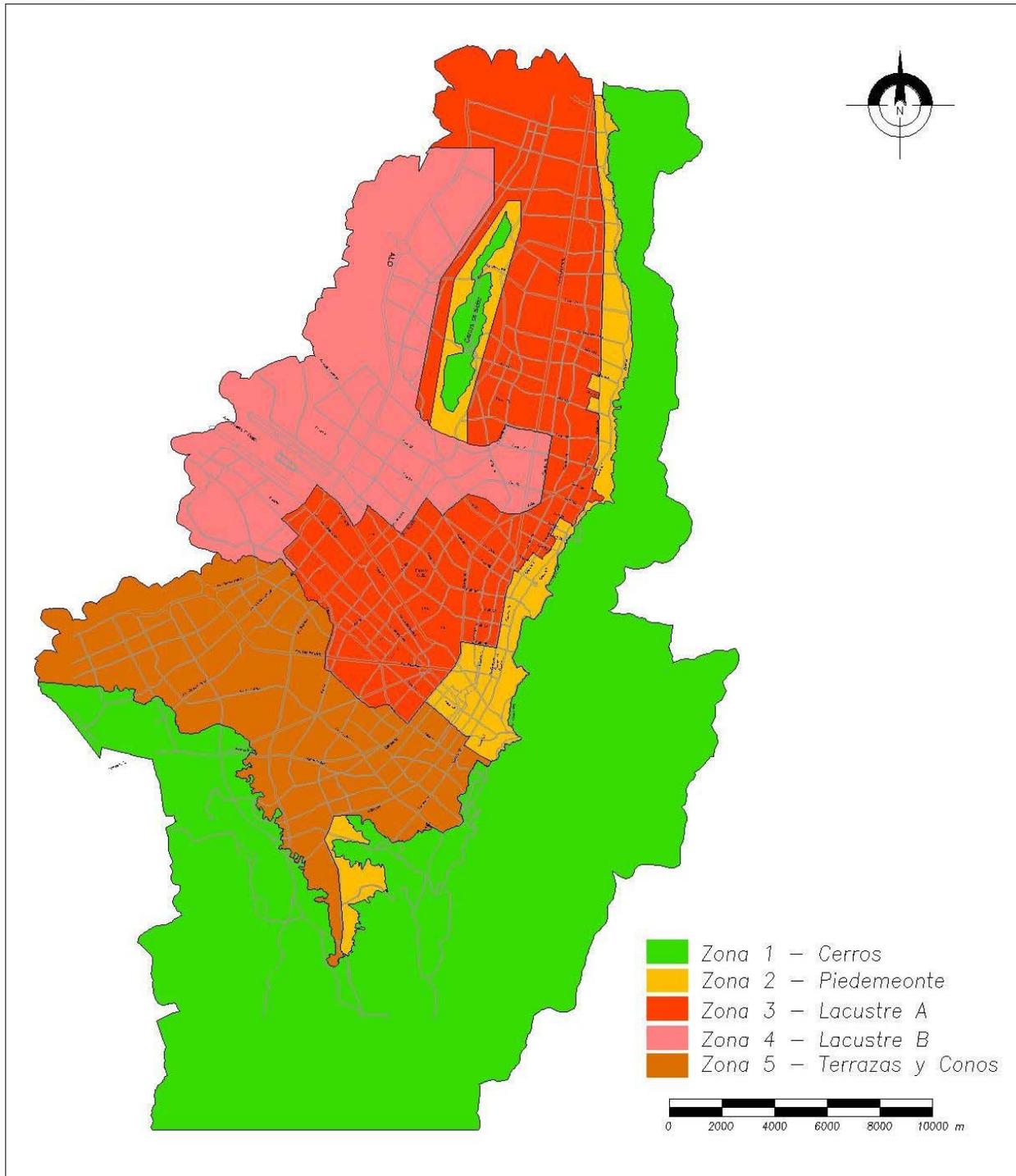


Figura 3.9 Mapa de Microzonificación Sísmica (Decreto 193 de 2006)

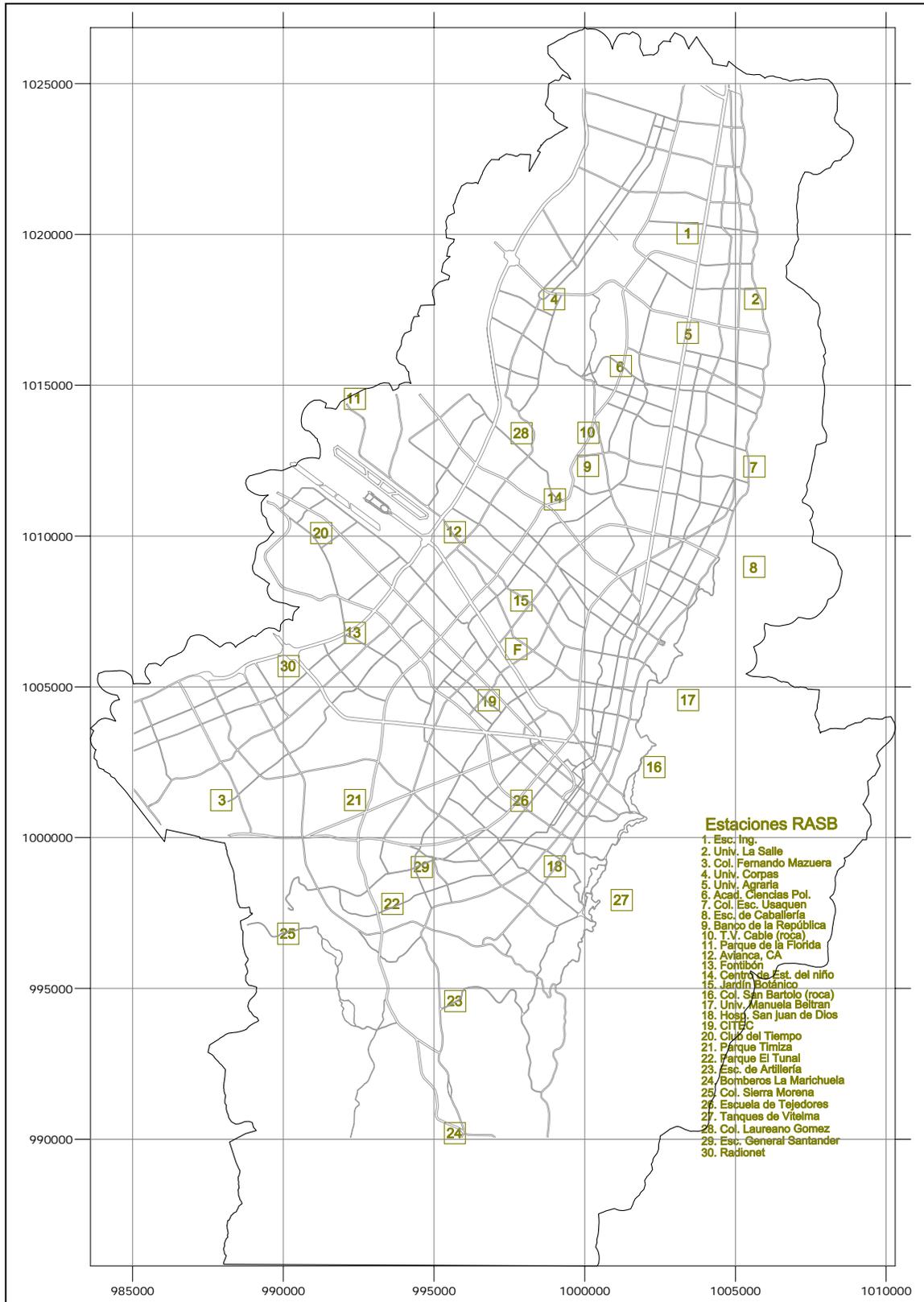


Figura 3.10 Mapa de la Red de Acelerógrafos de Bogotá

3.3.2 Propiedades geotécnicas por zonas

Al unificar la información fue posible realizar un análisis global de los resultados de ensayos de laboratorio tanto estáticos como dinámicos. Para el primer caso los sondeos se agruparon por Zonas Geotécnicas (Figura 3.5) y los resultados se resumen en las Figuras 3.11 a 3.15.

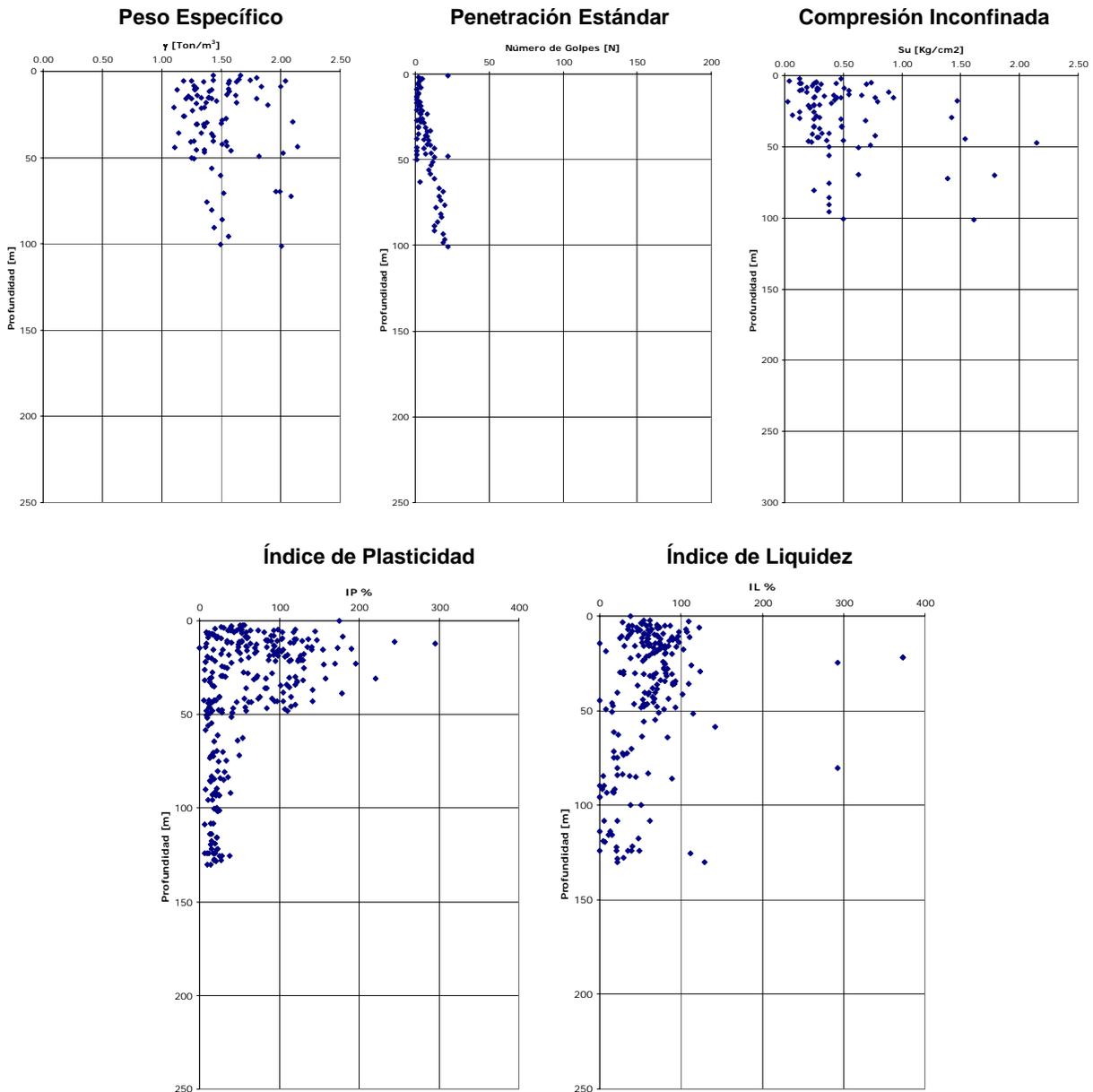


Figura 3.11. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Ronda de ríos y humedales

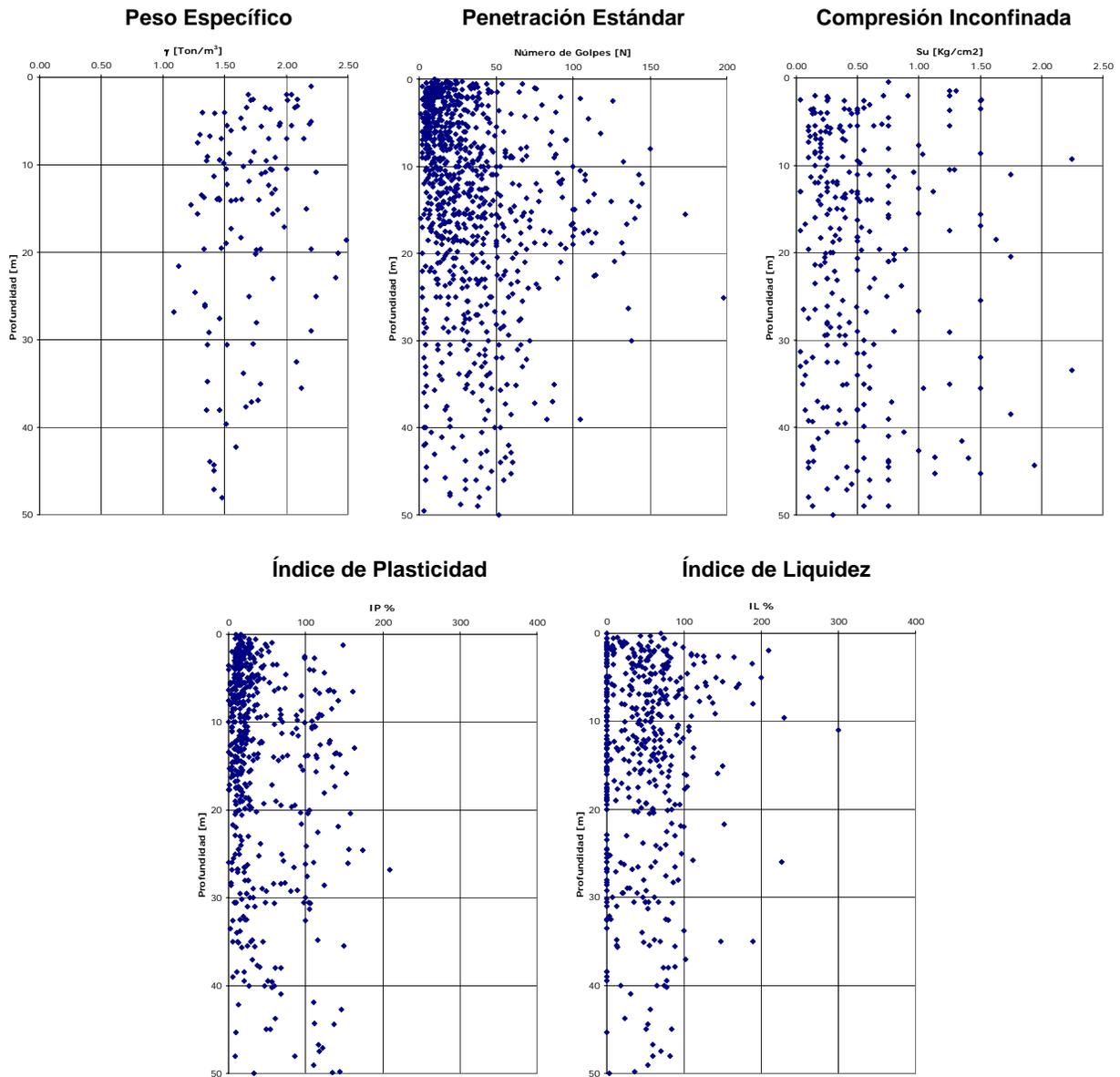


Figura 3.12. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Piedemonte

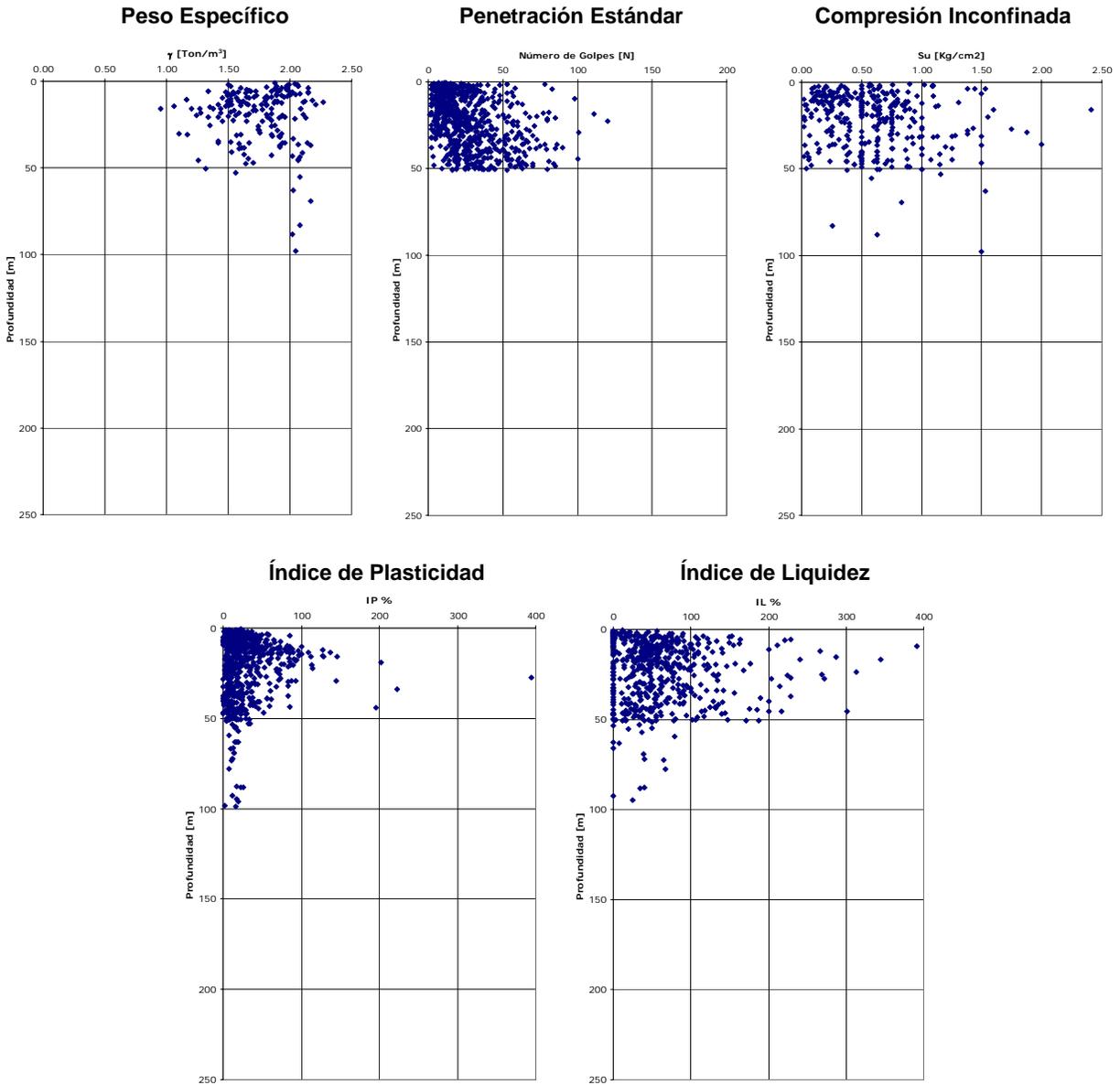


Figura 3.13. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Suelo Duro

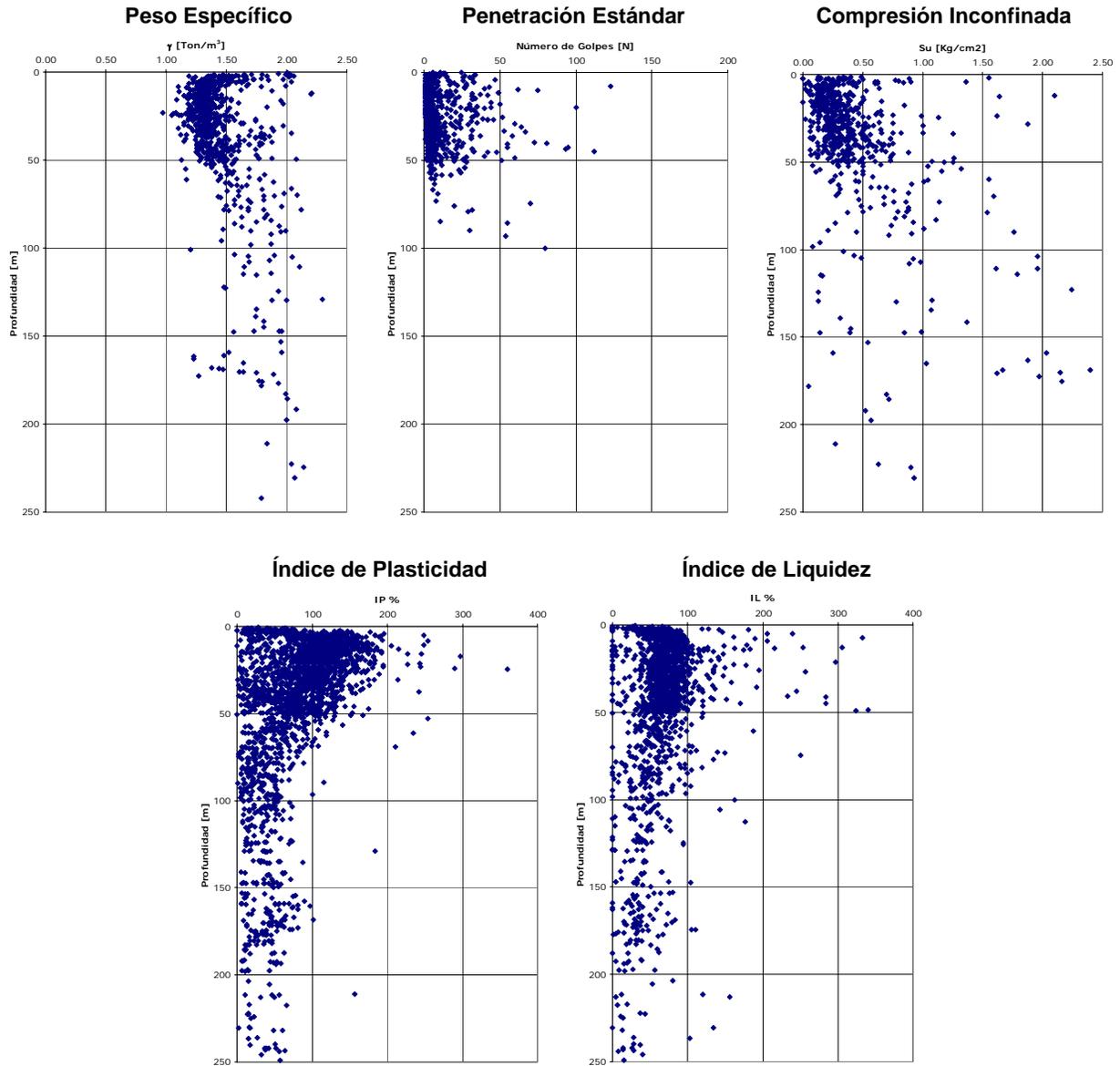


Figura 3.14. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Arcilla Blanda

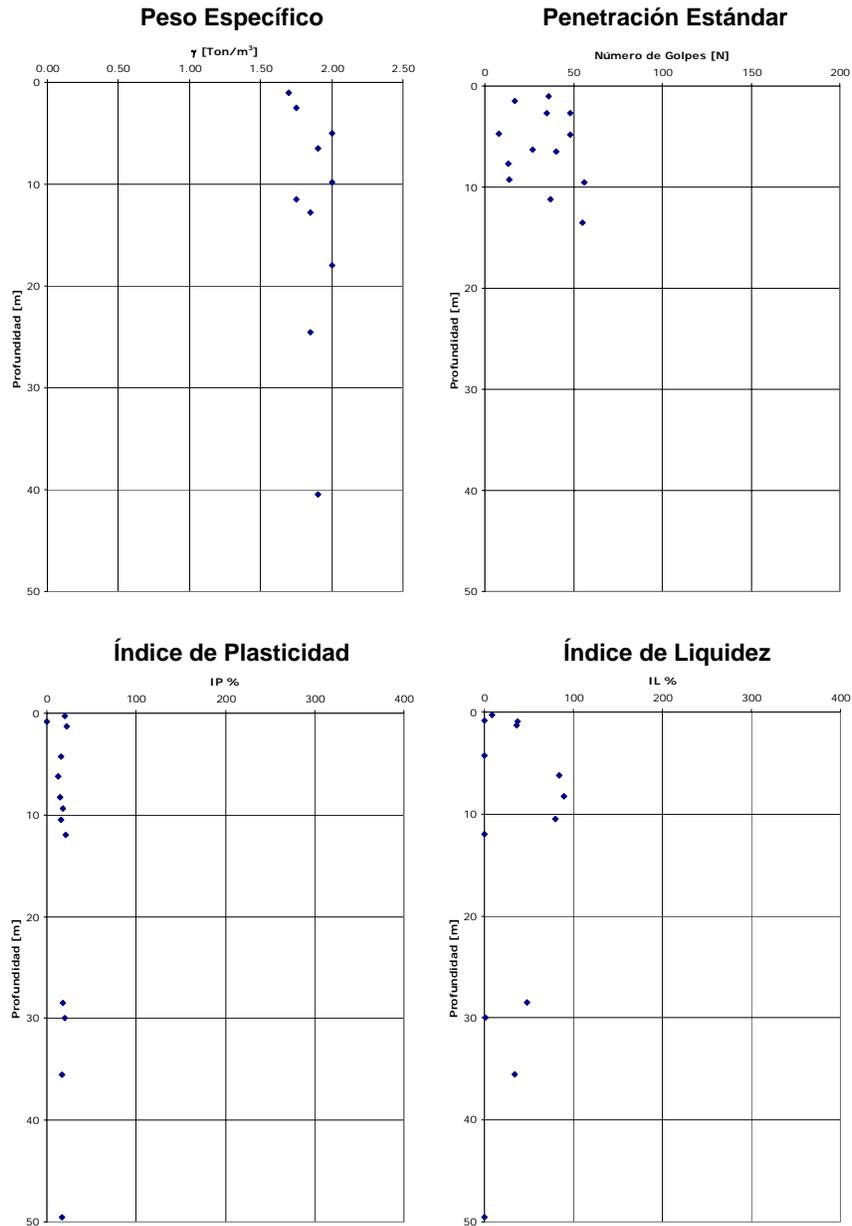


Figura 3.15. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Roca

3.3.3 Propiedades dinámicas de los suelos

Los resultados de ensayos dinámicos reportados por diferentes estudios y laboratorios presentan problemas de calidad de información, según el tipo de ensayos realizados y el procedimiento de interpretación. Debido a esto, se decidió clasificarlos según la calidad de información. A continuación se presentan algunas figuras de referencia para analizar estos aspectos.

Tabla 3.8. Criterios de calificación de Ensayos Dinámicos

Calidad	Ensayo Bender	Número de Ciclos
Buena	SI	7 o más
Regular	SI	< 7
	NO	7 o más
Mala	NO	< 7

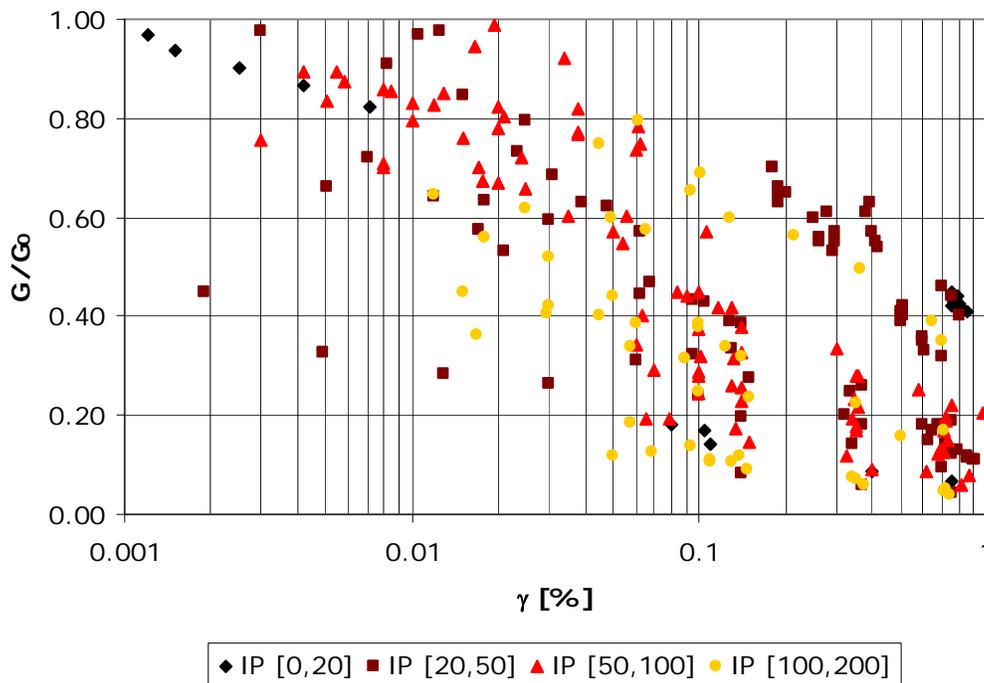


Figura 3.16. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Buena”

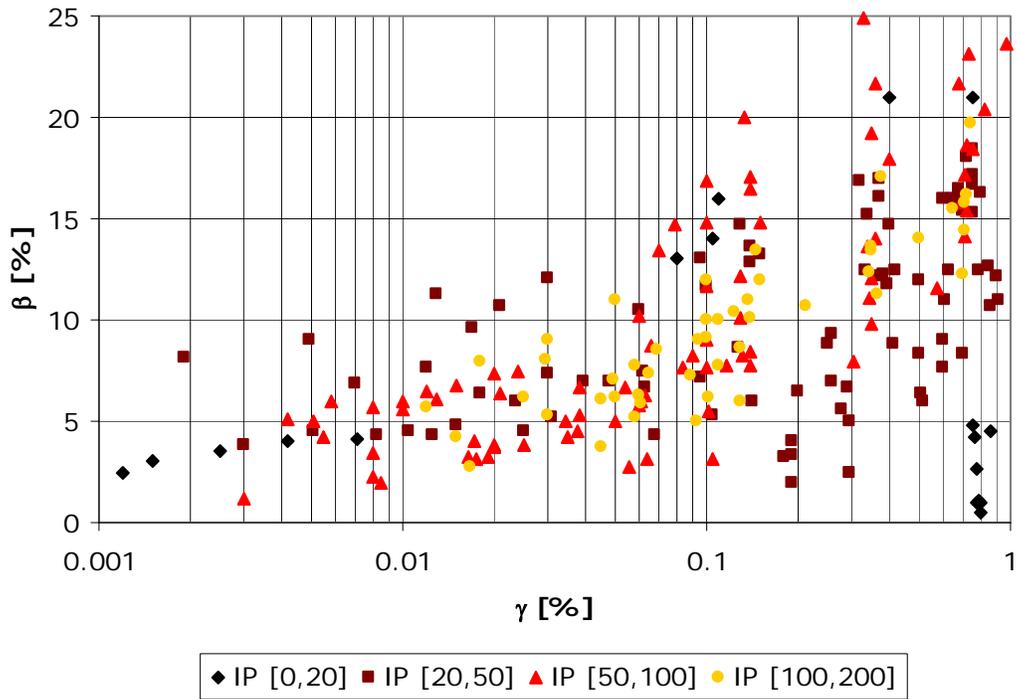


Figura 3.17. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Buena”

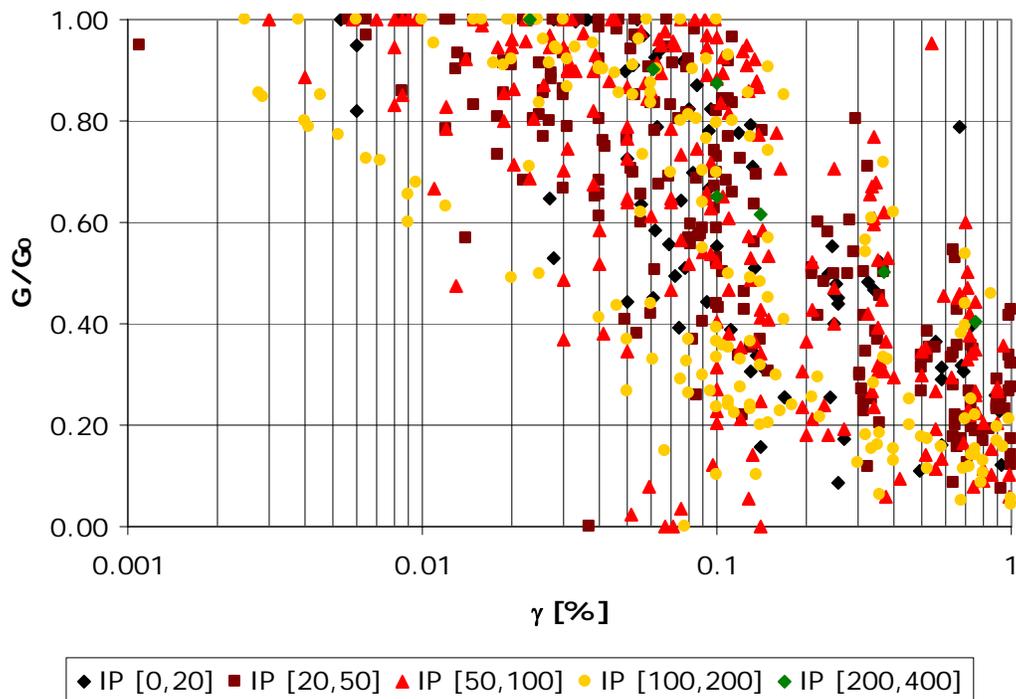


Figura 3.18. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Regular”

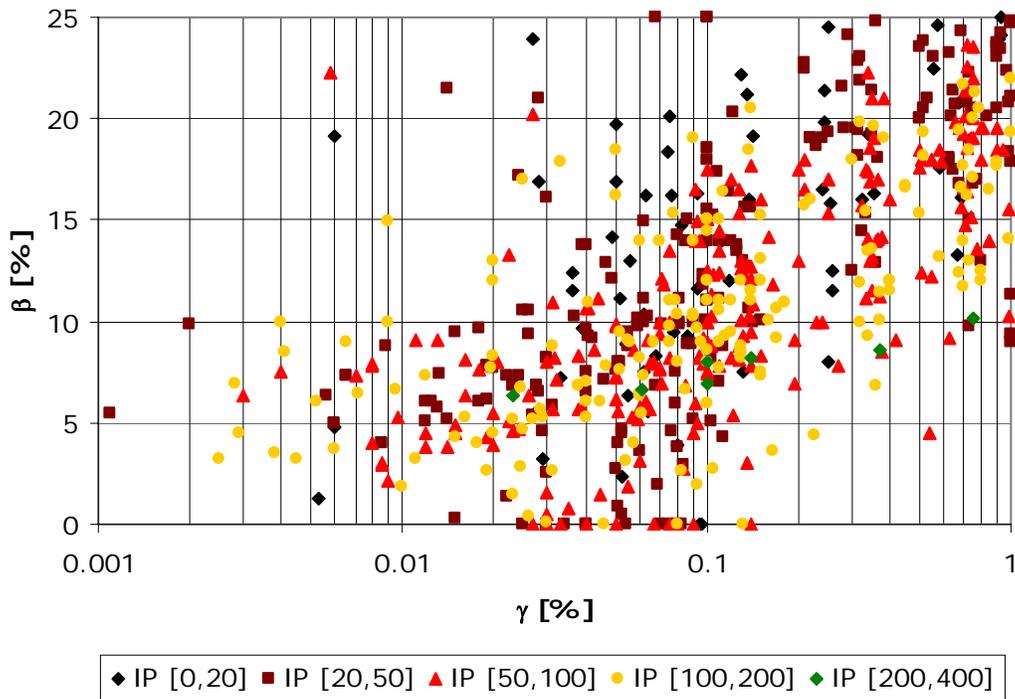


Figura 3.19. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Regular”

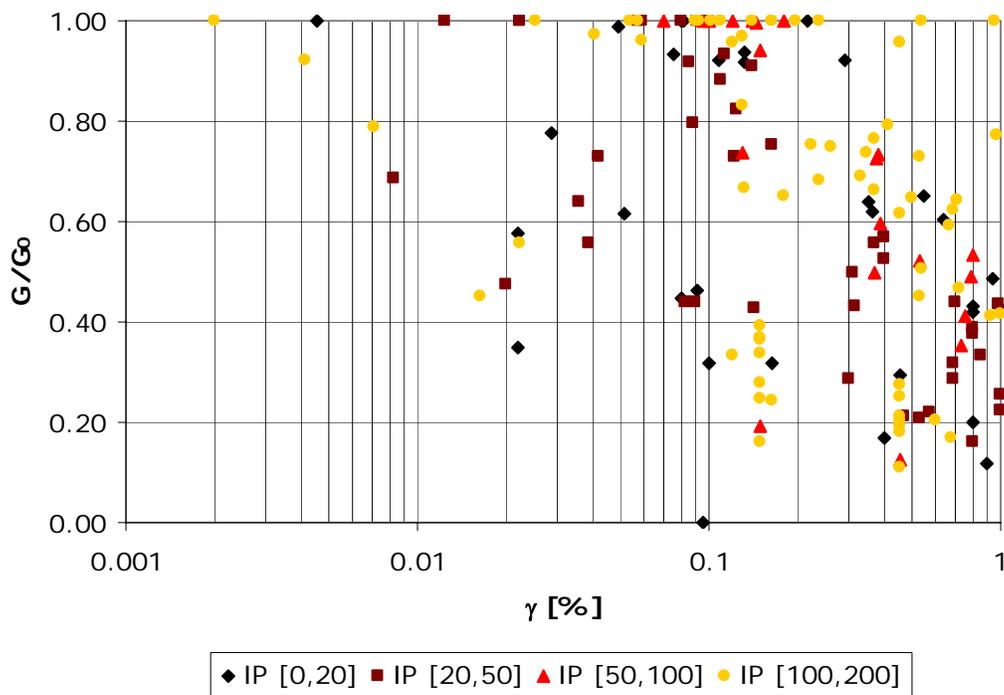


Figura 3.20. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Mala”

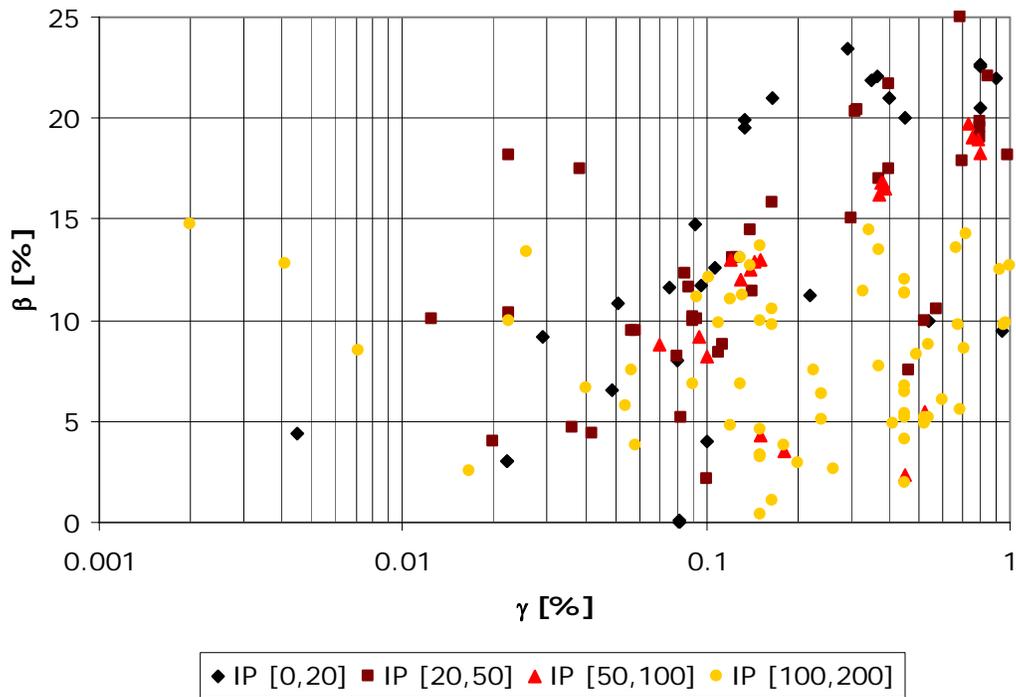


Figura 3.21. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Mala”

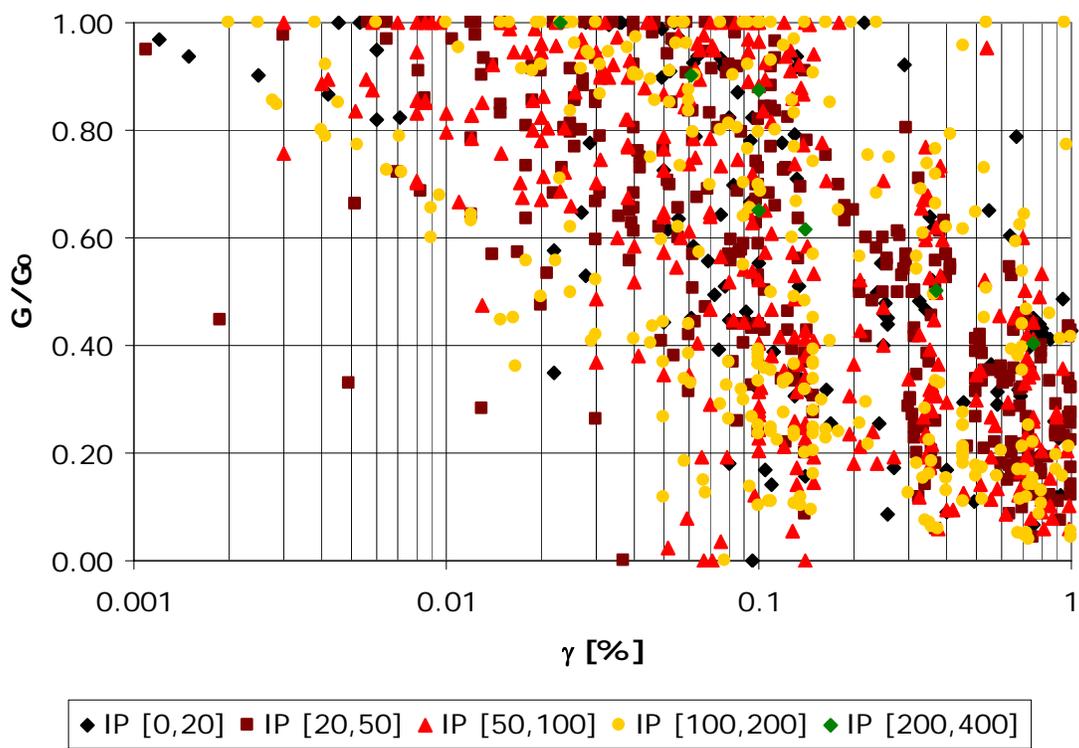


Figura 3.22. Resumen curvas de degradación rigidez

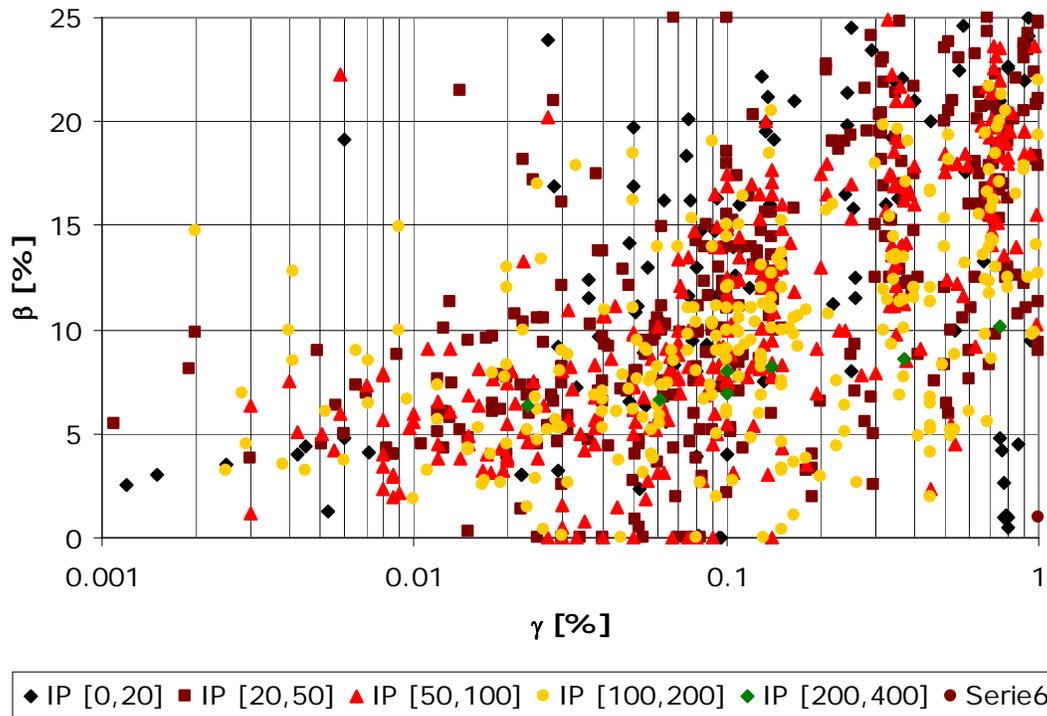


Figura 3.23. Resumen curvas de amortiguamiento

3.3.4 Cortes estratigráficos representativos

En el Anexo 3.3 se presentan algunos cortes característicos con información primaria para efectos de interpretaciones futuras y análisis bidimensional de la respuesta dinámica en la ciudad de Bogotá.

3.4 BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía Mayor de Bogotá. Decreto 193 de 2006.

Alfaro, A. 1997 Estimación de Periodos Predominantes de suelos en Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Informe ICC No. GS091-97.

ASTM American Society of Testing Materials. 1994. 1994 Annual Book of ASTM Standards. Vols. 04.08 – 04.09. Soils and Rocks. Philadelphia, Pa, USA.

Biarez, 1994. Elementary Mechanics of Soils Behaviour". Editorial Balkema.

Castro , E., Vargas, G & Moreno, M. 1998. Zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, Valle del Cauca. VII Congreso Colombiano de Geotécnica (SCG), Bogotá, Octubre 1998.

CIMOC - Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, CEDERI - Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 1999. Vulnerabilidad Sísmica del Sistema de Distribución y Suministro de Gas Natural en Santa fe de Bogotá. Empresa de Servicios Públicos Gas Natural.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDES, 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.

Hicher, 1991. Cours de Réologie des Sols, Ecole central de París

Intituto de Desarrollo Urbano, 1999. Estudios Geotécnicos Preliminares para la Primera Línea del Metro de Bogotá,

Ingeominas & Universidad de los Andes, 1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fé de Bogotá.

Ingeominas. 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999). Informe Técnico - Científico.

Lermo L. & Chávez-García 1994. Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?. Bull. Of the Seism. Soc. Am., 84, 1350-1364.

Moreno, H. & Martinez, E. 1996. Estudio Geomorfológico y soluciones propuestas para la protección de Restrepo y el Puente sobre el río Upin. VI Congreso Colombiano de Geotécnica (SCG), Bucaramanga, Octubre 1996.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. Quaterly Repor of Railway Tech. Inst., 30, 25-33.

Oficina para la Prevención de Emergencias OPES, Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres DNPAD, INGEOMINAS, UNIANDES., 1996. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Subproyecto No 11 Zonificación Sísmica.

Page, W. & James, M. 1981. Landslides and mudflows major contributors to landscape in northwest Colombia. Revista CIAF Vol. 6 (1-3), 1981.

Rust, B. & Kuster, E. Coarse alluvial Deposits. Department of Geology, University of Ottawa.

Sarría, A. 1996. Métodos Geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil.

Seed, H.B & Lee , K.L. 1966. Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 92 (SMG), 105-134.

Selley, R. 1969. Medios Sedimentarios Antiguos. Editorial Blume.

Sociedad Colombiana de Geotécnica. 2006. Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá. Informe preparado para DPAAE

Terzaghi & Peck, 1967. Soil Mechanics.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 3	INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL ANÁLISIS	3-1
3.1	INTRODUCCIÓN	3-1
3.2	BASE DE DATOS GEOTÉCNICA DE BOGOTÁ	3-2
3.3	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	3-14
3.3.1	Mapas disponibles	3-14
3.3.2	Propiedades geotécnicas por zonas	3-21
3.3.3	Propiedades dinámicas de los suelos	3-26
3.3.4	Cortes estratigráficos representativos	3-30
3.4	BIBLIOGRAFÍA	3-31
ANEXO 3.1 – MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS DISPONIBLES		
ANEXO 3.2 – BASE DE DATOS GEOTÉCNICA DE BOGOTÁ		
ANEXO 3.3 – CORTES ESTRATIGRÁFICOS REPRESENTATIVOS		

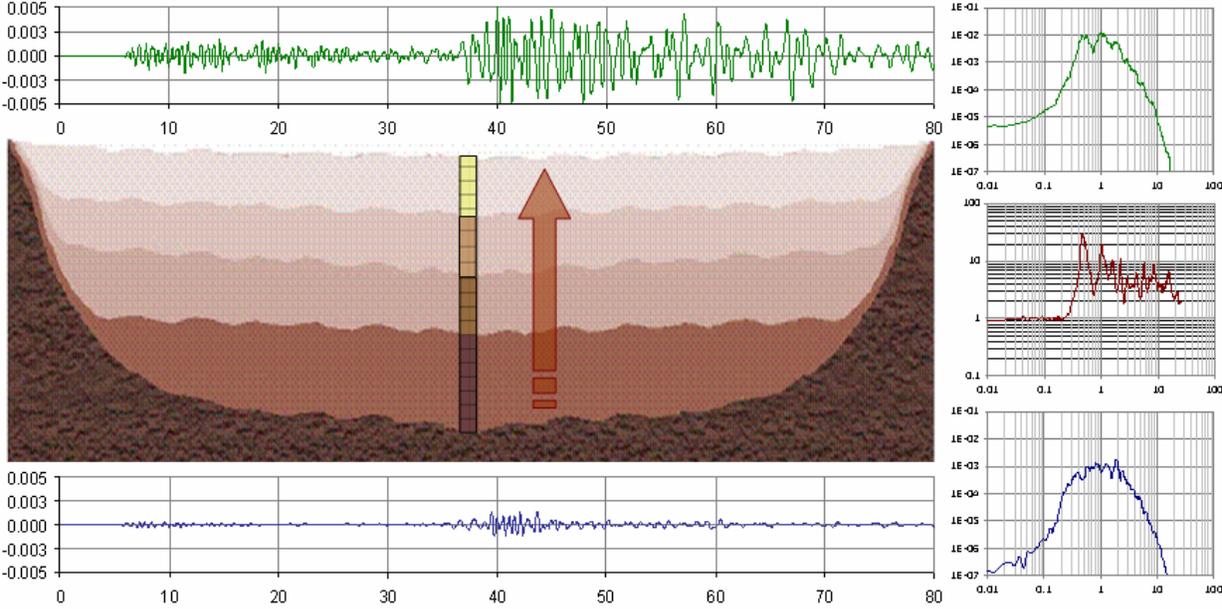
LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Mapa de localización de sondeos.....	3-8
Figura 3.2 Formato de Información general de los sondeos.....	3-11
Figura 3.3 Formato de Información estratigráfica y de ensayos estáticos.....	3-12
Figura 3.4 Formato de Información de ensayos dinámicos	3-13
Figura 3.5 Mapa de Zonificación Geotécnica.....	3-15
Figura 3.6 Mapa de profundidad de depósito blando [m].....	3-16
Figura 3.7 Mapa de profundidad estimada de la formación Subachoque [m]	3-17
Figura 3.8 Mapa de isoperiodos dominantes del suelo.....	3-18
Figura 3.9 Mapa de Microzonificación Sísmica (Decreto 193 de 2006)	3-19
Figura 3.10 Mapa de la Red de Acelerógrafos de Bogotá	3-20
Figura 3.11. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Ronda de ríos y humedales	3-21
Figura 3.12. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Piedemonte	3-22
Figura 3.13. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Suelo Duro	3-23
Figura 3.14. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Arcilla Blanda	3-24
Figura 3.15. Variación de las propiedades geotécnicas en función de la profundidad – Zona Roca.....	3-25
Figura 3.16. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Buena”	3-26
Figura 3.17. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Buena”	3-27
Figura 3.18. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Regular”	3-27
Figura 3.19. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Regular”	3-28
Figura 3.20. Curvas de degradación rigidez Ensayos de Calidad “Mala”	3-28
Figura 3.21. Curvas de amortiguamiento Ensayos de Calidad “Mala”	3-29
Figura 3.22. Resumen curvas de degradación rigidez.....	3-29
Figura 3.23. Resumen curvas de amortiguamiento	3-30

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Sondeos Realizados para Microzonificación de Bogotá.....	3-3
Tabla 3.2. Sondeos recopilados para el proyecto Metro de Bogotá	3-4
Tabla 3.3. Sondeos Realizados para el proyecto Metro de Bogotá.....	3-5
Tabla 3.4. Estudios locales recopilados por DPAA.....	3-6
Tabla 3.5. Estudios adicionales incluidos.....	3-7
Tabla 3.6. Base de Datos de información general	3-9
Tabla 3.7. Campos incluidos en la Base de Datos de Ensayos Dinámicos.....	3-10
Tabla 3.8. Criterios de calificación de Ensayos Dinámicos.....	3-26

RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO



CAPÍTULO 4 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO

4.1 INTRODUCCIÓN

4.1.1 Generalidades

La respuesta dinámica de los suelos genera grandes diferencias tanto en amplitud como en el contenido frecuencial de registros en superficie en comparación con las señales en terreno firme (p.e. sismo de México 1985). Los cambios en las señales sísmicas generados por la propagación de onda en los estratos de suelo inciden directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las edificaciones ante un terremoto. Por esta razón para generar diseños adecuados en el desarrollo de obras civiles en países con amenaza sísmica alta o intermedia (como es el caso de Colombia) es de vital importancia estimar los efectos de amplificación o deamplificación sísmica generados por los estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico.

En la actualidad se dispone de un gran número de procedimientos numéricos para estimar la respuesta dinámica del subsuelo. Estos procedimientos consideran en mayor o menor medida la complejidad del comportamiento dinámico de los suelos, en los cuales se evidencia un claro comportamiento no lineal. De todas las metodologías disponibles la que ha sido utilizada con mayor frecuencia es la propagación unidimensional de onda cortante utilizando un modelo lineal equivalente. Este procedimiento se basa en el concepto de la matriz propagadora planteado por Haskell en 1953.

Gracias al desarrollo de los computadores ha sido posible utilizar métodos que representan de mejor manera el comportamiento del entorno en el cual se desarrollan los problemas de la ingeniería. En particular la utilización de nuevas metodologías en el análisis de la respuesta dinámica del suelo ha arrojado resultados más cercanos a lo registrado en eventos sísmicos ocurridos en los últimos años.

La metodología de análisis implementada en el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Bogotá [Ordaz, 1994] permite estimar intensidades sísmicas (aceleración espectral, aceleración máxima, velocidad máxima ó desplazamiento máximo del terreno, etc) con una tasa de ocurrencia dada, teniendo en cuenta no solo las características de las fuentes sísmicas (geométricas y de sismicidad) sino también los efectos que induce sobre las ondas sísmicas la propagación en un perfil de suelo. Con base en estos resultados es posible determinar zonas con comportamiento sísmico “homogéneo” en las cuales se pueda establecer recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones.

La respuesta sísmica local o respuesta de sitio ha sido reconocida internacionalmente como un aspecto fundamental en los estudios de microzonificación sísmica de ciudades. Las metodologías propuestas en la actualidad para la evaluación de estos efectos de sitio pueden ser empíricas o teóricas, cada una de las cuales tiene ventajas y desventajas. Por un lado, los modelos teóricos, como los utilizados en los estudios de Microzonificación Sísmica de Popayán o los estudios de Microzonificación Sísmica de Bogotá permiten el análisis de sensibilidad de

diferentes factores y posibilitan el estudio de respuesta ante diferentes señales de entrada que representarían sismos hipotéticos futuros.

Sin embargo, este tipo de análisis requiere información geotécnica detallada y métodos computacionales avanzados. Por otro lado, existen los métodos empíricos que se basan en datos registrados ya sea de movimientos fuertes o débiles del terreno para diferentes ubicaciones en el área bajo estudio. Estos registros se analizan de diferentes maneras para obtener los períodos predominantes de vibración y las amplificaciones del terreno con respecto a registros en roca. Estos últimos métodos han tenido mucha difusión en los últimos años, especialmente en zonas de alta sismicidad donde es posible registrar una gran cantidad de eventos sísmicos de baja magnitud en lapsos de tiempo relativamente cortos. Sin embargo para su adecuada implementación requieren de un buen número de equipos lo cual implica altas inversiones iniciales y costos importantes asociados al mantenimiento de los equipos que conforman la red.

Dentro de los métodos empíricos se utilizan entonces las señales que puedan provenir de sismos pequeños y que sean registrados tanto en roca como en los suelos relativamente más blandos dentro de la zona de estudio. Estos datos son vitales ya que permiten conocer confiablemente, aunque sea a pequeñas amplitudes y por lo tanto probablemente en el rango elástico y de bajo amortiguamiento de los suelos, las características dinámicas de la respuesta de sitio. Con base en estas mediciones y utilizando modelos analíticos de los depósitos de suelo complementados con ensayos de laboratorio de muestras extraídas del mismo perfil de suelo se puede llegar a predecir de manera confiable la respuesta sísmica del subsuelo ante sismos de mayor intensidad. Por otro lado, cuando no se dispone de información de sismos menores o cuando se desea estimar la respuesta en sitios en los cuales no exista instrumentación sísmica, se ha propuesto utilizar registros de ruido sísmico ambiental, llamados comúnmente 'microtrepidaciones', 'microtremores' ó 'microsismos'.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y con el alcance establecido, el presente capítulo incluye fundamentalmente la evaluación de la respuesta sísmica de los depósitos utilizando modelos unidimensionales en los que se analiza principalmente la eventual amplificación de las señales en el rango completo de frecuencias, sin tener en cuenta efectos topográficos o heterogeneidades en los depósitos subsuperficiales. La respuesta dinámica del subsuelo se conjuga con los modelos de amenaza sísmica presentados anteriormente para obtener la amenaza sísmica final a nivel de la superficie del terreno.

4.1.2 Metodologías de análisis

Durante un sismo, se presentan principalmente dos tipos de respuesta de sitio que pueden llegar a producir problemas de consideración. Uno en el que el suelo modifica el contenido frecuencial y la amplitud del sismo, haciéndolo más destructivo; en el otro el suelo mismo falla y se fisura, moviéndose horizontal y verticalmente.

Dentro de la literatura disponible, Finn (1991), Sanchez-Sesma et al (1988), Seed et al (1972), presentan las distintas aproximaciones que generalmente se usan para determinar la respuesta de sitio:

- *Estudio mediante métodos empíricos* que se basan en datos registrados ya sea de movimientos fuertes o de movimientos débiles del terreno para diferentes ubicaciones en

el área bajo estudio. Estos registros se analizan de diferentes maneras para obtener los períodos predominantes de vibración y las amplificaciones del terreno con respecto a registros en roca. Estos últimos métodos han tenido mucha difusión en los últimos años, especialmente en zonas de alta sismicidad donde es posible registrar un buen número de eventos sísmicos de baja magnitud en lapsos de tiempo relativamente cortos.

- *Registro de microtrepidaciones*, cuando no se dispone de información de sismos menores o cuando se desea estimar la respuesta en sitios en los cuales no exista instrumentación sísmica, se ha propuesto utilizar registros de ruido sísmico ambiental, llamados comúnmente ‘microtrepidaciones’ o ‘microtremores’
- *Estudio de la respuesta dinámica de sitio*, mediante modelos analíticos de propagación unidimensional de ondas de cortante, en los cuales el sitio es un medio semi-infinito estratificado en las distintas capas de material de suelo que componen el perfil (Schnabel et al., 1972). Este tipo de análisis es capaz de modelar la respuesta no-lineal e identificar las características más importantes de los movimientos sísmicos en superficie; el período de vibración de la columna de suelo, el corrimiento del período fundamental al ir incrementando la intensidad del movimiento sísmico y la amplificación o deamplificación de las aceleraciones a distintas frecuencias.

Investigaciones adelantadas por Lermo (1994) y otros han demostrado que el uso de métodos empíricos basados en factores de amplificación o relaciones espectrales derivadas de movimientos sísmicos de baja intensidad pueden no ser aplicables para estimar la respuesta de sitio frente a un movimiento sísmico fuerte.

4.1.3 Casos históricos – Efectos de sitio

Los estudios de la respuesta de sitio son esenciales para definir y entender el papel que juega el perfil geológico, las propiedades estáticas y dinámicas del suelo y la topografía en la respuesta sísmica de un sitio. Los efectos de sitio han contribuido enormemente a las muertes humanas y a los daños en las construcciones en los terremotos. Para ilustrar lo anterior, la Tabla 4.1 contiene una lista parcial de los sismos que han ocurrido en los últimos 70 años en el mundo, donde los efectos de sitio han sido importantes.

Dos sismos que han sido cruciales para entender la incidencia de las condiciones de sitio en la respuesta sísmica local y verificar las capacidades de los métodos mencionados anteriormente son el sismo de México (Michoacán) de 1985 y el sismo de Lomapieta de 1989.

Tabla 4.1 Sismos en que los efectos de sitio han sido importantes

SISMO	AÑO
Nigata	1964
Alaska	1964
Caracas	1967
Nihonkai-Chubu, Japón	1983
México	1985
Kalamata, Grecia	1986
Armenia, URSS	1988
Loma Prieta, USA	1989
Filipinas	1990
Armenia, Colombia	1999

El estado del conocimiento en materia de amplificación y deamplificación de los movimientos sísmicos en términos de la aceleración pico ha sido resumido en la Figura 4.1 (Singh, 1988). De acuerdo con ésta, la deamplificación en los suelos blandos comienza a partir de 0.1g y empieza a ser importante alrededor de 0.3g.

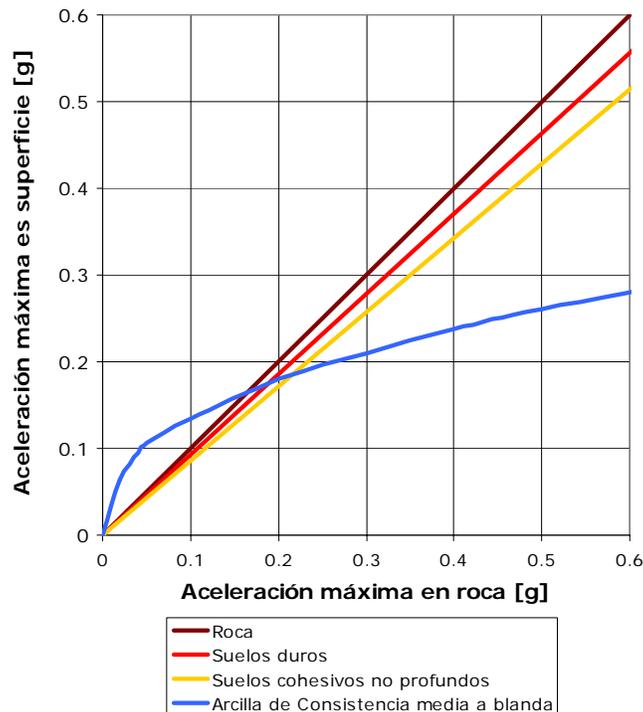


Figura 4.1 Amplificación y deamplificación de los movimientos sísmicos en términos de la aceleración pico (Fuente : Seed & Idriss, 1983)

La respuesta sísmica de los suelos arcillosos de México, y de los suelos blandos de California en el sismo de Lomapieta, cambió este punto de vista. Idriss (1990) proporciona una visión corregida de la amplificación o deamplificación y el resultado de sus investigaciones basadas en modelos unidimensionales de propagación ondulatoria se presenta en la Figura 4.2. En esta nueva versión, se aprecia que una mayor amplificación se atribuye ahora a los suelos blandos y que el rango en que la amplificación ocurre, subió de 0.1g a 0.4g. Al analizar las Figuras 4.1 y 4.2 surge un interrogante: ¿Por qué el entendimiento de la respuesta sísmica cambió tan dramáticamente de 1983 a 1990?. Una primera aproximación a la respuesta puede darse en términos de un mejor conocimiento por parte de los ingenieros del comportamiento dinámico de los suelos de alta plasticidad, tales como las arcillas de México.

El sismo de México y el de Lomapieta sirven para ilustrar los dos tipos principales de respuesta de sitio. El de México ilustra el tipo de respuesta en el que el suelo modifica el contenido frecuencial y la amplitud del sismo, haciéndolo más destructivo. Por otro lado, el sismo de Lomapieta ilustra el tipo de respuesta en el que el suelo mismo falla y se fisura, moviéndose horizontal y verticalmente, generando complementariamente problemas de licuefacción.

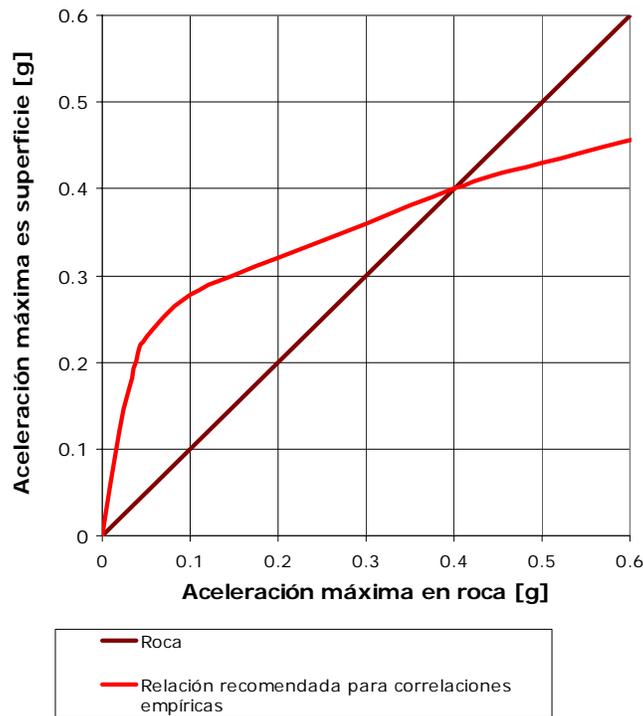


Figura 4.2 Corrección de la amplificación y deamplificación (Fuente : Idriss, 1990)

4.1.3.1 Sismo de México

En Septiembre 19 y 21 de 1985 dos grandes eventos sísmicos ($M_s=8.1$ y 7.5) ocurrieron en el segmento de la zona de subducción de la costa pacifica Mexicana (Chávez-García y Bard, 1994). El rompimiento se originó en el contacto de la placa Continental con la placa de Cocos, ubicándose el epicentro en la zona de silencio sísmico de Michoacán (Romo, 1986). El choque principal consistió de dos subeventos separados 26 segundos en el tiempo. La aceleración pico en la zona epicentral fue inusualmente baja (0.2 g a 20 km del epicentro).

El sismo de México causó fuertes daños en el valle de Ciudad de México, ubicado aproximadamente a 400 km de la zona epicentral. Las consecuencias de este sismo dejó trazos fuertes en la economía y en la vida diaria de la ciudad. Las aceleraciones máximas en la zona lacustre de la ciudad fueron del orden de las producidas en la zona epicentral y dejaron más de 50.000 personas sin hogar y pérdidas de billones de dólares (Chávez-García y Bard, 1994).

La importancia del sismo de México y sus consecuencias para la vida de una ciudad moderna construida de acuerdo con unos reglamentos sísmicos, ha dejado una enorme inquietud para los investigadores en sismología, ingeniería sísmica, dinámica de suelos y dinámica estructural. Los resultados de 65 proyectos de investigación, financiados por el Gobierno de México y de los Estados Unidos han sido publicados en tres números especiales de la Revista *Earthquake Spectra* en 1988 y 1989.

El estudio de los efectos de sitio y de las características de los registros sísmicos en ciudad de México, es muy importante ya que es el primer caso en el que se cuenta con gran cantidad de registros y se conoce en forma aceptable las características del subsuelo.

El valle de Ciudad de México se ha dividido en tres zonas de acuerdo con su formación geológica y geotécnica. La zona de los cerros, la zona de transición y la zona lacustre. Mientras que en la zona epicentral las aceleraciones registradas fueron bajas, dada la magnitud del sismo, las ondas sísmicas fueron sorprendentemente amplificadas dentro del valle de Ciudad de México, especialmente en la zona lacustre y la larga duración de los registros en dicha zona ha sido un aspecto aún investigado por distintos grupos técnicos a lo largo del mundo (Sanchez-Sesma et al, 1988; Singh et al, 1988).

En México se presentaron sitios en que las aceleraciones pico en suelo blando (zona lacustre) fueron del orden de 3 y 5 veces las aceleraciones registradas en roca (zona de los cerros) y la respuesta del subsuelo, permaneció esencialmente elástica no obstante, de ser el pico de aceleración de 0.2 g, lo cual es explicable al analizar las curvas normalizadas de módulo de corte contra deformación por cortante (G/G_{max} vs. γ) y de amortiguamiento contra deformación por cortante (Romo & Jaime, 1987), las cuales se presentan en la Figura 4.3. El módulo de corte, no muestra una degradación substancial para deformaciones menores a 0.1%, con lo cual la respuesta permanece elástica porque no ocurre una considerable pérdida de rigidez para las deformaciones desarrolladas en el sismo.

Dentro de las investigaciones adelantadas en Ciudad de México y presentadas en el *Earthquake Spectra*, es de resaltar la de Seed et al (1988) en la que se establece que los efectos en Ciudad de México tienen una enorme diferencia en intensidad y en los daños a edificios en distintas zonas de la ciudad. También allí se establece que la respuesta de sitio, es sensitiva a pequeños cambios en la velocidad de la onda de cortante del estrato superficial de arcilla de Ciudad de México, razón por la cual es necesario realizar una aproximación probabilística a la respuesta de sitio, que tome en cuenta las incertidumbres en las mediciones de la velocidad de la onda de cortante y en las características de los movimientos en la base rocosa.

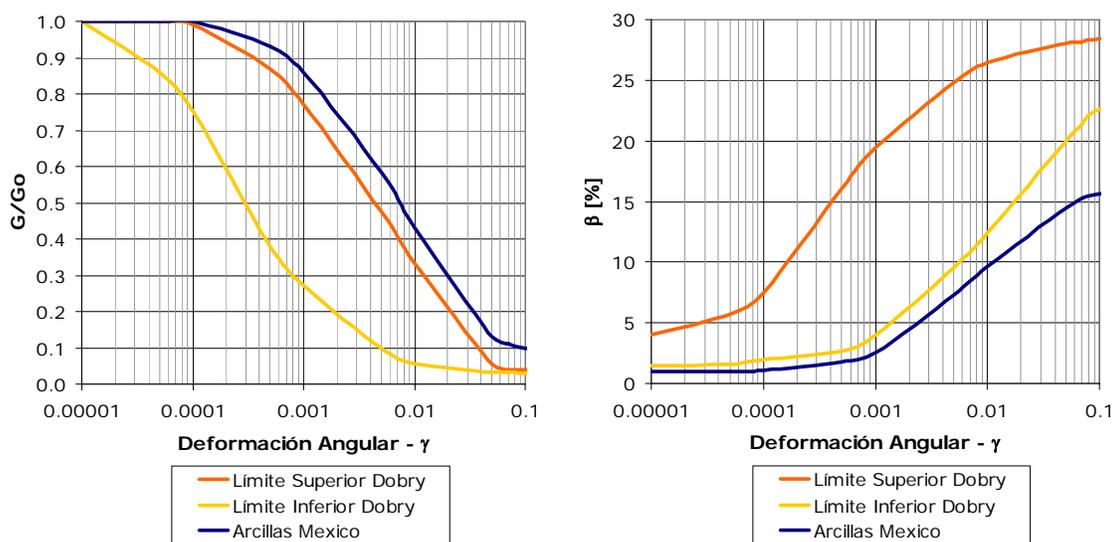


Figura 4.3 Relación entre modulo de cortante y coeficiente de Amortiguamiento vs Deformación (Fuente Dobry & Vucetic, 1987)

La metodología seguida por Seed et al (1988) para caracterizar la respuesta de sitio en Ciudad de México incluye el muestreo de suelos en las distintas estaciones acelerométricas ubicadas en Ciudad de México y su correspondiente caracterización dinámica en el laboratorio, mediante ensayos de columna resonante y triaxial cíclico, determinación de las curvas normalizadas de módulo de corte contra deformación por cortante (G/G_{\max} vs. γ) y de amortiguamiento contra deformación por cortante (β vs. γ) (Romo & Jaime, 1987), definición del registro de aceleraciones que mejor representaba los movimientos sísmicos en la formación rocosa (resultó ser el correspondiente a la UNAM), formulación de modelos unidimensionales tipo SHAKE (Schnabel et al, 1972) de los diferentes sitios de las estaciones acelerométricas y comparación de sus respuestas en términos del espectro de aceleración medido con el calculado usando los modelos.

El ajuste encontrado por Seed et al (1988) es calificado por ellos mismos como de “bueno a muy bueno”. Sin embargo, el alcance de los resultados de Seed et al (1988) ha sido cuestionado seriamente por Chávez-García y Bard (1994) ya que según ellos, para los valles de depósitos aluviales como el de ciudad de México, existe una paradoja tiempo-frecuencia para los modelos de propagación unidimensional; cuando se alcanza un buen ajuste en las funciones de transferencia (espectro de Fourier de la Señal en superficie dividido por el espectro de Fourier de la señal en roca), la simulación en el dominio del tiempo, presenta amplitudes más grandes que las registradas. Por otro lado, cuando se modifica el modelo para obtener un buen ajuste en términos de la respuesta espectral amortiguada, se obtienen funciones de transferencia de una amplitud muy baja respecto a las medidas. Sánchez-Sesma et al (1988) explican la paradoja tiempo-frecuencia como una consecuencia de la saturación del espectro de respuesta, esto es que el espectro de respuesta aunque es una herramienta muy versátil, no refleja las peculiaridades de los movimientos sísmicos y posee una poca sensibilidad a la duración del sismo y a la reflexión y difracción de las ondas sísmicas en las fronteras del valle de México (efectos 2D y 3D) (Chávez-García y Bard, 1994) lo que conlleva a la generación de ondas de Rayleigh y Love que quedan “atrapadas” en la superficie del valle generando resonancias con las ondas de cortante, lo cual hace que los registros en la zona lacustre de Ciudad de México sean inusualmente largos.

Como consecuencia de lo anterior, muchos investigadores han propuesto modelos más sofisticados de amplificación de tipo bidimensional (Chávez-García y Bard, 1994; Sanchez-Sesma et al, 1988) y a menor escala modelos tridimensionales. Lógicamente el costo de estas sofisticaciones es el requerimiento de recursos computacionales de alto nivel, dada la complejidad numérica y el tamaño de las redes de Elementos Finitos que se necesitan para poder representar adecuadamente la geometría del valle de Ciudad de México. Lo anterior conlleva finalmente a que lo que se encuentra en los artículos internacionales son modelos “cualitativos” o soluciones analíticas para casos 2D ó 3D llenas de suposiciones y limitaciones, que pueden dar algunas luces acerca de la respuesta sísmica de cuencas de depósitos aluviales pero no necesariamente reflejan la realidad observada.

4.1.3.2 Sismo de Lomaprieta

El 17 de Octubre de 1989 ocurrió un sismo de magnitud $M_s=7.1$ de 20 segundos de duración en la zona central de California. El epicentro se ubicó en el lugar denominado Lomaprieta, 16 km al este del pueblo costero de Santa Cruz (Ceresis, 1990). El sismo fue sentido en un área de 1'000.000 km² y produjo daños considerables en la zona epicentral, en la zona densamente poblada de la Bahía de San Francisco y en la ciudad de San Francisco. Según datos de Céresis

(1990), el sismo causó 62 muertes, cerca de 3.000 heridos y dejó a más de 12.000 personas sin hogar; el costo de los daños se ha estimado en 7 billones de dólares.

El sismo de Lomapieta se originó en la ruptura de un segmento de 40 km de longitud de la falla San Andrés bajo las montañas de Santa Cruz.

Se obtuvieron 125 registros en 93 estaciones de la Red del programa de instrumentación de California. En los registros también se incluyen los obtenidos en estructuras especiales tales como presas, viaductos y muelles.

Las mayores aceleraciones horizontal y vertical registradas ambas en la zona epicentral fueron 0.64g y 0.47g respectivamente. En la ciudad de San Francisco las aceleraciones variaron entre 0.09g en Rincón Hill al este de San Francisco a 0.21g en Presidio al oeste. En las islas de Yerbabuena y en Treasure se registró en roca 0.60g y 0.16g respectivamente.

Los efectos de sitio más notorios del sismo fueron los siguientes:

- Licuefacción de suelos en la zona epicentral y en el distrito de Marina en la Ciudad de San Francisco.
- Deslizamiento de laderas y caída de rocas en las montañas de Santa Cruz cerca de la región epicentral (Ceresis, 1990).
- Amplificaciones de los movimientos sísmicos en los suelos blandos lo que causó daños importantes a las construcciones de las poblaciones cercanas a la zona epicentral y especialmente en la bahía de San Francisco, en donde las características del suelo (rellenos hidráulicos de arena y estratos profundos de arcilla) magnificaron enormemente los movimientos sísmicos.

Análisis realizados a los registros de aceleraciones obtenidos en suelos blandos en el sismo de Lomapieta (Seed et al, 1989) indican una máxima amplificación (en el orden de 3 a 6) para períodos largos.

Algunas conclusiones acerca de lo observado en la respuesta de sitio en los sismos de México y Lomapieta son las siguientes:

Los sismos de México y Lomapieta poseen algunas características en común. En ambos, los depósitos de arcilla o suelos blandos, suprayacen estratos de roca mucho más rígida localizada a no más de 100-200 m y la definición de "roca" es clara. En ambos, los picos de aceleración son relativamente pequeños ($a_{max} \approx 0.05$ a $0.1g$) y fueron amplificados 2 a 4 veces por efecto del suelo. Las ordenadas de los espectros de respuesta fueron amplificadas más, en el orden de 8 a 15 para el sismo de México y 3 a 6 para el sismo de Lomapieta.

Los efectos observados en los sismos mencionados llaman la atención hacia la posibilidad de que en otros sitios se generen efectos de amplificación equivalentes. Los sismos de Armenia (1999) y Pizarro (2004) son una demostración de que estos efectos ocurren en las ciudades colombianas (eje cafetero y departamento del Valle del Cauca correspondientemente), no solo en los depósitos compuestos por suelos volcánicos superficiales sino en las zonas de rellenos antrópicos ó zona con suelos arcillosos blandos.

4.2 MARCO TEÓRICO: MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA UNIDIMENSIONAL

4.2.1 Formulación General

Los movimientos del terreno en superficie en un depósito de suelo no saturado horizontal pueden ser atribuidos principalmente a la propagación vertical de las ondas cortantes desde la formación rocosa. En esos casos el depósito de suelo puede ser considerado como una viga unidimensional de cortante, debido a que los movimientos en el terreno inducidos por la excitación sísmica en la base son únicamente resultado de la deformación de cortante del suelo.

Uno de los primeros intentos para calcular los movimientos de las capas de suelo sujetas a vibración en la base fue realizado por Jacobsen en 1930. Jacobsen asumió que el suelo se comporta como un material viscoelástico lineal y que la rigidez del suelo es constante con la profundidad, y que el movimiento en la base es horizontal, armónico y simple. Jacobsen utilizó este procedimiento para estimar la amplificación del suelo para depósitos aluviales.

Kanai, Herrera y Rosenblueth y otros investigadores estudiaron con mayor profundidad el mismo problema. La ecuación utilizada por estos investigadores para modelar la respuesta del depósito de profundidad finita ante un movimiento horizontal era:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[G(z) \frac{\partial u}{\partial t} \right] = -\rho a_g \quad (1)$$

En la cual:

- ρ : densidad de masa del suelo.
- c : amortiguamiento viscoso
- u : desplazamiento relativo
- z : altura desde la superficie del depósito
- t : tiempo
- a_g : aceleración horizontal en la base del depósito
- $G(z)$: módulo de cortante a una profundidad z .

Si $G(z)$ es constante con la profundidad la ecuación se reduce a una ecuación diferencial parcial lineal hiperbólica. Si la aceleración a_g es cero, entonces el valor de u en la ecuación anterior corresponde al desplazamiento absoluto a una profundidad z .

Ambraseys consideró que la rigidez del depósito se incrementa linealmente con la profundidad, es decir $G(z) = k * z$, en donde k es una constante. La amplificación del subsuelo y el periodo natural del depósito fueron calculados analíticamente.

En el comienzo de la década de los 70's se desarrollaron un gran número de investigaciones con el fin de determinar las variables que rigen la rigidez de los suelos con la profundidad, en estas investigaciones se encontró que el módulo de cortante (G) en depósitos compuestos por suelos granulares aumenta en proporción a la raíz cuadrada ó la raíz cúbica de la presión de confinamiento. Idriss y Seed utilizaron una variación descrita por la siguiente ecuación

$G(z) = k \cdot \sqrt[3]{z}$, en la cual k es una constante de proporcionalidad. Introduciendo este término en la ecuación 1 se obtiene una ecuación diferencial parcial hiperbólica de segundo orden, la solución de esta ecuación se obtuvo por el método de separación de variables.

Para analizar un depósito con material lineal elástico con variación irregular, Idriss y Seed utilizaron un modelo con masas concentradas. La solución con masas concentradas era esencialmente la utilización del método de las diferencias finitas para resolver la ecuación de estado.

En 1927 Sezawa asumió que el suelo se comporta como un sólido de Voight (es decir, un resorte conectado en paralelo con un disipador viscoso) para amplitudes de deformación relativamente pequeñas. Utilizando esta suposición Kanai planteó la solución al problema de propagación vertical de ondas planas en una capa de suelo viscoelástico. La ecuación de movimiento para este sistema viscoelástico es:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \mu \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} = 0 \quad (2)$$

En la cual:

- ρ : densidad de masa del suelo.
- G : módulo de rigidez
- u : desplazamiento relativo
- z : altura desde la superficie del depósito
- μ : viscosidad del suelo
- t : tiempo

La ecuación 2 fue utilizada por Schnabel, Lysmer y Seed para calcular la respuesta de un depósito de suelo ante una señal de entrada en cualquier lugar del sistema.

Si la excitación en la base corresponde a una función armónica con amplitud máxima W y frecuencia ω , entonces la solución de la ecuación 2 es la siguiente:

$$u(z,t) = W e^{i\omega t} \frac{e^{i\omega z/v^*} + e^{-i\omega z/v^*}}{e^{i\omega H/v^*} + e^{-i\omega H/v^*}} \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$V(z,t) = i \cdot \omega \cdot u(z,t) \quad (4)$$

Donde:

- H : espesor total del depósito.
- V : velocidad absoluta de la partícula a una profundidad z y un tiempo t .
- v^* : velocidad de cortante compleja igual a $v^* = \sqrt{(G + i\mu\omega)/\rho} = \sqrt{G^*/\rho}$ en la cual G^* es el módulo de cortante complejo.
- z : altura desde la superficie del depósito
- μ : viscosidad del suelo
- t : tiempo
- ρ : densidad

El método de las características en la forma de solución gráfica fue usado por primera vez por Westergaard en 1933, para encontrar el cortante horizontal en edificios idealizados como vigas de cortante. Este método solo podía ser utilizado si la excitación en la base tenía una forma simple (p.e. una función sinusoidal).

En la década de los 60 fueron solucionadas un gran número de problemas de transientes en sistemas hidráulicos mediante el método de las características en los cuales la ecuación diferencial representativa era hiperbólica. En 1973, Streeter, Wylie y Richart utilizaron el método de las características para la propagación de ondas en suelos. Las ondas de cortante inducidas por el sismo en materiales lineales y con rigidez degradante con el desplazamiento fueron considerados por estos autores. El comportamiento del suelo en la ecuación utilizada en esta investigación fue dividido en dos términos diferentes, el primero de los términos es proporcional a las deformaciones de cortante (γ) y el segundo de los términos es proporcional al cambio de la deformación de corte. Con estas suposiciones se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} = 0 \quad (5)$$

En la cual:

τ :	esfuerzo cortante
G :	módulo de rigidez
V :	velocidad de la partícula
u :	desplazamiento relativo
z :	altura desde la superficie del depósito
μ :	viscosidad del suelo
t :	tiempo

Bajo condiciones dinámicas la ecuación de movimiento puede ser escrita como:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Se debe anotar que si deriva la ecuación 5 con respecto a z y se substituye en la ecuación 6, se obtiene la ecuación 2. Debido a la velocidad es $V = \partial u / \partial t$, la ecuación 6 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Derivando la ecuación de estado (Ec. 5) con respecto al tiempo y utilizando la velocidad de la partícula en vez del desplazamiento, Streeter, Wylie y Richard obtuvieron la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} - G \frac{\partial V}{\partial z} - \mu \frac{\partial^2 V}{\partial z \partial t} = 0 \quad (8)$$

El tercer término de la ecuación 8 fue aproximado de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z \partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{\partial V}{\partial z} - \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_C \right] \quad (9)$$

En esta ecuación el subíndice C denota el valor determinado en el punto C del diagrama z-t (Fig 4.5). Mediante el uso de diferencias finitas la ecuación 8 se convierte en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} - \left(G + \frac{\mu}{\Delta t} \right) \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\mu}{\Delta t} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_C = 0 \quad (10)$$

Las ecuaciones 7 y 10 son dos ecuaciones diferenciales parciales con dos variables dependientes (el esfuerzo cortante y la velocidad de la partícula) y dos variables independientes (la profundidad de la capa de suelo y el tiempo). El método de las características es una técnica matemática utilizada para transformar estas ecuaciones diferenciales parciales en cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias que pueden ser resueltas mediante el uso de una técnica adecuada de diferencias finitas.

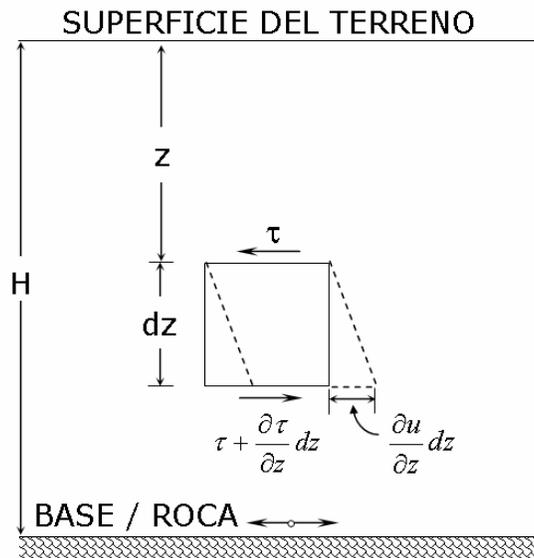


Figura 4.4 Esquema elemento unidimensional de suelo

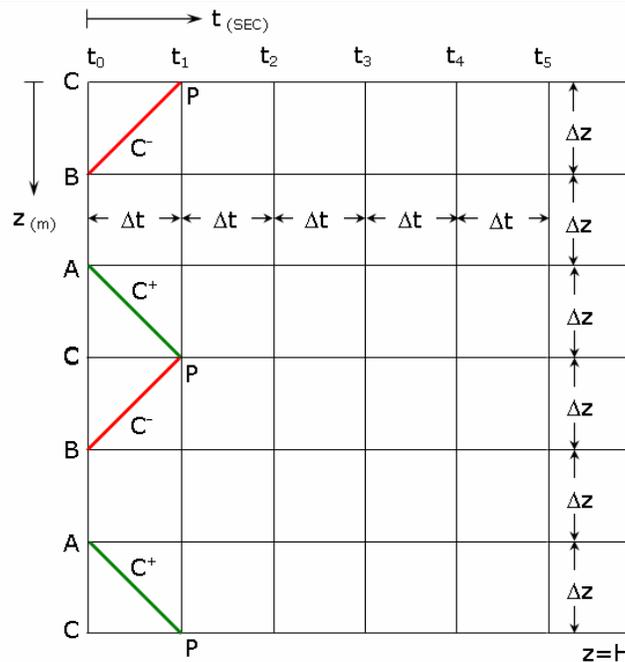


Figura 4.5 Líneas características en el plano z-t para seis divisiones de suelo

Si la ecuación 7 multiplicada por un valor desconocido θ es agregada a la ecuación 10, obteniendo la siguiente expresión:

$$\left[\frac{\partial \tau}{\partial t} + \theta \frac{\partial \tau}{\partial z} \right] - \rho \theta \left[\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho \theta} \left(G + \frac{\mu}{\Delta t} \right) \frac{\partial V}{\partial z} \right] + \frac{\mu}{\Delta t} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_C = 0 \quad (11)$$

Utilizando la definición de la derivada Euleriana, es aparente que los términos que se encuentran en paréntesis en la ecuación 11 se convierte en derivadas totales si:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \theta = \frac{1}{\rho \theta} \left(G + \frac{\mu}{\Delta t} \right) \quad (12)$$

Despejando se obtiene:

$$\theta = \pm \sqrt{\frac{G}{\rho} + \frac{\mu}{\rho \Delta t}} = \pm v_s \quad (13)$$

En donde:

- G : módulo de rigidez
- μ : viscosidad del suelo
- ρ : densidad del suelo
- t : tiempo
- v_s : velocidad de onda cortante aparente del suelo.

La velocidad aparente del suelo v_s es igual a la pendiente de las líneas características en el diagrama $z-t$ (Figura 4.5). Las ecuaciones 11 y 13 son nombradas como C^+ cuando θ es de signo positivo y como C^- cuando θ tiene signo negativo. Estas expresiones se presentan a continuación.

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tau}{\partial t} - \rho \cdot v_s \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\mu}{\Delta t} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_C = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial t} = v_s \end{array} \right. \quad (14)$$

$$(15)$$

$$C^- \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tau}{\partial t} + \rho \cdot v_s \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\mu}{\Delta t} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_C = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial t} = -v_s \end{array} \right. \quad (16)$$

$$(17)$$

La cantidad $(\partial V / \partial z)_C$ fue expresada en términos de una diferencia finita central para los puntos internos del diagrama $z-t$. Las fronteras fueron implementadas mediante un esquema de diferencias finitas hacia adelante o hacia atrás. Después de haber especificado un intervalo de tiempo conveniente, el cual deberá ser constante en todos los cálculos, las ecuaciones 14 y 16 se convierten en las siguientes expresiones:

$$C^+ = \tau_p - \tau_A + \rho \cdot v_s (V_p - V_A) + \frac{\mu}{2\Delta z} (V_p - V_A) = 0 \quad (18)$$

$$C^- = \tau_p - \tau_B - \rho \cdot v_s (V_p - V_B) + \frac{\mu}{2\Delta z} (V_p - V_A) = 0 \quad (19)$$

Resolviendo las ecuaciones 18 y 19 las cantidades desconocidas τ_p y V_p pueden ser halladas. La distancia del intervalo Δz en las ecuaciones 18 y 19 es igual a:

$$\Delta z = \Delta t \sqrt{\frac{G}{\rho} + \frac{\mu}{\rho \Delta t}} \quad (20)$$

En el caso más simple, Δz puede corresponder a un submúltiplo del espesor total del depósito. Para casos más complicados, como rigidez variando con la profundidad deben ser tratados mediante el uso de interpolaciones.

En la superficie del terreno la condición de borde es $\tau_p = 0$. Por lo tanto V_p puede ser hallado mediante el uso de la expresión C^- de la siguiente manera:

$$V_p = V_B + \tau_p - \frac{\tau_B}{\rho \cdot v_s} - \frac{\mu}{\Delta z} (V_C - V_B) \frac{1}{\rho \cdot v_s} \quad (21)$$

En la base la condición de borde consiste en la función de V_p conocida debida a la excitación sísmica bajo consideración. De acuerdo a lo anterior τ_p puede ser hallado mediante el uso de la expresión C^+ de la siguiente manera:

$$\tau_p = \tau_A + \rho \cdot v_s (V_p - V_A) - \frac{\mu}{\Delta z} (V_C - V_A) \quad (22)$$

El diagrama z-t (Figura 4.5) ayuda a entender la solución paso a paso. En un tiempo t_0 el esfuerzo de cortante τ y la velocidad de la partícula V se asumen como valores conocidos (condiciones iniciales). Si el terremoto se inicia en el tiempo t_0 y el deposito es horizontal, entonces τ y V serán cero en ese tiempo (condiciones estáticas). Estos valores permiten el cálculo de τ y V en los puntos P (un delta de tiempo después) utilizando las ecuaciones 18, 19, 21 y 22. El mismo procedimiento es utilizado en el paso siguiente.

Hasta este punto todos los métodos mencionados consideran que el suelo se comporta como un material viscoelástico, lo cual puede corresponder al caso de pequeñas deformaciones de cortante. Sin embargo la mayor parte de los suelos presentan un comportamiento altamente no lineal, Hardin y Drnevich en 1963 demostraron experimentalmente que este comportamiento puede ser aproximado a una hipérbola.

Parmelee y Seed y Idriss utilizaron una solución de masas concentradas para estimar la respuesta sísmica de un deposito estratificado aproximando el comportamiento no lineal del suelo mediante un modelo histerético bilineal. Las masas concentradas eran conectadas con un modelo de Voigt unido en serie con un amortiguador viscoso, para representar la característica de reptación (creep) del suelo. Las ecuaciones de movimiento fueron solucionadas utilizando una metodología paso a paso.

Constantopoulos modeló el suelo como una serie de masas concentradas, resortes y amortiguadores. Los resortes utilizados eran no lineales utilizando la relación de esfuerzo deformación descrita por la curva de Ramberg-Osgood. La solución fue encontrada mediante integración directa en el dominio del tiempo.

Streter, Wylie y Richart utilizaron la relación no lineal de esfuerzo deformación de Ramberg-Osgood en conjunto con las ecuaciones apropiadas de estado y movimiento. Estos investigadores utilizaron un modelo distribuido (es decir un modelo en el cual las propiedades varían con la profundidad pero se asumen constantes entre ciertas profundidades) y resolvieron el problema de propagación unidimensional de onda cortante mediante el empleo del método de las características con intervalos de tiempo e interpolaciones específicas. Este modelo es el utilizado en el programa CHARSOIL desarrollado por los mismos autores.

Gracias al aumento en la capacidad y en la velocidad de procesamiento de los computadores ha sido posible el desarrollo de metodologías más robustas para estimar los efectos de sitio. Estas metodologías incluyen complejos modelos inelásticos para representar el comportamiento del suelo y representaciones bidimensionales y tridimensionales de la realidad.

Dentro de los diferentes métodos de estimación de los efectos de sitio el que se utiliza con mayor frecuencia actualmente es el método lineal equivalente implementado en programas como: SHAKE91 (desarrollado en la Universidad de California en Berkeley por Seed, Idriss, Lysmer, Sun y Schnabel) y EERA (desarrollado en la Universidad de California del Sur por Bardet, Ichi y Lin) por su fácil manejo y la capacidad de obtener resultados rápidamente.

A continuación se describe en términos generales la metodología empleada en la presente investigación para estimar los efectos de sitio (Método Lineal Equivalente mediante el programa de cálculo SHAKE 91)

4.2.2 Programa de Análisis: SHAKE 91

El programa original (SHAKE) fue desarrollado a comienzos de la década de los 70 por Per B. Schnabel, John Lysmer y Harry B. Seed en la Universidad de California en Berkeley, el lenguaje utilizado en el programa original fue Fortran IV. Entre 1991 y 1992 Idriss y Sun implementaron una serie de cambios para generar una mayor flexibilidad en la entrada de datos y la posibilidad de correr en versión PC DOS, esta versión recibe el nombre de SHAKE91, este programa ha sido utilizado para un gran número de estudios que tratan el tema de propagación de onda y la estimación de la respuesta y las solicitaciones de un depósito de suelo ante una movimiento sísmico. A partir del código fuente de SHAKE91 se han desarrollado una serie de programas de computador con entrada y salida de datos gráfica, entre estos programas se encuentra el EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits) desarrollado por Bardet, Lin y Tobita en la Universidad de California del Sur.

El programa SHAKE 91 es el programa de computador más utilizado para resolver problemas de propagación de onda en depósitos unidimensionales de suelo. Este programa calcula la respuesta de un depósito de suelo conformado por estratos horizontales que se encuentran sobre sujetos a una transiente generada por la propagación vertical de ondas de corte. El método se basa en la solución propuesta por Kanai para la ecuación de onda y el algoritmo de transformada rápida de Fourier. El movimiento utilizado como base para el análisis puede ser aplicado en cualquiera de las capas o estratos que componen el depósito. Pueden ser analizados sistemas compuestos por estratos con propiedades básicas variables tales como rigidez, densidad, curvas de degradación y amortiguamiento. Se utiliza el modelo lineal equivalente mediante un procedimiento iterativo para obtener propiedades del suelo compatibles con las deformaciones que se presentan en cada una de las capas.

El modelo lineal equivalente consiste en una modificación del modelo de Kelvin-Voigt para tener en cuenta algunos tipos de no linealidades. La no linealidad y el comportamiento de esfuerzo deformación de los suelos es aproximado durante ciclos de carga como se muestra en la Figura 4.6. El módulo de corte equivalente, G , es tomado como el módulo secante G_s , que depende de la amplitud de deformación cortante γ . Como se muestra en la Figura 4.6, G_s para un ciclo histerético simétrico controlado por deformación es:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (23)$$

En donde τ_c y γ_c son el esfuerzo y la deformación cortante respectivamente. El amortiguamiento con respecto al crítico en el modelo lineal equivalente β , se calcula para obtener la misma pérdida de energía en un ciclo de carga a la que se presenta en un ciclo de histéresis del suelo.

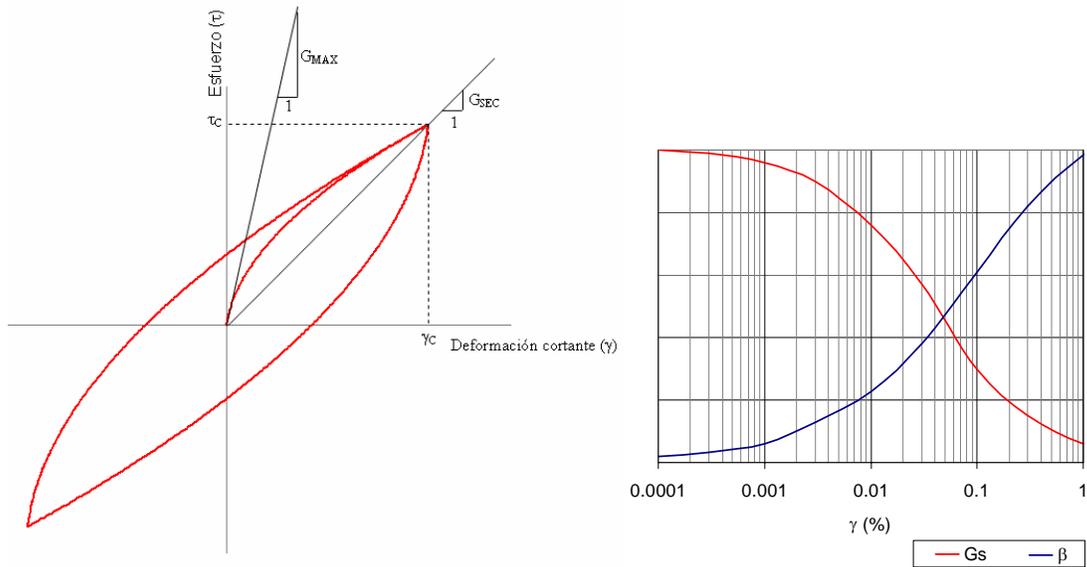


Figura 4.6 Curvas modelo lineal equivalente

Adicionalmente a la solución de la ecuación de onda el programa permite calcular espectros de respuesta, espectros de Fourier, funciones de transferencia, entre otras.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA MEDIANTE MODELOS UNIDIMENSIONALES

4.3.1 Introducción

Con el fin de desarrollar una metodología de análisis de la respuesta sísmica de depósitos de suelo basada en modelos teóricos del comportamiento del mismo, se hace necesario contar con una información básica confiable que permita realizar la calibración de los modelos. Lo ideal para lograr este objetivo sería un conjunto de registros de acelerogramas en diferentes sitios en los cuales debería conocerse en detalle las características geotécnicas básicas y las propiedades dinámicas de los suelos predominantes en el perfil. Se requerirían señales a nivel de la roca en profundidad al igual que las señales de respuesta en superficie. Estas señales en superficie deberían ser preferiblemente en campo libre para evitar la interacción con una estructura dada, la cual tiende a cambiar la forma general de la señal, tanto en amplitud como en duración y contenido frecuencial. Además deberían instalarse en sitios donde no se presenten efectos topográficos de consideración, a menos que unos instrumentos se dispongan especialmente para estudiar este tipo de fenómenos.

Una vez conformado el modelo del perfil estratigráfico en los diferentes sitios disponibles y habiendo asignado las propiedades estáticas y dinámicas a cada uno de los suelos característicos, puede obtenerse la función de transferencia correspondiente al modelo de análisis para diferentes niveles de aceleración, mediante la división del espectro de Fourier de la señal en superficie por el espectro de Fourier de entrada (registro en roca). En la Figura 4.7 se presenta un esquema del proceso utilizado para determinar la función de transferencia del depósito de suelo. El proceso de calibración consistiría en lograr reproducir los efectos de sitio observados en los registros de campo mediante el uso del modelo analítico.

Luego de calibrado, el modelo puede utilizarse para estimar la respuesta esperada ante otras excitaciones diferentes como es el caso de los sismos de diseño definidos. La metodología permitiría además establecer la respuesta en sitios diferentes a los puntos de calibración teniendo como información básica la estratigrafía y las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos dominantes.

Para el presente caso no se cuenta con información adecuada para realizar una calibración propiamente dicha. Lo anterior debido principalmente a la falta de registros a nivel de roca con los cuales se pueda calcular analíticamente la respuesta en superficie para entonces compararla con los registros a nivel de superficie. Por esta razón, los modelos unidimensionales de comportamiento dinámico no fueron calibrados con datos locales de la zona por no estar disponibles. A pesar de lo anterior debe indicarse que la metodología de respuesta dinámica ha sido calibrada en gran cantidad de situaciones no solo a nivel nacional sino a nivel mundial, demostrando la gran capacidad de estos modelos de representar la realidad siempre y cuando se alimenten con la información adecuada.

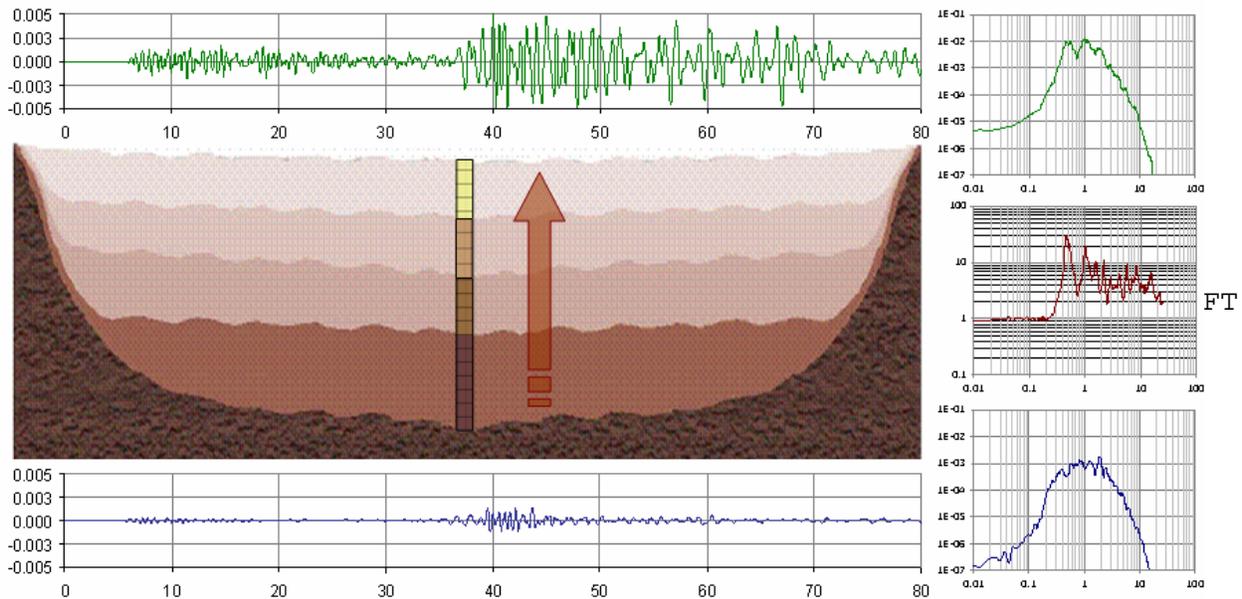


Figura 4.7 Esquema efectos de sitio y cálculo de funciones de transferencia

En este estudio se emplean modelos unidimensionales (tipo Shake) para representar el comportamiento del depósito de suelo, las principales razones para el uso de este tipo de modelos son:

- Este tipo de modelos han demostrado una gran capacidad para reproducir el comportamiento registrado en depósitos de suelos con características similares a las que se presentan en la ciudad de Bogotá.
- Estos modelos han sido utilizados a nivel mundial para estudios similares al presente.
- Para generar modelos bidimensionales o tridimensionales del depósito de suelo sería necesario una información con un mayor nivel de detalle que la recolectada en el presente estudio. Por lo cual, gran parte de las variables necesarias para desarrollar el modelo tienen que inferirse generando que los resultados de este tipo de modelos tengan asociados unos mayores niveles de incertidumbre.

Las hipótesis en las que se basan todos los modelos analíticos que se presentan en este Capítulo son las siguientes:

1. Los estratos de suelo se extienden uniformemente y hasta el infinito en dirección horizontal y la capa inferior es el semiespacio infinito.
2. La respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de ondas de cortante provenientes de la formación de roca subyacente.
3. Las propiedades no lineales del suelo se modelan a través de sistemas viscoelásticos lineales equivalentes. Cada estrato que se modela es homogéneo e isotrópico y se caracteriza por su densidad de masa, espesor, módulo de corte y factor de

amortiguamiento y por las características de degradación de estas últimas propiedades con la deformación por cortante.

Dadas las limitaciones de los modelos implementados en este estudio, para proyectos de construcción que se desarrollen en zonas cercanas a las zonas montañosas se requiere el desarrollo de estudios más detallados que permitan establecer la incidencia de los accidentes topográficos en la respuesta dinámica. A pesar de esto los modelos unidimensionales siguen dando una buena indicación del tipo de respuesta dinámica aunque se requiere evaluar la incidencia de los efectos locales en la amplitud y contenido frecuencial de las ondas.

En cada uno de los análisis realizados sobre modelos unidimensionales de propagación de onda es posible obtener curvas en función de la profundidad de degradación del módulo de cortante, amortiguamiento efectivo promedio de cada uno de los estratos, deformación unitaria promedio de la capa y curva de aceleración en función de la profundidad. En las Figuras 4.8 y 4.9 se presentan a manera ilustrativa los resultados obtenidos para el sondeo realizado en el Aeropuerto El Dorado (N51 - Zona 4 MZSB), con un espesor de depósito blando del orden de 450m. Se propagan dos registros sísmicos en el perfil, el primero corresponde al sismo de Chalfant Valley (Estados Unidos, 1986) con una aceleración máxima de 50 cm/s² (0.05 g), la segunda señal de análisis es un registro del sismo Irpinia (Italia, 1980), con una aceleración máxima de 200 cm/s² (0.20 g).

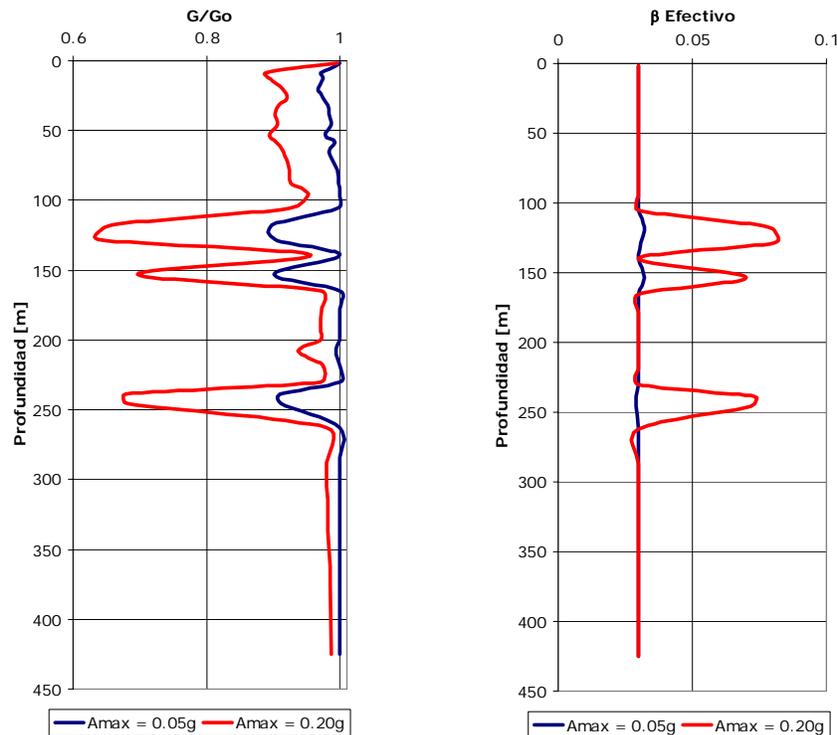


Figura 4.8 Degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento efectivo en función de la profundidad

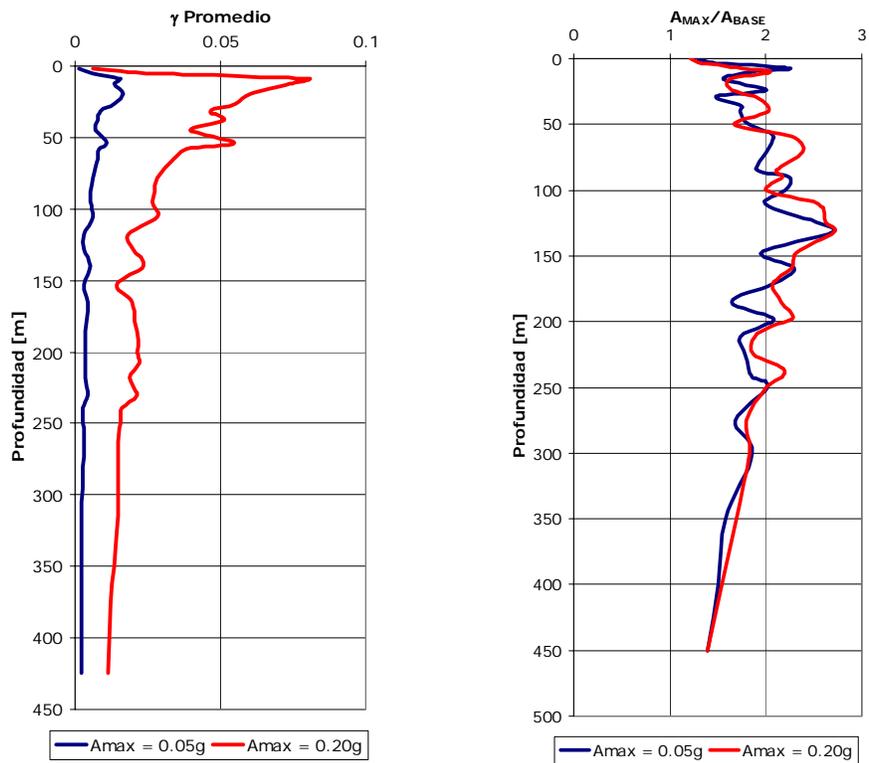


Figura 4.9 Deformación cortante promedio y aceleración máxima en función de la profundidad

4.4 RESPUESTA DINÁMICA UNIDIMENSIONAL

4.4.1 Perfiles de Análisis

La microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá se estudia desde el punto de vista de la respuesta unidimensional del depósito. La forma del perfil del basamento rocoso en la zona bajo estudio no se conoce en detalle. Sin embargo se encuentran en casi toda la ciudad depósitos lacustres pertenecientes a la formación Sabana, subyacidos por depósitos aluviales correspondientes a la formación Subachoque. Si se considera la dimensión aproximada de la zona central de la ciudad se concluye que el comportamiento de los depósitos puede considerarse prácticamente como unidimensional, es decir su comportamiento dinámico puede analizarse considerando una estratigrafía uniforme en toda la zona.

Para la evaluación de la respuesta dinámica se consideraron 102 puntos de análisis incluyendo sondeos realizados para el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, sondeos del proyecto Metro y estudios de respuesta local recientes realizados en la ciudad. En la Tabla 4.2 se presenta una lista con los puntos de estudio empleados y en la Figura 4.10 se presenta un mapa de localización de los mismos. Los perfiles estratigráficos de los sitios estudiados se encuentran como parte del Capítulo 3 en el Anexo 3.2.

A partir de cada perfil estratigráfico disponible se construyen entonces modelos unidimensionales compuestos por varias capas de suelo y un semiespacio infinito en la parte inferior representando el basamento de contraste o la roca base.

Tabla 4.2 Identificación puntos de estudio

Identificación Sondeo	Localización	Fuente de Información	Zona MZSB
N01	Cll. 170 Cra. 9	Estudio MZSB	2
N02	Autonorte Cll. 200	Estudio MZSB	3
N04	Cll. 138 Club SubOficiales	Estudio MZSB	3
N05	Cll. 100 Autonorte	Estudio MZSB	4
N9A	Cll. 127 Autonorte	Estudio MZSB	3
N09	Cll. 127 Autonorte	Estudio MZSB	3
N13	Clínica Corpas	Estudio MZSB	4
N14	Av Cundinamarca Cll. 139	Estudio MZSB	4
N17	Barrio Bochica Norte Av. Cundinamarca	Estudio MZSB	4
N19	Barrio El Luján Av. Boyacá	Estudio MZSB	4
N20	Cll. 68 Cra. 82	Estudio MZSB	4
N21	Terminal de Transportes	Estudio MZSB	3
N22	Cll. 13 Av. Boyacá	Estudio MZSB	3
N23	Av. 68 Av. Americas	Estudio MZSB	3
N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	Estudio MZSB	5
N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	Estudio MZSB	5
N26	Barrio Patio Bonito BOSA	Estudio MZSB	5
N27	Parque Timiza	Estudio MZSB	5
N28	Autopista Sur Av. 68	Estudio MZSB	5
N29	Autopista Sur SOACHA	Estudio MZSB	1
N30	Autopista Sur SOACHA	Estudio MZSB	1
N31	Barrio Bosa Holanda	Estudio MZSB	5
N33	Monumento Los Heroes	Estudio MZSB	3
N34	Escuela Militar Cll. 80	Estudio MZSB	3
N36	Cll. 63 Cra. 30	Estudio MZSB	3
N37	Cll. 26 Cra. 50	Estudio MZSB	3
N38	Cra. 53 Cll. 13	Estudio MZSB	3
N39	CAD Av. Americas Cra. 30	Estudio MZSB	3
N42	Cra. 30 Cll. 6	Estudio MZSB	5
N43	Av. 1ero de Mayo Cra. 30	Estudio MZSB	5
N44	Cra. 47 Cll. 44 Sur	Estudio MZSB	5
N45	Barrio el Tunal	Estudio MZSB	5
N48	Uniagraria Cll. 170 Autonorte	Estudio MZSB	3
N49	Ingeominas Cll. 53 Cra. 30	Estudio MZSB	3
N50	Cll. 80 Av. Boyacá	Estudio MZSB	4
N51	Aeropuerto El Dorado	Estudio MZSB	4

Continuación Tabla 4.2 Identificación puntos de estudio

Identificación Sondeo	Localización	Fuente de Información	Zona MZSB
PA1	Av. Cll. 68 Cra. 110	Metro Realizado	4
PA5	Av. Cll. 68 Cra. 92	Metro Realizado	4
PA7	Av. Cll. 68 Cra. 83	Metro Realizado	4
PA9	Av. Cll. 68 Cra. 74 A	Metro Realizado	4
PA10	Av. Cll. 68 Av. Boyacá	Metro Realizado	5
PA11	Av. Cll. 68 Cra. 66	Metro Realizado	3
PA13	Av. Cll. 68 Av. Cra. 68	Metro Realizado	4
PA14	Av. Cll. 72 Cra. 50	Metro Realizado	3
PA15	Av. Cll. 72 Cra. 45 A	Metro Realizado	3
PA16	Av. Cll. 72 Av. Quito	Metro Realizado	3
PA17	Av. Cll. 72 Cra. 30	Metro Realizado	3
PA19	Av. Cll. 72 Cra. 24	Metro Realizado	3
PA25	Cra. 7 Cll. 65	Metro Realizado	2
PA26	Cra. 7 Cll. 61	Metro Realizado	2
PA37	Cra. 10 Cll. 19	Metro Realizado	2
PA43	Cll. 13 Cra. 19	Metro Realizado	2
PA46	Cll. 13 Av. Ciudad de Quito	Metro Realizado	2
PA49	Av. Ferrocarril Cll. 9	Metro Realizado	3
PA52	Av. Ferrocarril Cll 2	Metro Realizado	5
PA55	Av. Ferrocarril Av. 1ro. Mayo	Metro Realizado	5
PA58	Av. 1ro. Mayo Cra. 65	Metro Realizado	5
PA61	Av. 1ro. Mayo Cra. 74	Metro Realizado	5
PA64	Av. 1ro. Mayo Cll 42 S	Metro Realizado	5
PA67	Diag. 43 S Cra. 86	Metro Realizado	5
O01	Calle 95 con Carrera 59	DPAE - Estudios Locales	4
O02	Carrera 1 este N° 13-51	DPAE - Estudios Locales	2
O03	Cra 46A N° 135-95	DPAE - Estudios Locales	3
O04	Cra 48F N° 95-80	DPAE - Estudios Locales	4
O05	Carrera 46 con calle 140A	DPAE - Estudios Locales	3
O09	Calle 170 N° 31-20	DPAE - Estudios Locales	3
O10	Calle 134 con Cra 46A	DPAE - Estudios Locales	3
O11	Carrera 9 N° 151-52	DPAE - Estudios Locales	2
O15	Carrera 68B N° 43B-20	DPAE - Estudios Locales	3
O17	Carrera 30 - calle 45	DPAE - Estudios Locales	2
O20	Carrera 52 con calle 147	DPAE - Estudios Locales	3
O22	Transversal 5A Calle 127	DPAE - Estudios Locales	2
O23	Cra 7 Calle 38	DPAE - Estudios Locales	1
O27	Avenida 9 Calle 154	DPAE - Estudios Locales	2
O28	Calle 152 Carrera 28	DPAE - Estudios Locales	3
O32	Avenida Suba Diagonal 117A	DPAE - Estudios Locales	4
O33	Transversal 21 Calle 98	DPAE - Estudios Locales	4
O34	Calle 22 C Carrera 41	DPAE - Estudios Locales	5
O37	Transversal 32 Calle 131	DPAE - Estudios Locales	3
O38	Carrera 9 Calle 125	DPAE - Estudios Locales	2
O39	Carrera 47 Calle 129	DPAE - Estudios Locales	3
O40	Diagonal 152 Transversal 43	DPAE - Estudios Locales	3
O41	Calle 136 Carrera 13	DPAE - Estudios Locales	2
O43	Carrera 27 Calle 163 A	DPAE - Estudios Locales	3
O44	Calle 26 A con Carrera 13	DPAE - Estudios Locales	2
O46	Diagonal 165 A N° 28	DPAE - Estudios Locales	3

Continuación Tabla 4.2 Identificación puntos de estudio

Nombre Sondeo	Identificación Sondeo	Localización	Fuente de Información	Zona MZSB
Puente Autop Sur con Avenida Boyaca	AutoSurB	Autosur Av Boyaca	Estudios Adicionales	5
Edificio Bel Air	BelAir	Cil. 88 Cra. 7	Estudios Adicionales	2
Centro Administrativo Distrital	CAD	Cra. 30 Av. Americas	Estudios Adicionales	2
Estadio Nemesio Camacho "El Campin"	CAMPIN	Cil. 57 Cra. 30	Estudios Adicionales	3
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico	CITEC	Cra 65 B Cil. 17A	Estudios Adicionales	3
Torres Unidas	Cil114Cr7	Calle 114 con Carrera 7	Estudios Adicionales	2
Abadía del Bosque	Cil134Cr9	Av. 9 Cil. 134	Estudios Adicionales	2
Edificio COLGAS	COLGAS	Cil. 37 Cra. 8	Estudios Adicionales	2
Edificio ESSO	ESSO	Cil. 39 Cra. 7	Estudios Adicionales	2
Puente vehicular Matatigres	Matatigres	NQS Autosur	Estudios Adicionales	5
Torre Megabanco	Megabanco	Cil. 100 Cra. 13	Estudios Adicionales	3
Múdela del Río	Mudela		Estudios Adicionales	3
Plaza de Toros "La Santamaria"	PlazaToros	Cra. 6 Cil. 26	Estudios Adicionales	2
Puente Calle 170 Autonorte	PteCil170	Cil. 170 Autonorte	Estudios Adicionales	3
Salud Total	SaludTotal	Cil 100 con Autonorte	Estudios Adicionales	4
Terreno Firme Sur	SurDuro		Estudios Adicionales	1

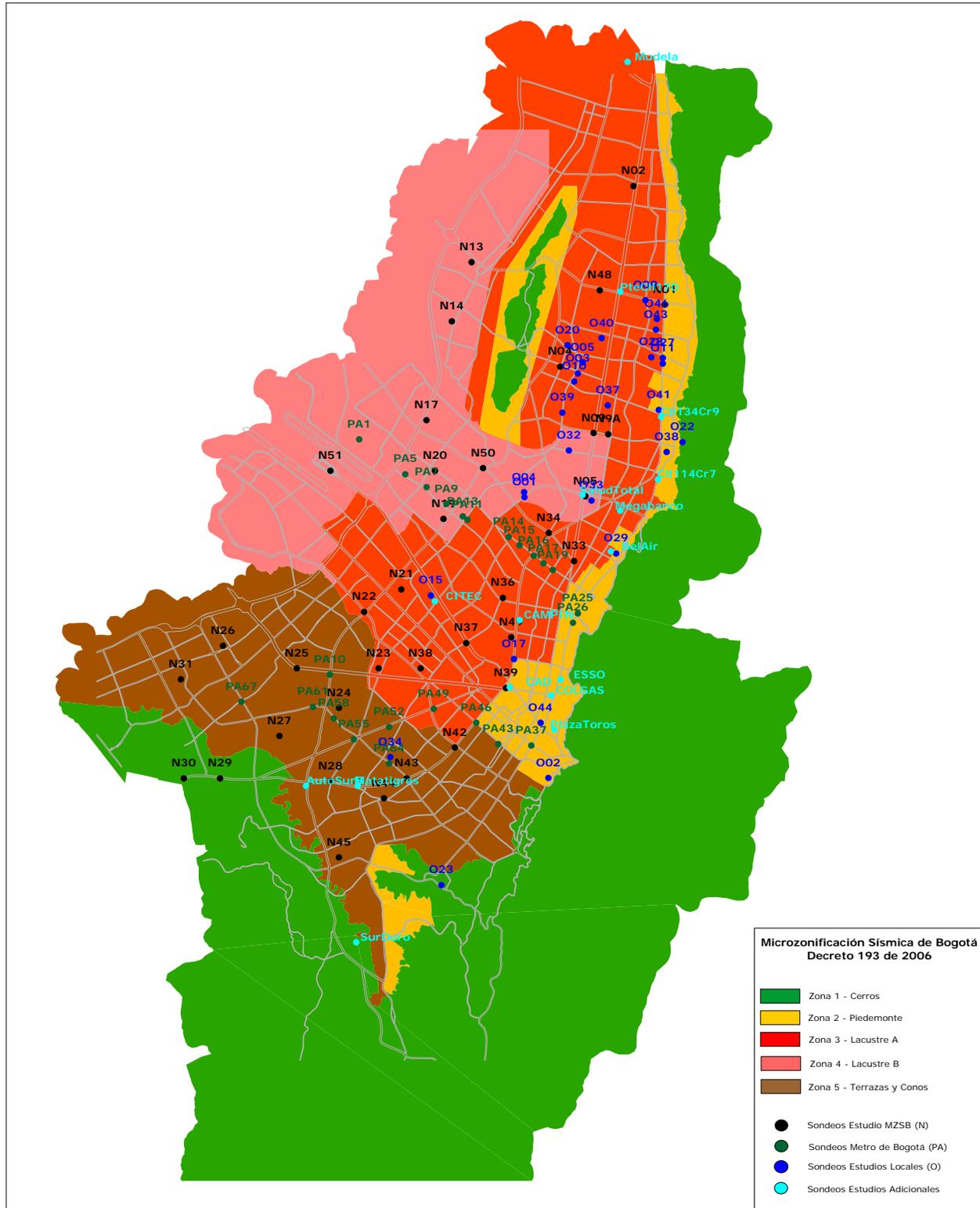


Figura 4.10 Localización de puntos de estudio por zonas sísmicas

4.4.2 Caracterización Geotécnica y Propiedades Dinámicas

Los parámetros básicos que utiliza el modelo de computador SHAKE91 (Idriss et al, 1991) son los siguientes:

4.4.2.1 Estratigrafía

Se define principalmente por zonas de igual clasificación unificada de suelos mediante las propiedades índices. Cada estrato se caracteriza por su densidad húmeda y por sus propiedades índices, definiendo de esta manera su espesor y el tipo de comportamiento que lo caracteriza, bien sea el comportamiento característico de las arcillas, limos o materiales granulares.

4.4.2.2 Densidad

La densidad se estima a partir de valores medios de acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio. Se trabaja con la densidad húmeda (γ_{humeda}). Los valores medios que resultan varían en un rango entre 1.5 a 2.0 Ton/m³.

4.4.2.3 Perfil de velocidad de onda de corte

El perfil de velocidad de onda de corte, se puede establecer a partir de los valores de módulo de rigidez cortante máximo para cada material, a través de la siguiente relación:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}} \quad (24)$$

donde:

- V_s = Velocidad de onda de corte medida en el sitio para bajas deformaciones
- ρ = Densidad de masa del estrato
- G_o = Módulo de cortante máximo (valor inicial para el análisis)

En caso de estar disponible el perfil de velocidad de onda de cortante, simplemente se verifica su compatibilidad con el modelo propuesto.

4.4.2.4 Módulo de Corte Máximo

De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto por la Sociedad Colombiana de Geotecnia, el Módulo de Cortante Máximo de los depósitos arcillosos de la ciudad puede determinarse con la siguiente relación:

$$G_o = \frac{K}{F(e)} \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma_{ref}} \right)^m RSC^k \quad (25)$$

donde:

- K = Constante que depende del tipo de material
 σ'_c = Esfuerzo de confinamiento efectivo
 σ_{ref} = Esfuerzo de referencia (usualmente 100 KPa)
 m = Exponente de la relación de esfuerzos
 RSC = Relación de sobreconsolidación
 k = Exponente de la relación de sobreconsolidación
 $F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$ (Hardin 1978)
 e = Relación de vacíos

Para el caso de depósitos de arenas y suelos granulares, se emplea la relación propuesta por Seed et al 1970:

$$G_o = 1000 \cdot K_{2,max} \cdot (\sigma'_c)^{0.5} \quad (26)$$

donde:

- $K_{2,max}$ = Constante que depende de la relación de vacíos
 σ'_c = Esfuerzo de confinamiento efectivo

4.4.2.5 Curva de degradación de la rigidez y de capacidad de amortiguamiento

Las curvas de degradación del módulo dinámico de cortante y de capacidad de amortiguamiento con la deformación cortante se definen de acuerdo con los resultados del modelo geotécnico de la ciudad elaborado por la Sociedad Colombiana de Geotécnica. En dicho estudio se plantean las siguientes relaciones (Ishibashi et al 1993):

$$\frac{G}{G_o} = K(\gamma, IP)(\sigma'_c)^{m(\gamma, IP) - m_o} \quad (27)$$

$$\beta = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_o} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_o} \right) + 1 \right] \quad (28)$$

donde:

$$K(\gamma, IP) = 0.5 \left[1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(IP)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right]$$

$$m(\gamma, IP) - m_o = 0.272 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right] \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3})$$

$$n(IP) = \begin{cases} 0.0 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \cdot IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} \cdot IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} \cdot IP^{1.115} & \text{para } IP > 70 \end{cases}$$

IP = Índice de plasticidad

Las curvas fueron sometidas a una corrección propuesta por la Sociedad Colombiana de Geotecnia para acomodar los modelos al comportamiento dinámico típico de los suelos de Bogotá.

La Figura 4.11 presenta de manera gráfica algunas las anteriores ecuaciones, para diferentes valores de IP y un esfuerzo efectivo de confinamiento de 100 KPa.

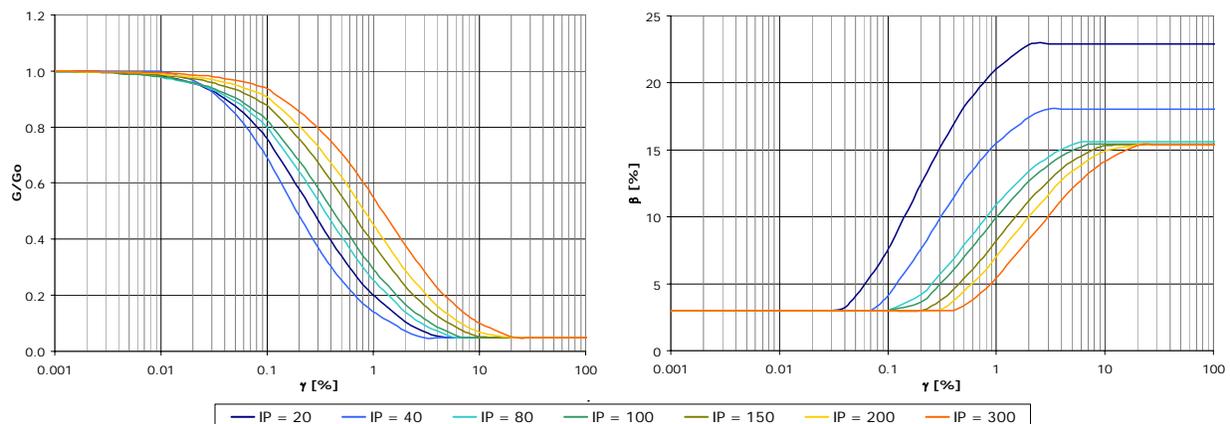


Figura 4.11 Modelos de comportamiento dinámico de suelos blandos

Para el caso de depósitos de arenas y suelos granulares, se emplea el valor promedio de la relación propuesta por Seed et al 1970, presentada en la Figura 4.12

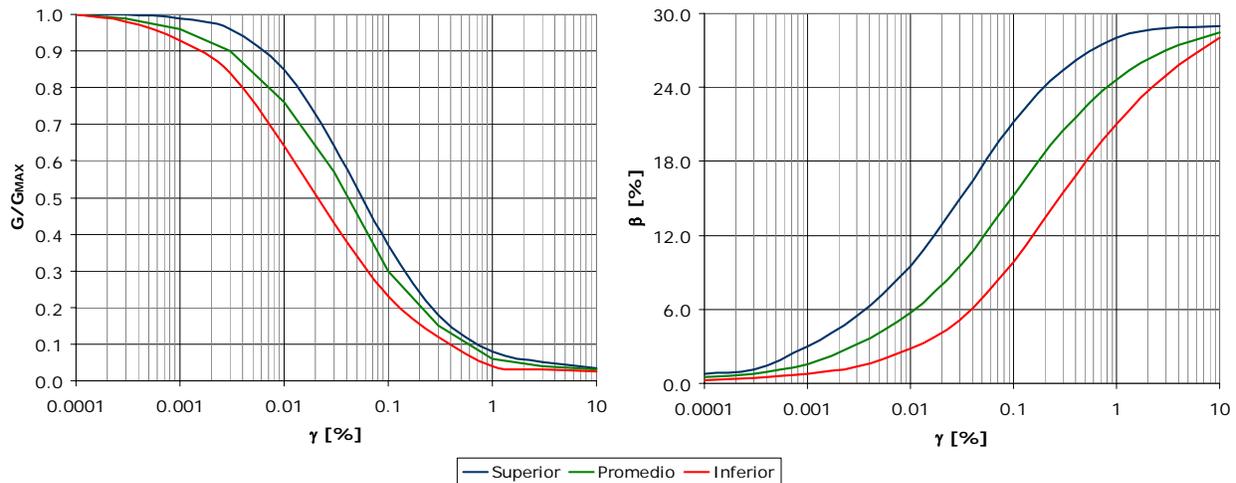


Figura 4.12 Modelos de comportamiento dinámico de suelos granulares

4.4.2.6 Valores iniciales de módulos de rigidez y amortiguamiento

Los valores iniciales para los módulos de rigidez se establecen igual a los módulos G_0 y los valores iniciales de coeficientes de amortiguamiento se estiman de manera uniforme para todos los depósitos en el 5%. El programa de computador se encarga de degradar los módulos y de llevar los coeficientes de amortiguamientos hasta los valores donde se hagan compatibles con las deformaciones alcanzadas de acuerdo con la señal de entrada utilizada en el análisis.

De acuerdo con lo anterior se preparan los datos básicos de cada uno de los sondeos disponibles para ser analizados con el modelo de computador SHAKE91 (Idriss et al, 1991).

4.4.3 Señales de análisis para determinar las funciones de transferencia

Para adelantar los análisis de propagación de onda en los diferentes puntos de control (columnas estratigráficas) que se tienen en la ciudad de Bogotá, es necesario seleccionar señales sísmicas registradas en roca preferiblemente o en suelo duro.

Para poder determinar los espectros de Amenaza uniforme (espectro de respuesta con probabilidad de excedencia constante) se deben calcular funciones de transferencia para diferentes niveles de intensidad para que los espectros resultantes tengan en cuenta el comportamiento histerético de los suelos que componen la columna estratigráfica. Para la presente investigación se seleccionaron los siguientes niveles de intensidad sísmica: 0.05 g, 0.10 g, 0.20 g, 0.40 g.

Dentro de la presente investigación se intentó no escalar la amplitud de las señales con el fin de conservar las características frecuenciales y de duración de la fase intensa que tiene un registro sísmico en función de su magnitud, distancia y nivel de intensidad. Dado que en el país no se dispone de registros sísmicos confiables a nivel de estratos firmes con aceleración máxima superior a los 50 gales (0.05 g) fue necesario el uso de las bases de datos de movimientos sísmicos fuertes (strong motion database) que se encuentran en internet. Los registros fueron

obtenidos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (provenientes de la Red de Acelerógrafos de Guerrero) y de la base de datos del Centro de Estudios de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) adscrito a la Universidad de Berkeley.

En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan las principales características de las señales sísmicas utilizadas, tales como: identificación (nombre), fecha del evento, magnitud sísmica del evento, distancia epicentral, duración del registro, aceleración máxima de la señal, intervalo de muestreo, aceleración máxima utilizada en el análisis y el factor de diezmado utilizado para disminuir el número de datos del registro y el tiempo de procesamiento del archivo (si el factor de diezmado es N, entonces se leerá sólo una de cada N muestras).

En las Figuras 4.13 y 4.14 se presentan las señales seleccionadas para el análisis para fuentes activas y de subducción. Las Figuras 4.15 y 4.16 presentan los espectros de respuesta de aceleración de los 12 registros provenientes de fallas activas y los 10 espectros de las señales de fuentes de subducción utilizados en los análisis. Los espectros han sido normalizados por la aceleración máxima del terreno con el fin de observar las diferencias entre las formas de los espectros de respuesta.

Con base en los análisis se determinan las funciones de transferencia no lineales en cada uno de los sitios de estudio para diferentes niveles de intensidad sísmica (para el presente análisis aceleración máxima en roca).

Tabla 4.3 Características registros sismos fuente activa

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
A01	Chalfant Valley	U.S.A	21/07/86	6.2	50	39.81	0.051	0.0050	0.05	4
A02	Georgia	U.S.S.R	15/06/91	6.2	52	38.17	0.046	0.0050	0.05	4
A03	Palm Springs	U.S.A	08/07/86	6.0	63	24.00	0.053	0.0050	0.05	4
A04	Anza	U.S.A	08/07/86	6.0	26	24.00	0.113	0.0050	0.10	4
A05	Armenia - Bocatoma	Colombia	19/01/99	6.2	42	31.92	0.084	0.0100	0.10	2
A06	Imperial Valley	U.S.A.	15/10/79	6.5	36	28.28	0.109	0.0050	0.10	4
A07	Irpinia	Italia	23/11/80	6.5	33	36.34	0.199	0.0029	0.20	4
A08	Whittier Narrows	U.S.A	10/01/87	6.0	10	29.96	0.199	0.0200	0.20	1
A09	San Fernando	U.S.A	09/02/71	6.6	27	29.66	0.212	0.0100	0.20	2
A10	Coalinga	U.S.A.	22/07/83	5.7	12	21.30	0.375	0.0050	0.40	4
A11	Northridge	U.S.A.	17/01/94	6.7	35	30.33	0.493	0.0100	0.40	2
A12	Park Field	U.S.A.	28/06/66	6.1	10	30.33	0.356	0.0100	0.40	2

Tabla 4.4 Características registros sismos fuente subducción

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
S01	Nuxco	México	15/07/96	6.5		83.00	0.049	0.0050	0.05	4
S02	Ocotito	México	14/09/95	7.2		61.00	0.059	0.0010	0.05	2
S03	Zihuatejo	México	10/12/94	6.6		34.05	0.053	0.0100	0.05	2
S04	Paraíso	México	25/09/84	6.5		36.67	0.102	0.0050	0.10	4
S05	Red Smart	Taiwán	12/06/85	6.5	45	27.15	0.142	0.0100	0.10	2
S06	La Unión	México	10/12/94	6.6		54.98	0.092	0.0050	0.10	4
S07	Caleta	México	09/08/00	6.7		42.21	0.194	0.0050	0.20	4
S08	Ocotito	México	25/04/89	6.5		53.16	0.195	0.0100	0.20	2
S09	Copala	México	24/10/93	6.2		58.94	0.292	0.0100	0.40	2
S10	Las Vigas	Mexico	25/04/89	6.5		34.43	0.345	0.0050	0.40	4

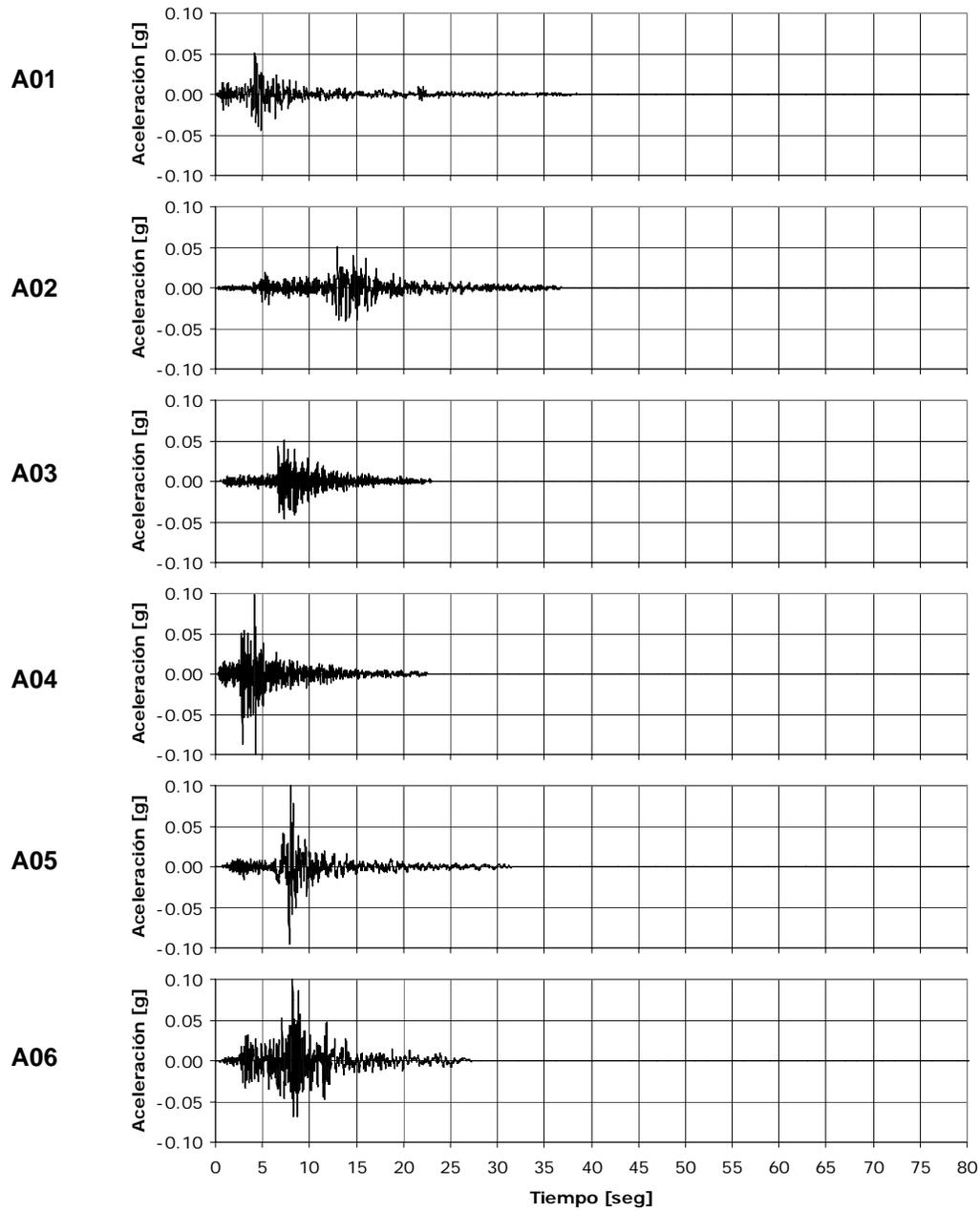
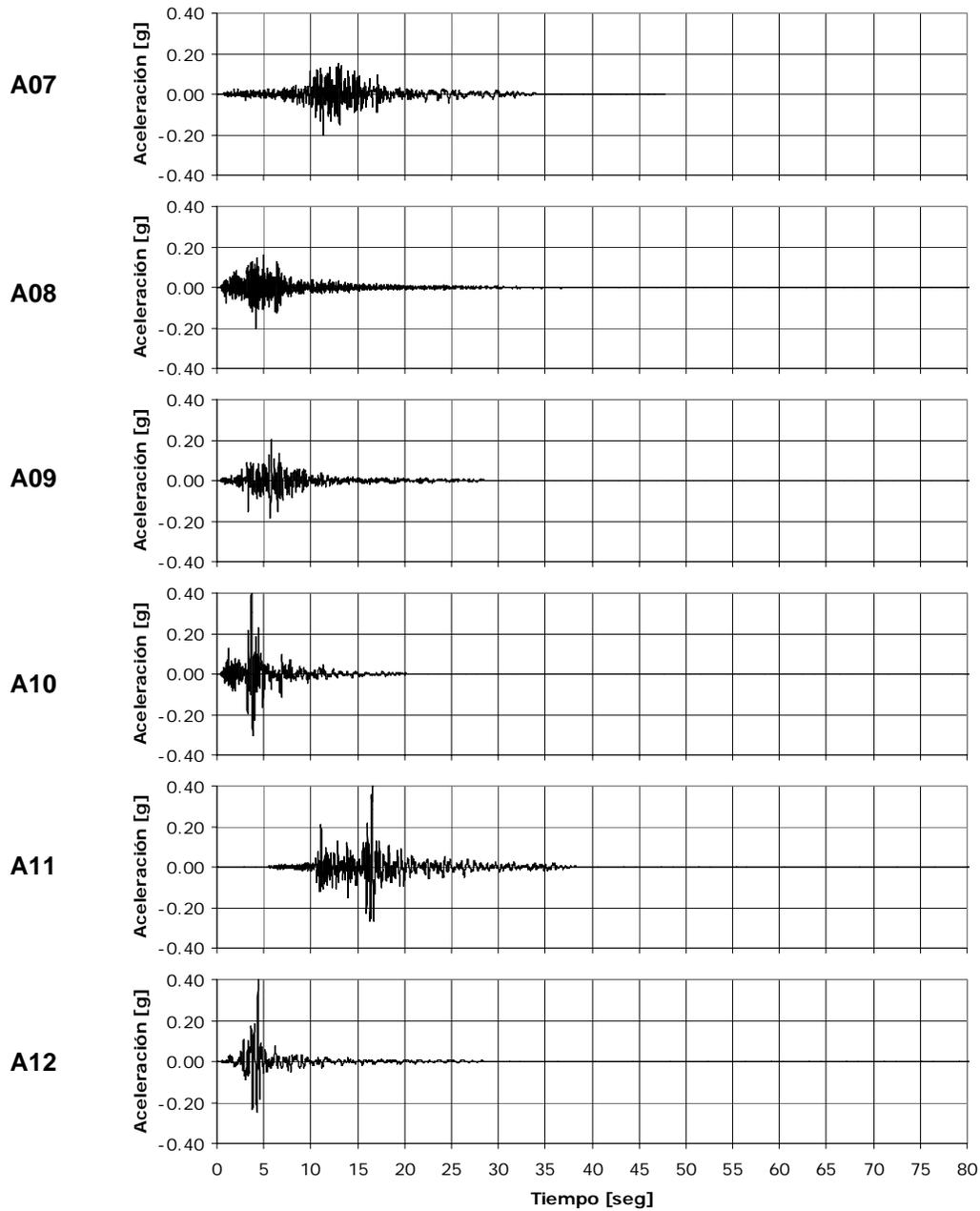


Figura 4.13 Señales de Fuente Activa



Continuación Figura 4.13 Señales de Fuente Activa

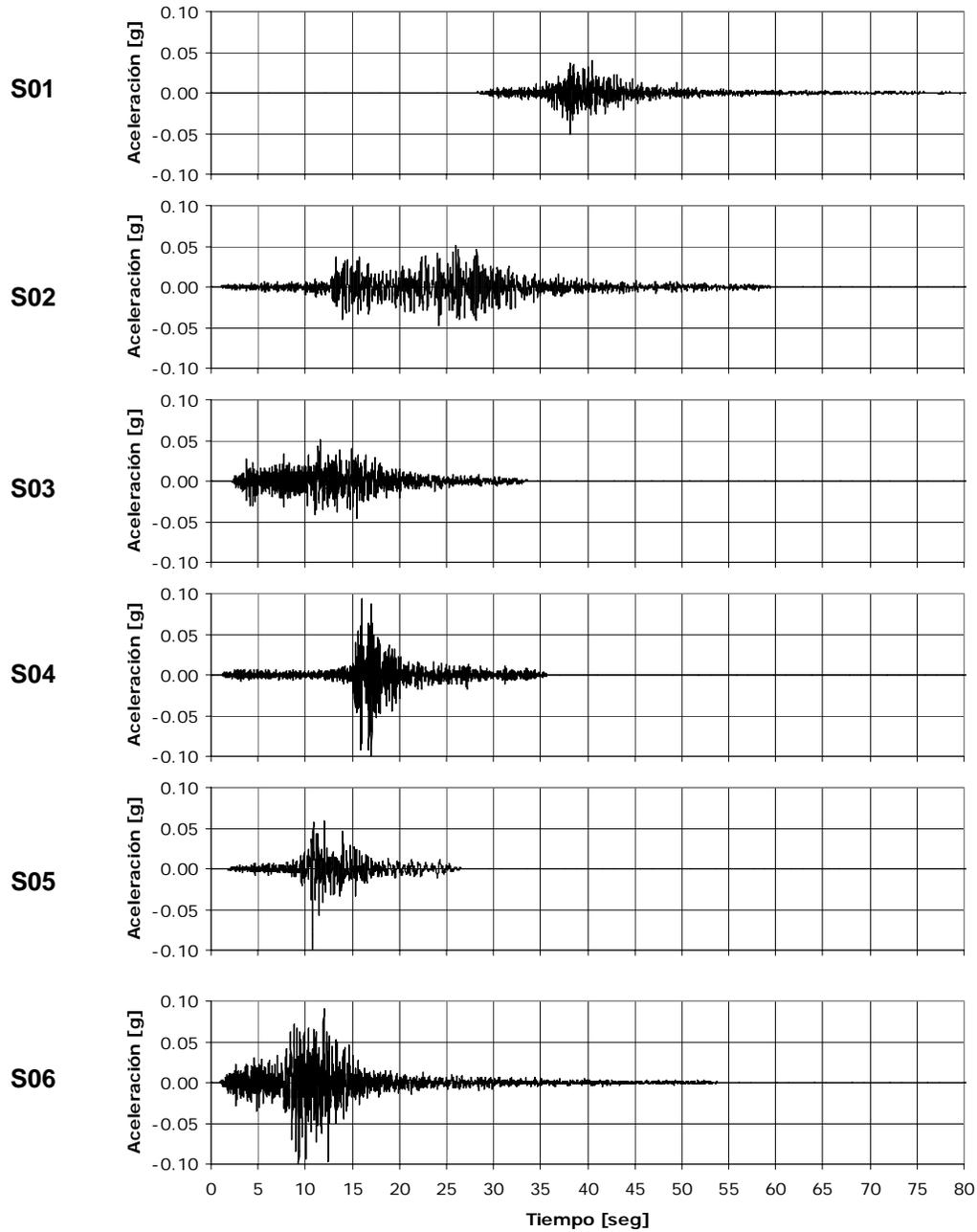
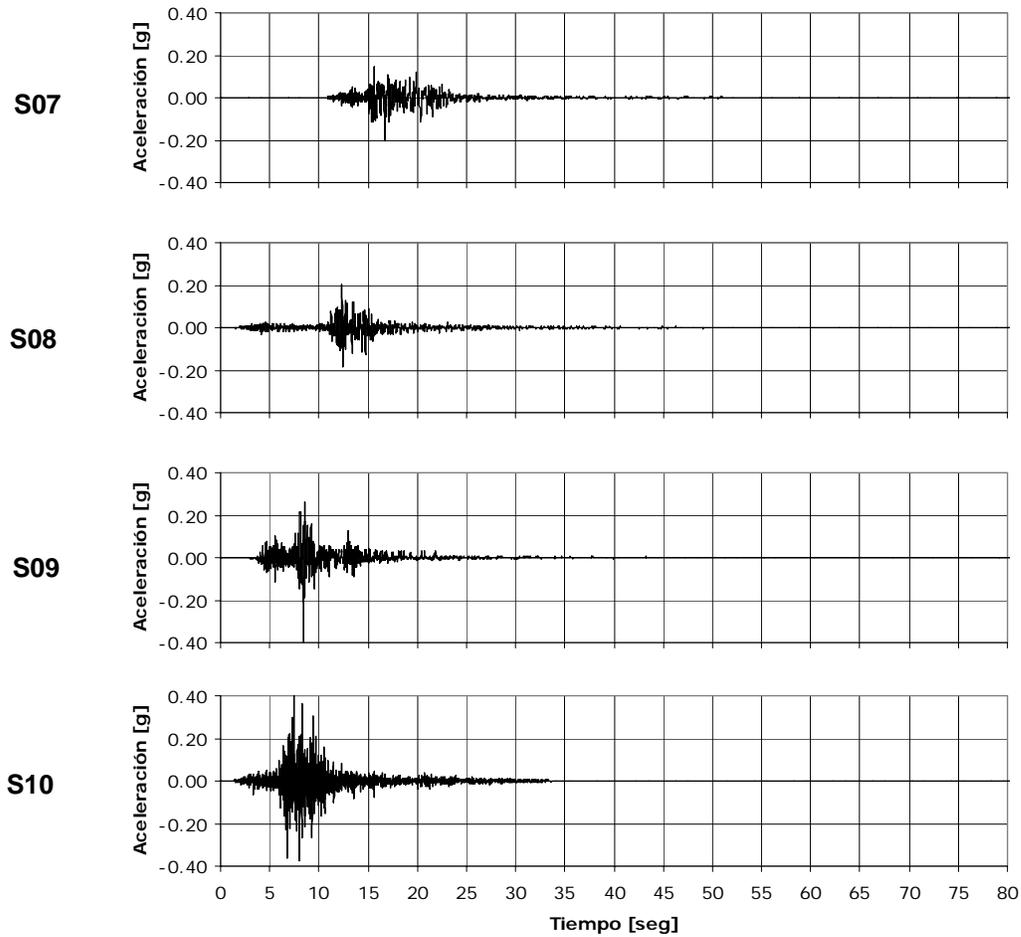


Figura 4.14 Señales de Fuente Subducción



Continuación Figura 4.14 Señales de Fuente Subducción

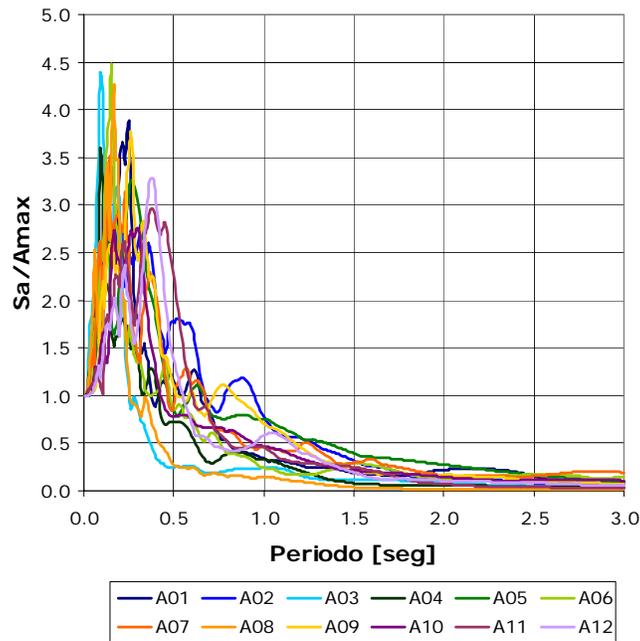


Figura 4.15 Espectros normalizados señales fuentes activas

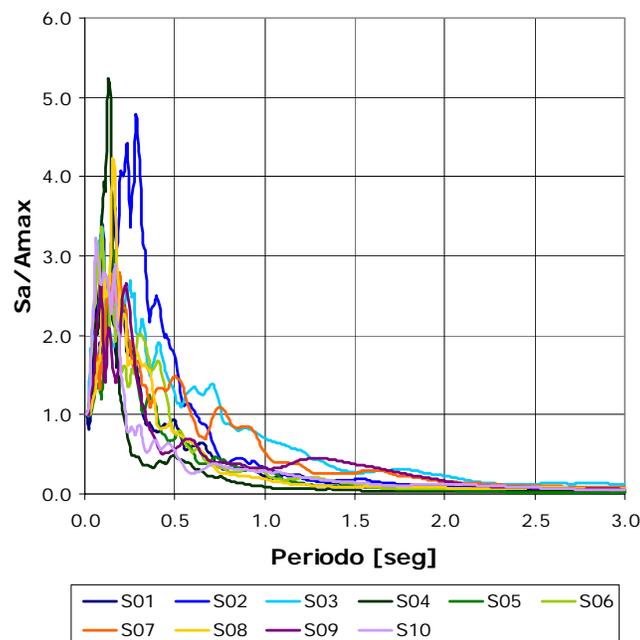


Figura 4.16 Espectros normalizados señales fuentes subducción

4.4.4 Señales Características

En estudios anteriores la estimación de los efectos de sitio se realizaba mediante la propagación de señales características a través de los estratos de suelo blando. Para establecer una comparación entre el método de espectros de amenaza uniforme y los resultados de los análisis mediante señales características, se emplearon las señales establecidas en el Decreto 193 de 2006 como señales de análisis para los estudios de respuesta local en la ciudad. La selección de estas señales fue llevada a cabo empleando la metodología establecida por el INGEOMINAS para la selección de señales de diseño consistentes con la amenaza regional (Martínez, Alvarado, Rubiano 2002). Las Tablas 5, 6 y 7 presentan las propiedades básicas de las señales para fuente cercana, regional y lejana respectivamente, consistentes con la amenaza de la ciudad para un periodo de retorno de 475 años.

Tabla 4.5 Características registros sismos fuente cercana

FECHA	HORA	NOMBRE SISMO	Ms	Mw	MI	Mb	ESTACIÓN	PGA [g]
1975/08/01	20:20:13	OROVILLE	5.6	6	5.7	5.7	OROV. SS	0.0998
1980/0526	18:57:56	MAMMOTH LAKES AS			5.7	4.9	LONG VAL.U	0.1009
1983/07/22	2:39:54	COALINGA AS	5.8	4.4	6	6	SULPHUR.BH	0.1257
1984/04/29	5:02:59	UMBRIA	5.4	5.7	5.4	5.1	PIETRALUNG	0.1958
1995/19/01		LA URIBE					SANTA	0.0935

Tabla 4.6 Características registros sismos fuente regional

FECHA	HORA	NOMBRE SISMO	Ms	Mw	MI	Mb	ESTACIÓN	PGA [g]
1989/10/18	0:04:02	LOMA PRIETA	7.1	6.9	7.1	6.2	YERBABUENA	0.0651
1994/01/17	12:30:55	NORTHRIDGE	6.8	6.7	6.6		MT.BALDY	0.0737
							DEER CANYON	0.069
							NEWPORT	0.1053
1995/01/16	20:46:52	KOBE	6.8	6.9	6.9	6	OKAYAMA	0.077

Tabla 4.7 Características registros sismos fuente lejana

FECHA	HORA	NOMBRE SISMO	Ms	Mw	MI	Mb	ESTACIÓN	PGA [g]
1985/09/19	13:17:43	MEXICO	8.1	6.7		6.4	CERRO DEPI	0.0253
							CU01	0.0319
							CUIP	0.0319
							CUMV	0.0328
							XALTINGUIS	0.0309

Las Figuras 17, 18 y 19 presentan las señales con su correspondiente espectro de respuesta en terreno firme, para los diferentes tipos de fuente. La Figura 20 presenta un resumen de todos los espectros de respuesta en roca de las señales de diseño comparativamente con el espectro de amenaza uniforme para un periodo de retorno de 475 años.

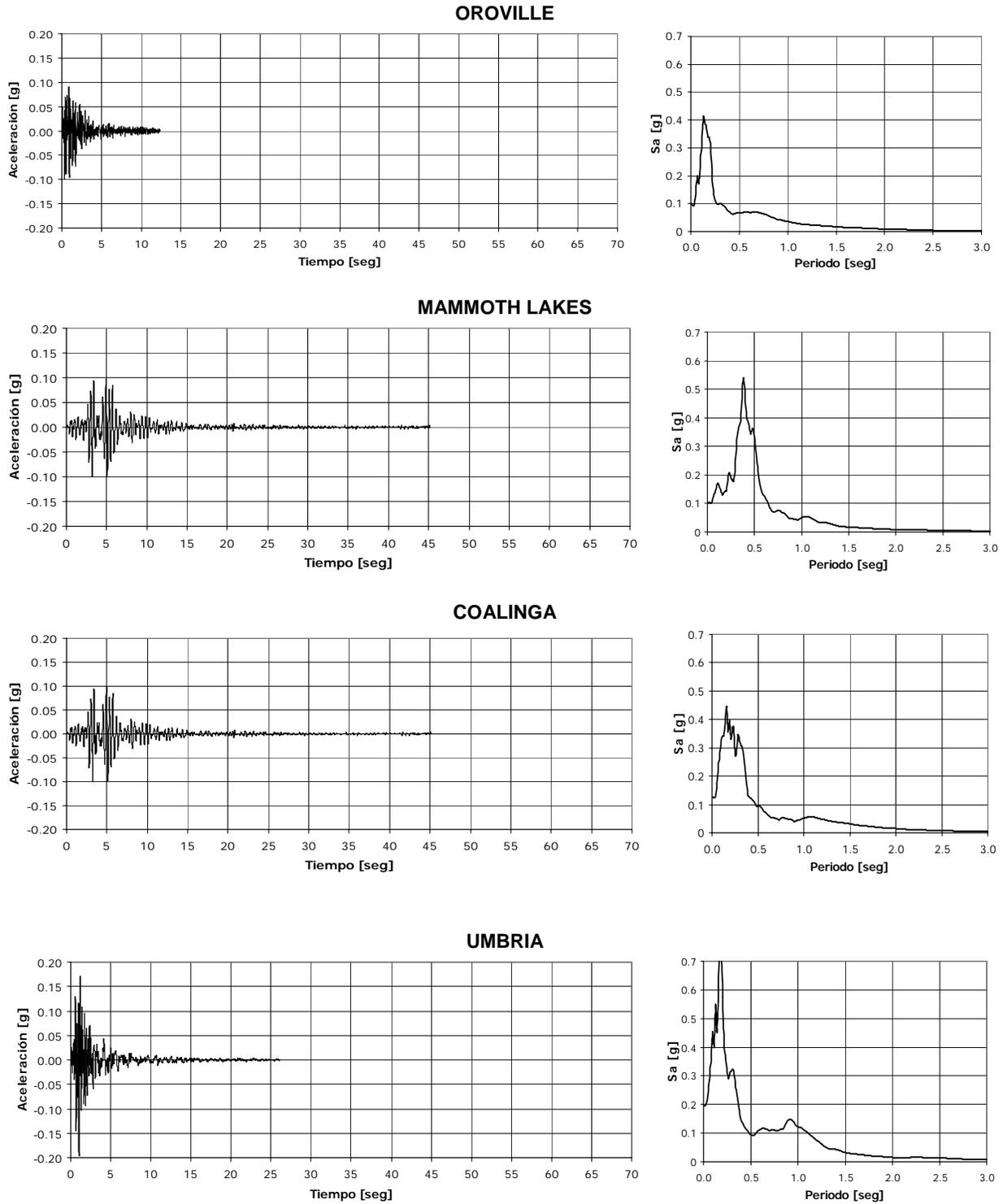
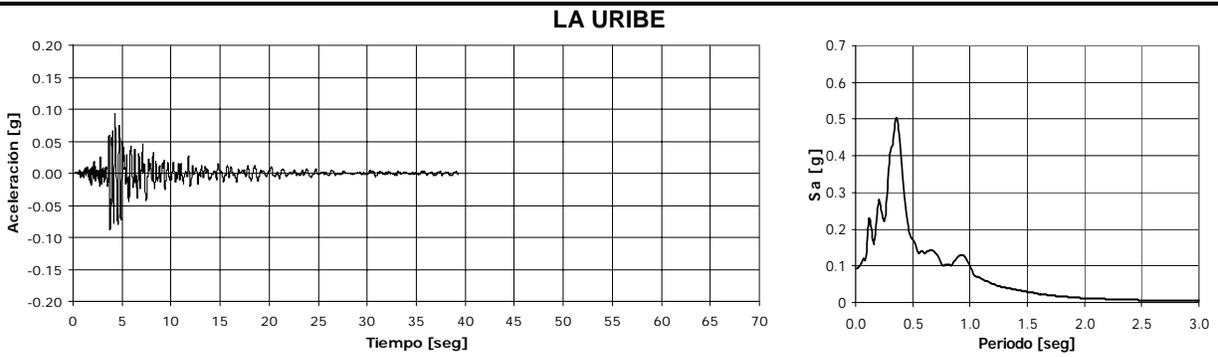


Figura 4.17 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente cercana



Continuación Figura 4.17 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente cercana

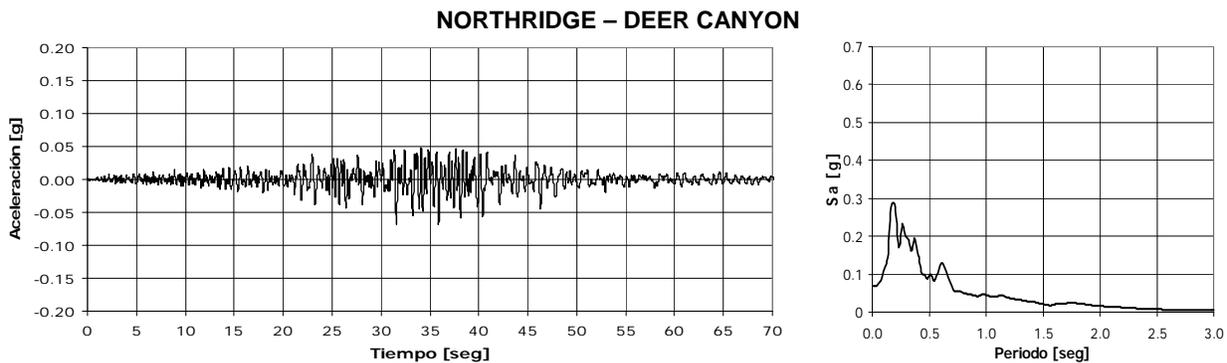
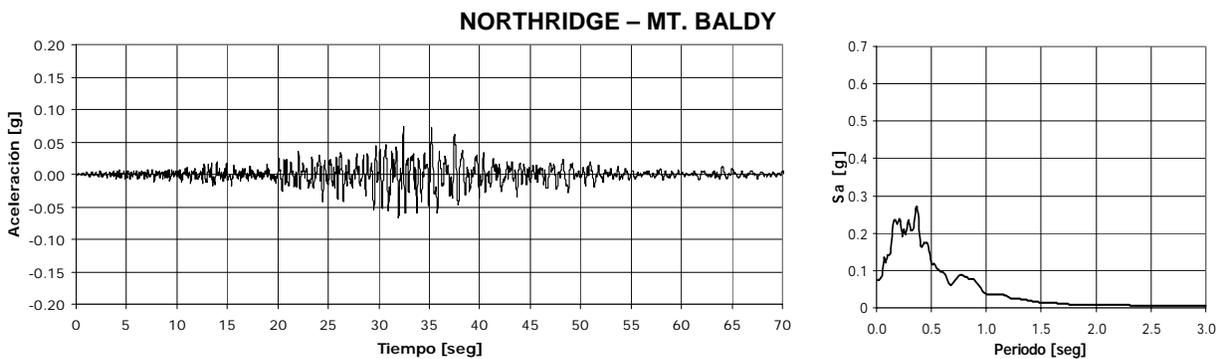
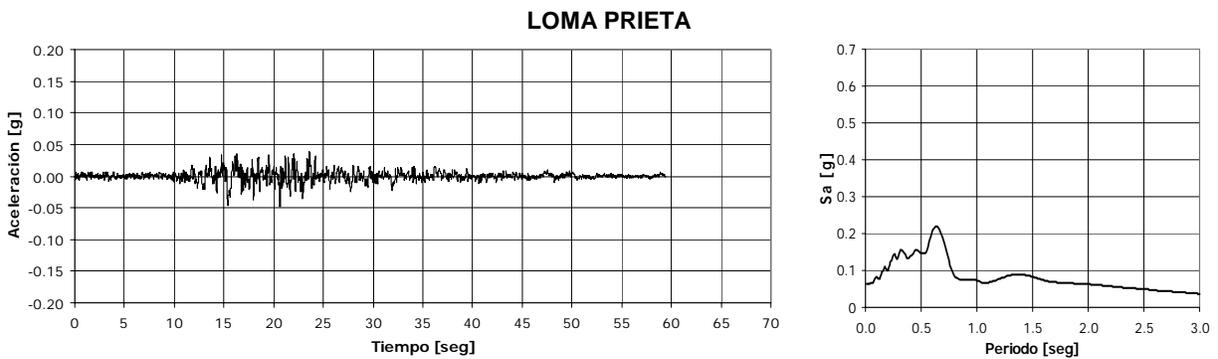
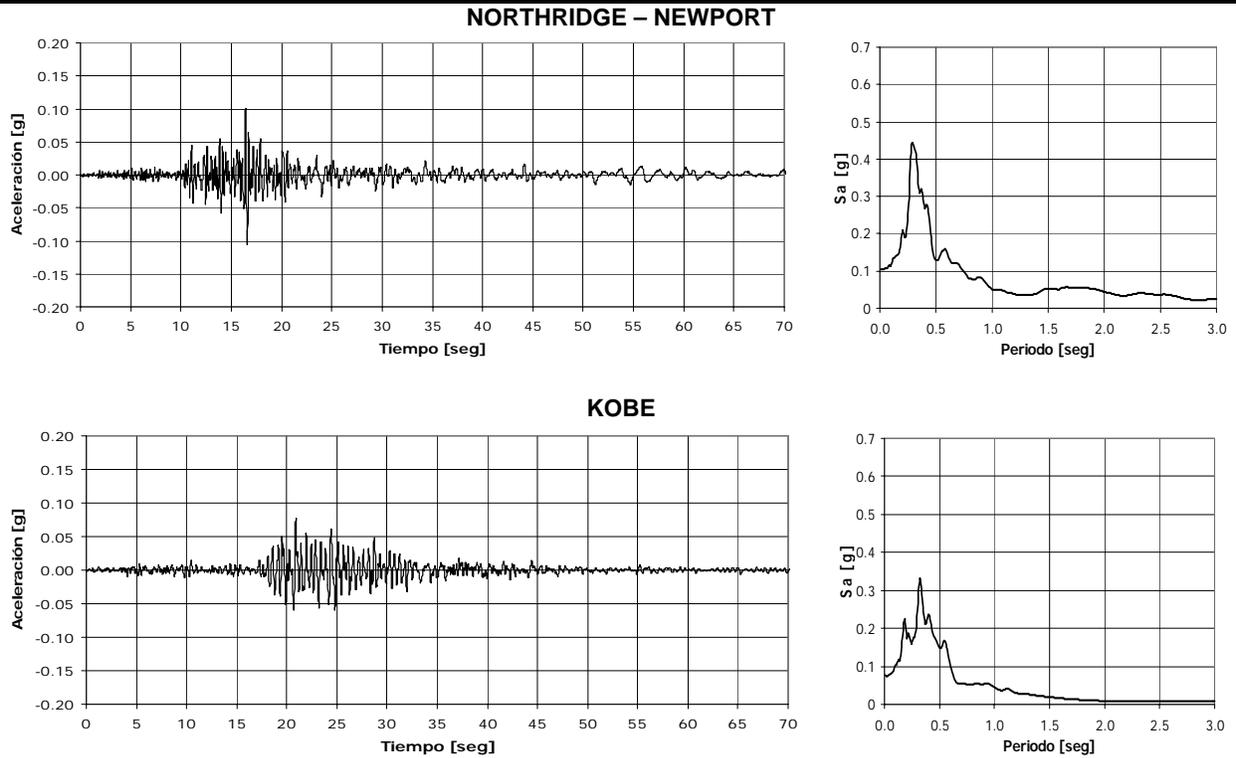


Figura 4.18 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente intermedia



Continuación Figura 4.18 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente intermedia

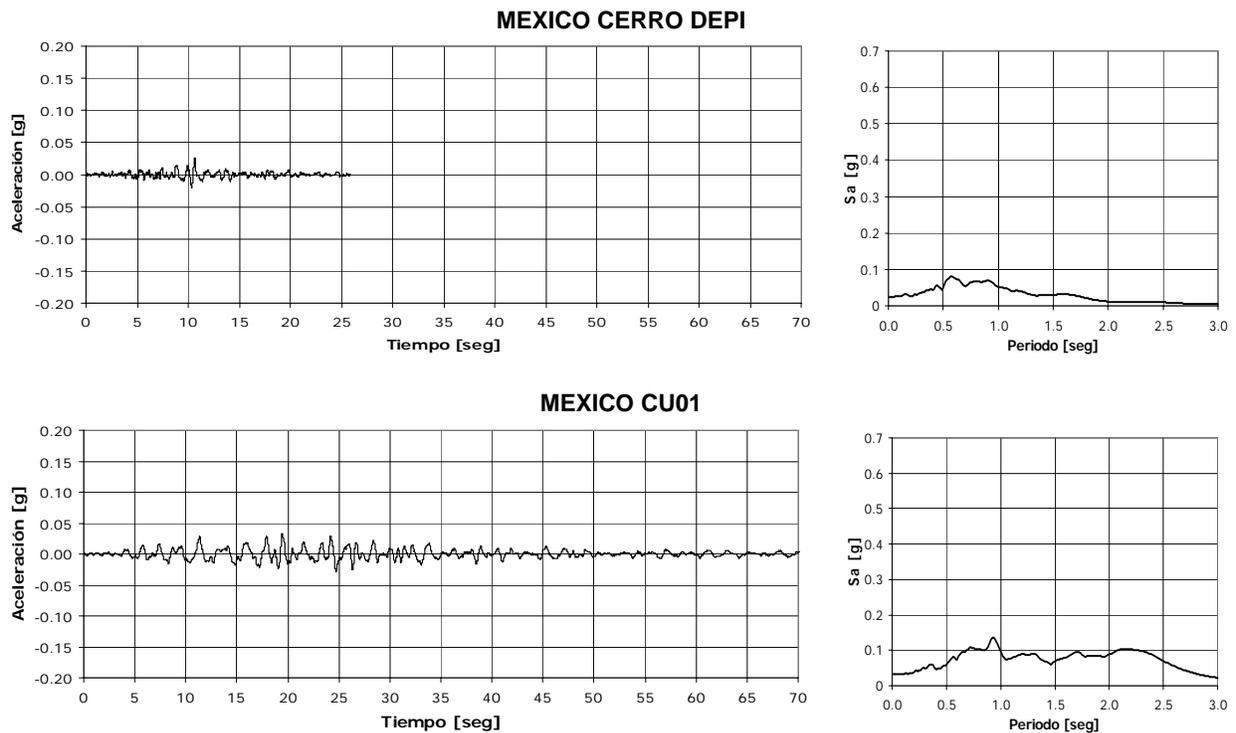
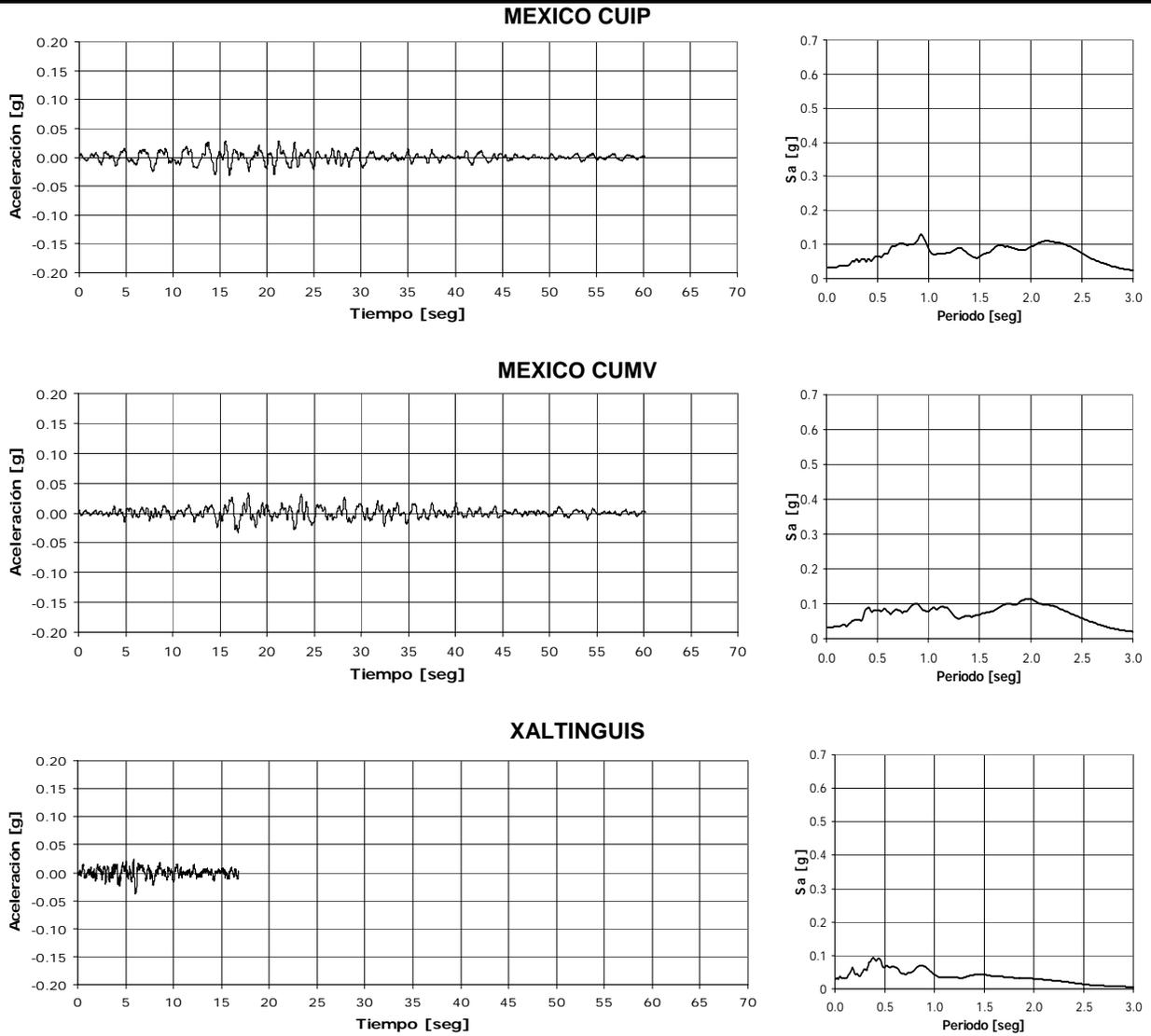


Figura 4.19 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente lejana



Continuación Figura 4.19 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente lejana

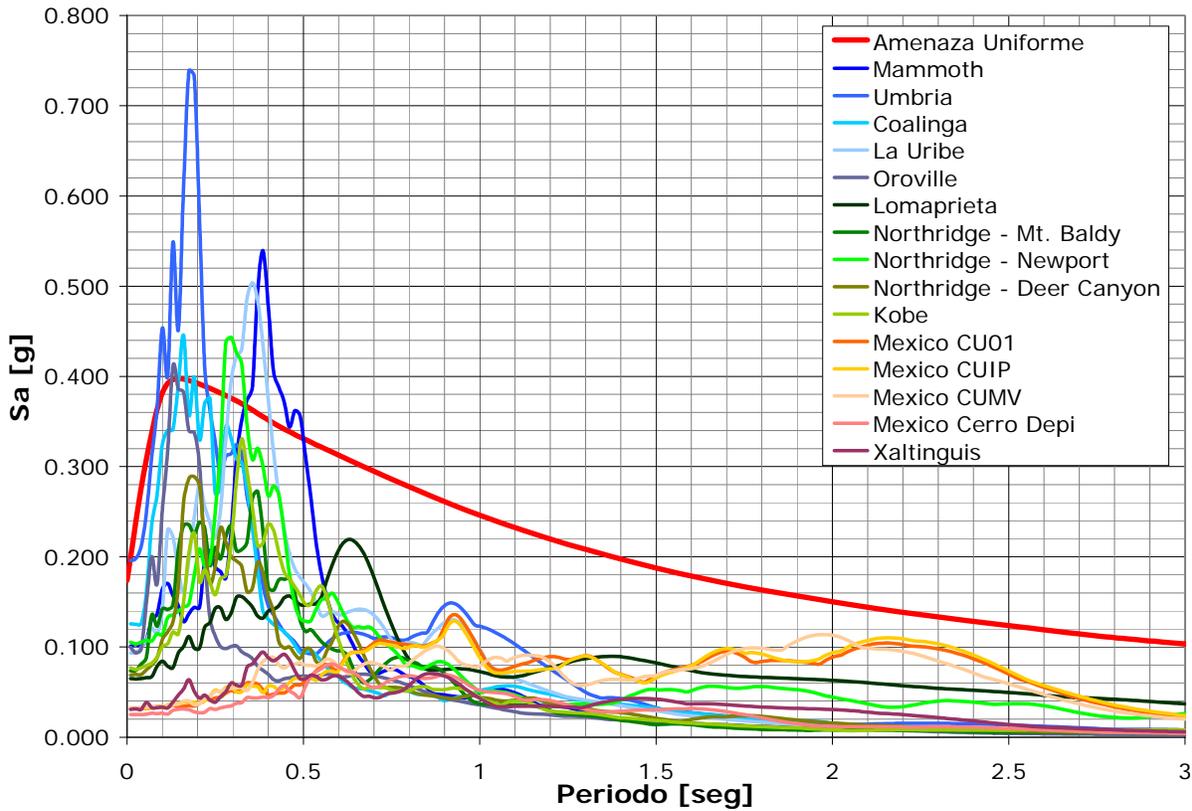


Figura 4.20 Comparación entre espectros de respuesta de señales de diseño y espectro de amenaza uniforme en terreno firme

4.4.5 Análisis de sensibilidad

Como paso inicial en el análisis de la respuesta dinámica de los suelos, se realizó un análisis de sensibilidad de la respuesta a la extrapolación estratigráfica y de propiedades geotécnicas, necesaria en la gran mayoría de sondeos analizados, para complementar la información básica mencionada en el numeral 4.4.3.

Se evaluó el efecto de la extrapolación estratigráfica de los sondeos para alcanzar el basamento rocoso, y las propiedades geotécnicas y tipo de materiales incluidos en dicha extrapolación, en la respuesta dinámica del depósito. La Tabla 4.8 presenta las características generales de los sondeos analizados.

Tabla 4.8 Características generales de sondeos incluidos en el análisis de sensibilidad

Identificación Sondeo	Profundidad de Exploración [m]	Profundidad Roca [m]	Zona MZSB
N23	50	175	3
N50	50	238	4
O03	51	188	3

4.4.5.1 Metodología

Se completaron los sondeos presentados en la Tabla 4.8 hasta alcanzar la profundidad de roca, con propiedades geotécnicas supuestas o provenientes de sondeos cercanos, y se realizó un análisis de respuesta dinámica empleando las señales sísmicas establecidas en el Decreto 193 de 2006 como señales de análisis para los estudios de respuesta local en la ciudad.

La asignación de propiedades por profundidad se hizo como se indica en la Tabla 4.9. La descripción de asignación en cada caso incluye los sondeos con los cuales se completó la estratigrafía, o el tipo de material en caso de ser supuesta, con las respectivas profundidades.

Tabla 4.9 Descripción de la asignación de propiedades para cada sondeo

Sondeo	No Análisis	Descripción
N23	N23_A	Sondeo completado con N21 desde 50m hasta 100m, y con N51 hasta 175m
	N23_B	Sondeo completado con N27 hasta 130m, y estratos de arenas hasta 175m
	N23_C	Sondeo completado con estratos de arenas hasta 175m
	N23_D	Sondeo completado con estratos de arcillas hasta 175m
N50	N50_A	Sondeo completado con N51 de 50m a 240m
	N50_B	Sondeo completado con N14 de 50m a 240m
	N50_C	Sondeo completado con capas de arcilla hasta 240m
O03	O03_A	Sondeo completado con N9A desde 50m hasta 190m
	O03_B	Sondeo completado con capas de arcilla hasta 190m

Las Figuras 4.21 a 4.23 muestran los espectros de respuesta en superficie para cada uno de los sondeos analizados. Se puede apreciar que la respuesta no difiere significativamente en función del tipo de materiales involucrados en la extrapolación estratigráfica, mientras se mantenga la profundidad, junto con una rigidez promedio aproximadamente constante en todo el perfil.

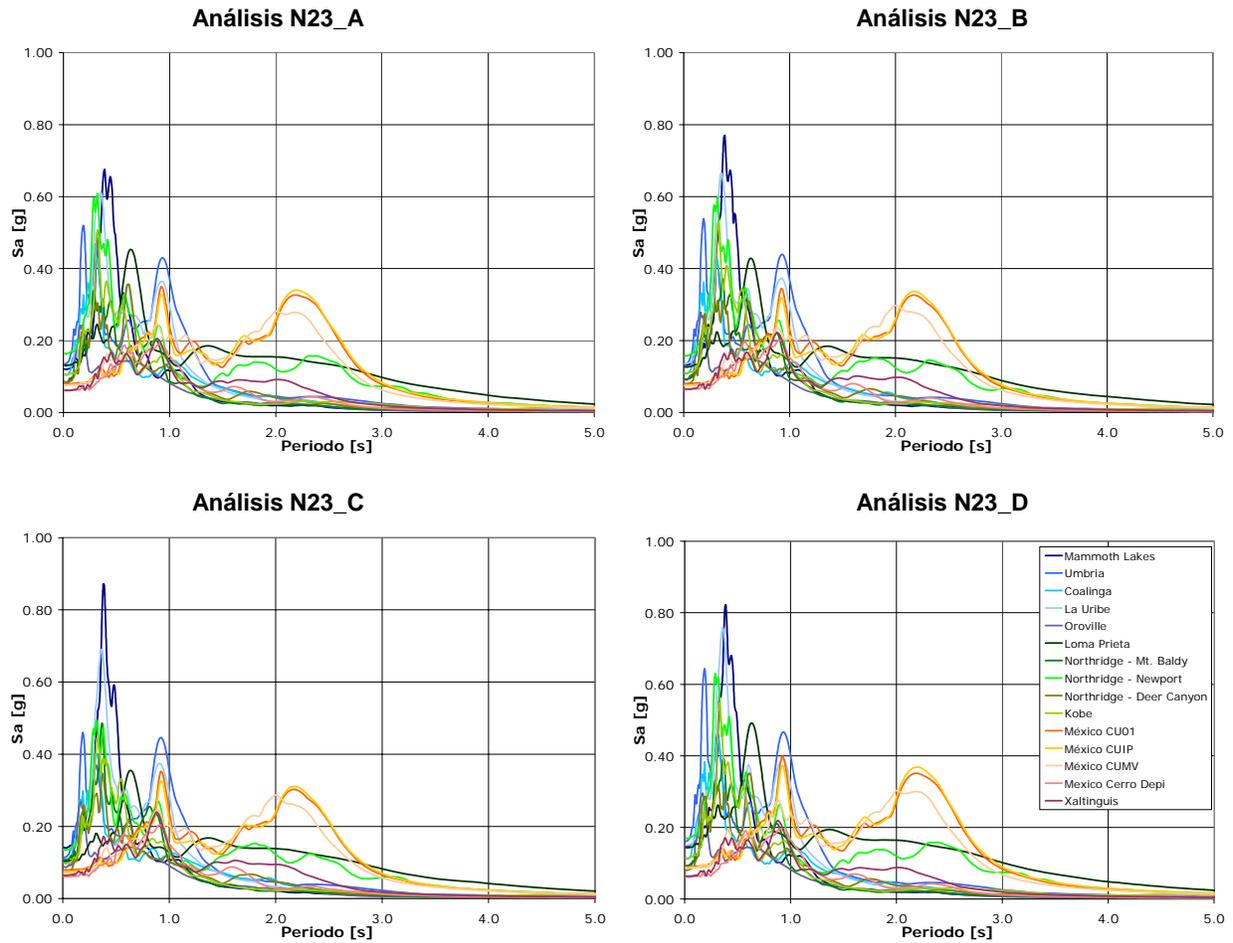


Figura 4.21 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo N23

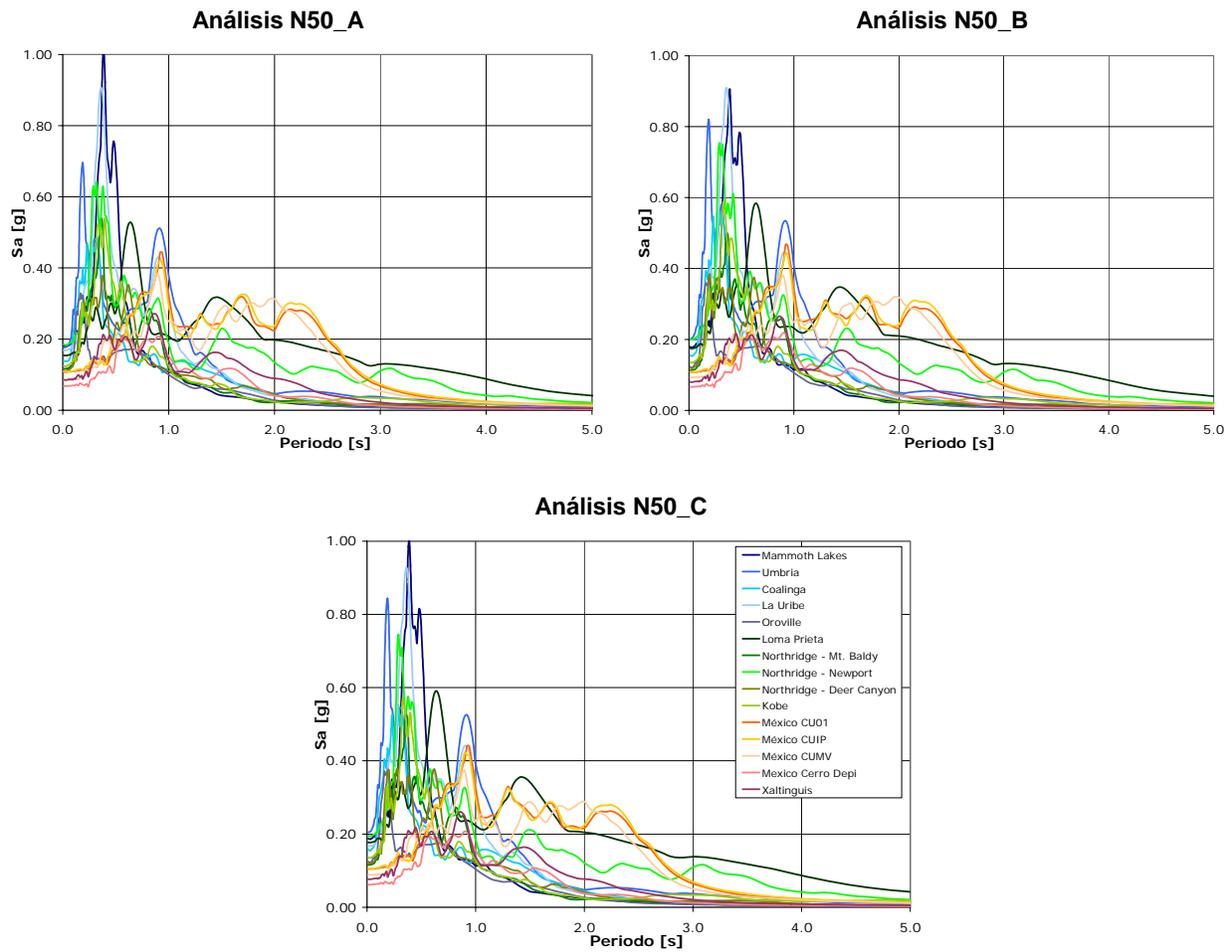


Figura 4.22 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo N50

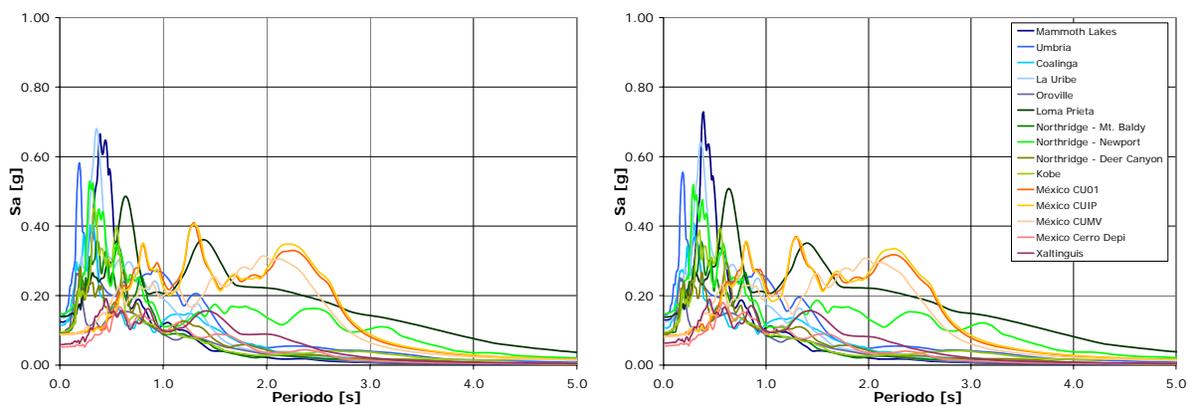


Figura 4.23 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo O03

4.4.6 Análisis de la respuesta dinámica

En la Figura 4.24 se presentan los resultados del análisis para el perfil ubicado en el Aeropuerto El Dorado (Zona 4 MZSB). La Figura incluye las funciones de transferencia no lineales y los espectros de amenaza uniforme de aceleración, pseudo velocidad y desplazamiento correspondientes a periodos de retorno de 100, 250, 475, 1000 y 2500 años. Los resultados de los 102 sondeos analizados se presentan en el Anexo 4.1.

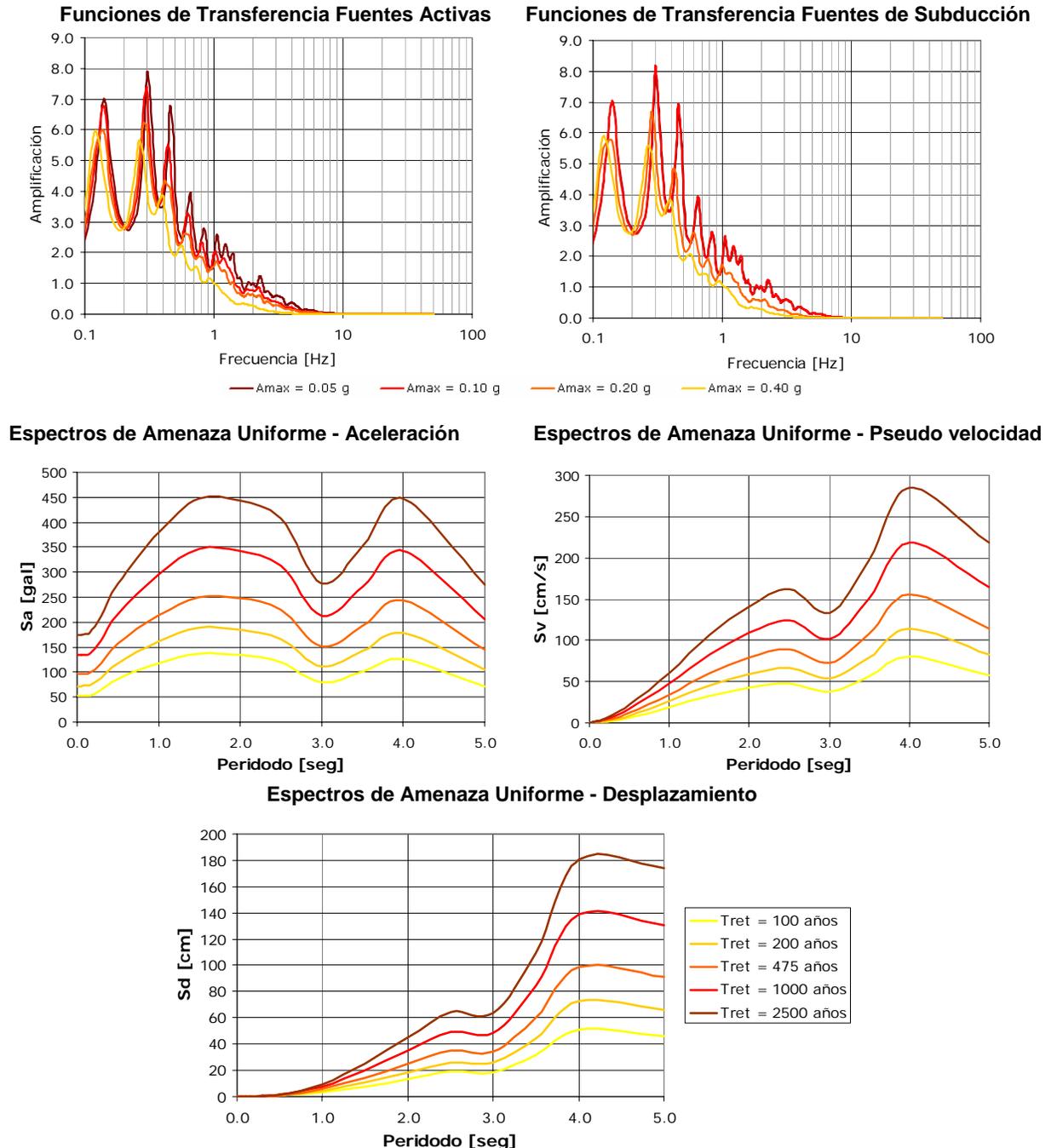


Figura 4.24 Resultados Punto de Análisis: N51 - Aeropuerto El Dorado

En las Figuras 4.25 a 4.29 se presentan los espectros de amenaza uniforme para un periodo de retorno de 475 años encontrados para los 103 puntos de control (incluyendo Roca Dura), diferenciados por zonas sísmicas, junto con el correspondiente espectro de diseño establecido en el Decreto 193 de 2006.

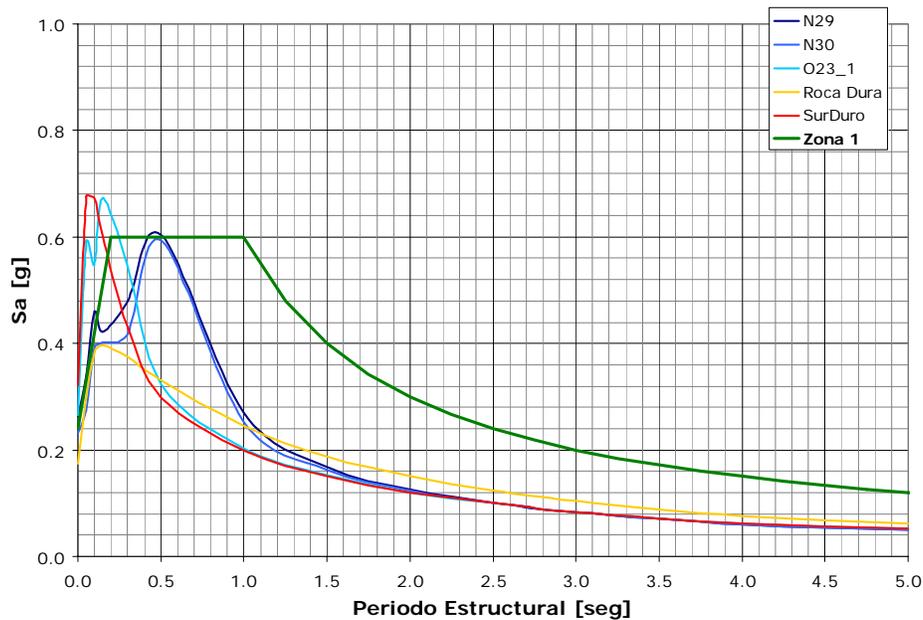


Figura 4.25 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 1

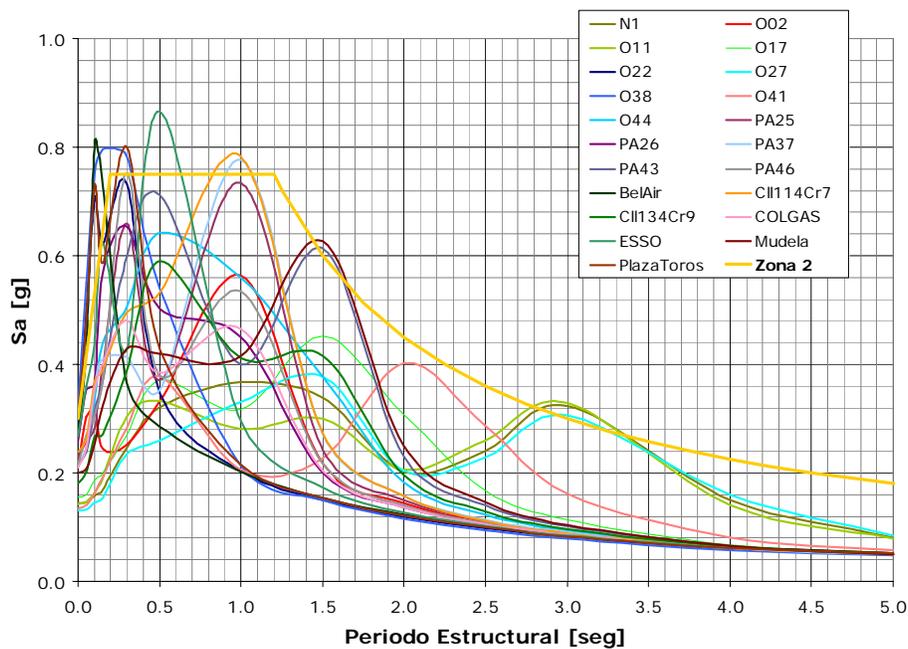


Figura 4.26 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 2

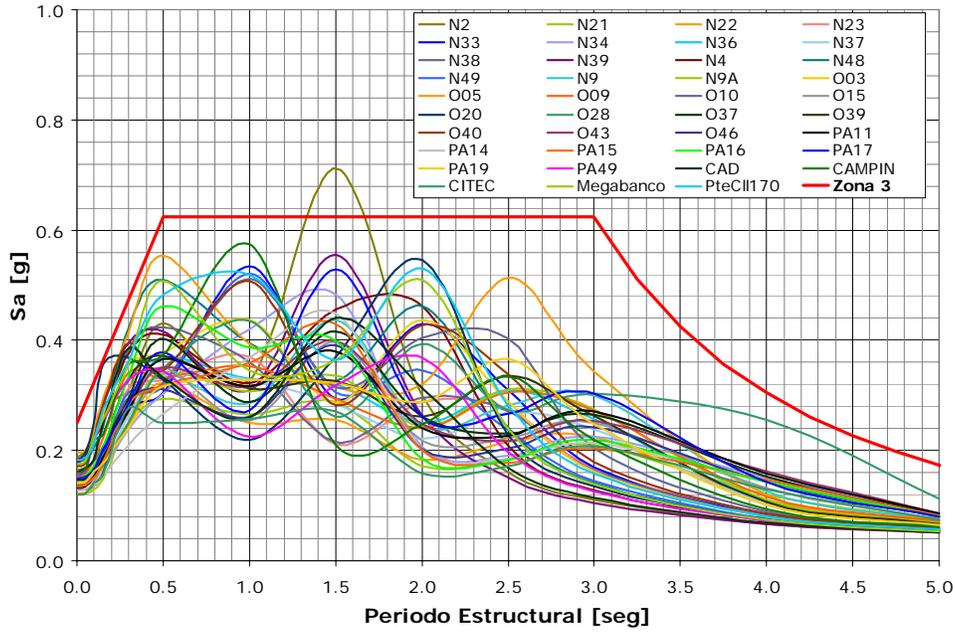


Figura 4.27 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 3

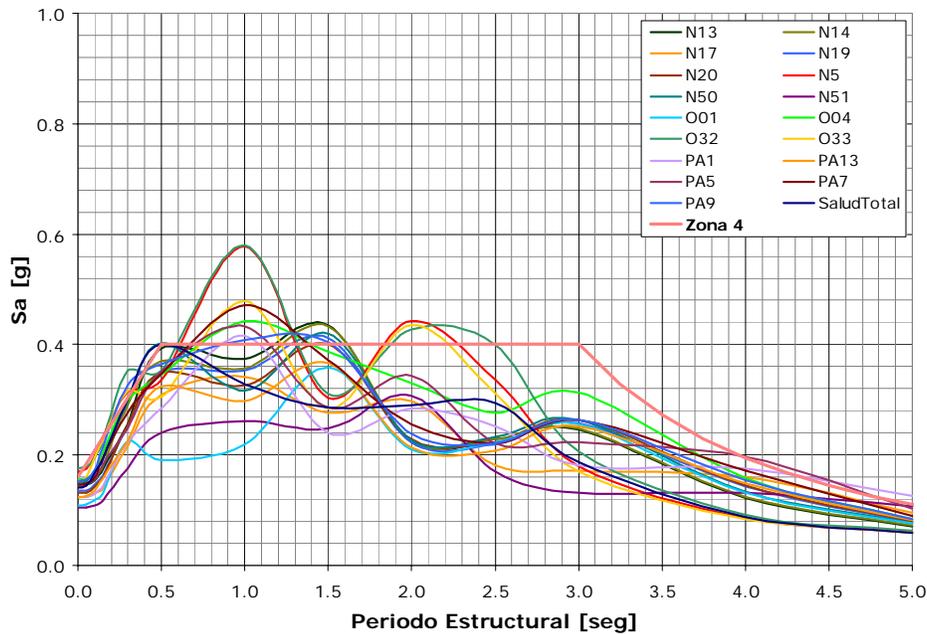


Figura 4.28 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 4

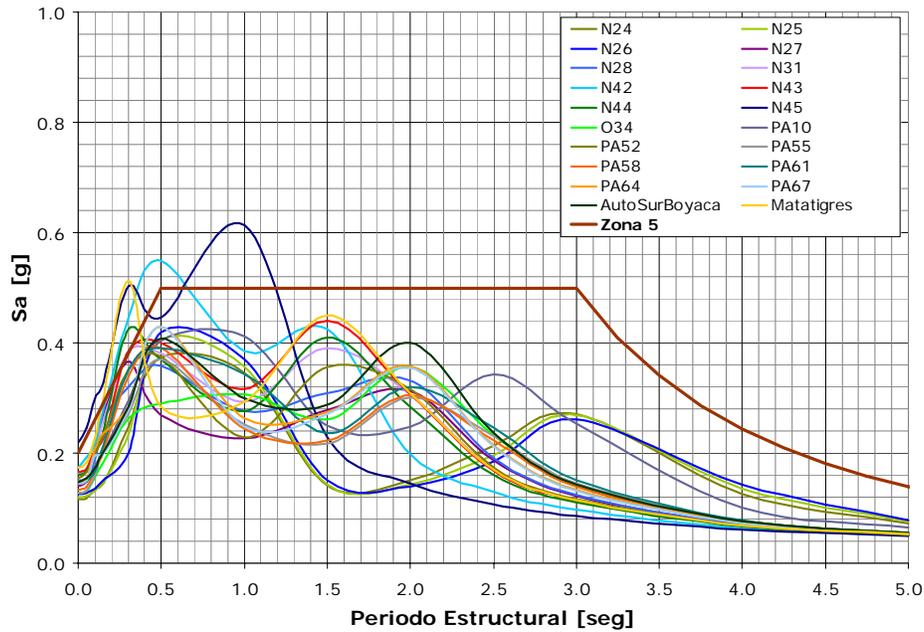


Figura 4.29 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 5

4.5 BIBLIOGRAFÍA

Aguilar A., Arboleda J. & Ordaz M., 1999. Programa Crisis 99. Programa para calcular el Riesgo Sísmico.

Aki, K., 1988. Local Site Effects on Ground Motions, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II- Recent Advances in Ground motion Evaluation, J.L. Von Thun (Editor), Geotechnical Special Publication No.20, Am. Soc. Civil Eng, New York, 103-155.

Biot, M. A., 1956. Theory of deformation of porous viscoelastic anisotropic solid, Journal of applied physics, Vol. 27, No. 5, May 1956, pp. 459-467.

Chavez-Garcia, F.J. & Bard, P.-Y. 1994. Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquakes, Soil Dynamics. Earthquake Engineering, 13/em, 229-247.

Centro Regional de Sismología para América del Sur. CERESIS. 1999. El terremoto de Loma Prieta - 17 de octubre 1989.

Comunidad Económica Europea-Ingeominas. 1992. Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán, Publicaciones Especiales Ingeominas #2.

Constantapoulos, I. V., 1973. Amplification studies for nonlinear hysteretic soil model, Sc. D. thesis, Departament of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDES, 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.

Decreto 193 del 08 de Junio de 2006. "Por el cual se complementa y modifica el Código de construcción de Bogotá D. C., se adoptan los espectros de diseño y las determinantes de la Microzonificación Sísmica".

Dobry, R., & Vucetic M., 1987. Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits, In proceedings of the International Symposium n Geotechnical Engineering of soft soils, Vol. 2, Manual J. Mendoza y Luis Montañez (eds), Mexico, 1987.

Duffy, J. & Midlin, R. D., 1957. Stress-strain relation and vibrations of granular medium, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 24, 157, p. 585.

Finn, W. D. L & Lee, M. K. W. 1991 . DESRA-2C: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential, Univ. of British Columbia, Faculty of Applied Science.

Hardin, B.O. & Drnevich, V. P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equation Curves, Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, July 1972, pp. 667-692.

Hardin, B. O., & Richart, F. E., Jr., 1963. Elastic wave velocities in granular soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1, Proceedings Paper 3407, February 1963, pp. 33-66.

Hashash, Y & Park, 2001. D. Non- linear one dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. Engineering Geology 62 (2001) 185 - 206.

Hashash, Y & Park, D. 2002. Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (2002) 611–624.

Haskell, N. A. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. Bull. Seism. Soc. Amer. 43, 17-34.

Heirli, W., 1962. Inelastic wave propagation in soil columns, Journal for the soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, No. SM6, December 1962, pp. 33 - 63.

Herrera, I. & Rosenblueth, E. 1965. Response spectra on stratified soil, Proceedings γ , 3rd World Conference ON Earthquake Engineer, New Zealand, 1965.

Idriss, I. M. & Seed, H. B., 1967. Response of horizontal soil layers during earthquakes, Research Report Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley.

Idriss, I. M. & Seed, H. B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, Proceedings paper 6043, July 1968, pp. 1003-1031.

Idriss, I. M. Dobry, R. & Singh, S. 1978. Nonlinear behaviour of soft clays during cyclic loading. ASCE J. Geotechnical Eng. Division. 104 (GT12).

Idriss, I. M. 1990. Response of Soft Soil Sites during Earthquakes. Proceedings of the Symposium to Honor Professor H. B. Seed, Berkeley, May, 273-289

Idriss I. M. & Sun, J. I., 1992. SHAKE91.

Jacobsen, L., 1930. Motion of a soil subjected to a simple harmonic ground vibration, Bulletin of the Seismic Society of America, Vol. 20, 1930, pp.160-196.

Kanai, K., 1950. The effect of solid viscosity of surface layer on the earthquake movements, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 28, 1950, pp. 31-35.

Kanai, K., 1952. Relation between the nature of surface layer and the amplitude of earthquake motions, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 30, 1952, pp. 31-37.

Kanai, K., 1961. An empirical formula for spectrum of strong earthquake motions, Bulletin Earthquake Institute, Tokyo University, Vol. 39.

Oficina para la Prevención de Emergencias OPES, Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres DNPAD, INGEOMINAS, UNIANDES., 1996. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Subproyecto No 11 Zonificación Sísmica.

Ordaz, Aguilar, Arboleda. "CRISIS 99 ®. Program For Computing Seismic Hazard", Universidad Autónoma de México, 1991

Martinez A., Alvarado C., Rubiano D., 2002. Selección de Señales de Diseño Consistentes con el Escenario Regional de Amenaza Sísmica: Casos Aplicados en Colombia. INGEOMINAS.

Nakamura, Y. A., 1989. Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface Using Microtremors on Ground Surface, QR of RTRI 30, No.1, February, 25-33.

National Information Service for Earthquake Engineering, NISEE, 1993. NISEE Software Library 2nd Edition, University of California, Berkeley.

Papadakis, C. N., 1973. Soil transients by characteristics method, PHD Thesis, University of Michigan.

Parmelee, R. A., Penzien, J., Scheffey, C. F., Seed, H. B., & Thiers, G. R., 1964. Seismic effects on structures supported on piles extending deep sensitive clay, Report No. 64-2, Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, August 1964.

Parmelee, R. A., Perelman, D. S., Lee, S. L. & Keer, L. M., 1968. Seismic response of structure foundation systems, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vo. 94, No. EM6, Dec.1968, pp. 1295-1315.

Ramberg, W. & Osgood, W. T., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note 902, NACA, 1943.

República de Colombia, 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997. Decreto 33 de 1998.

Röesset J. M., 1977. Soil amplification in Earthquakes. In Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Desai & Christian (Editors), McGraw-Hill, Ch. 19.

Röesset J. M., Sarrazin M. & Vanmarcke E., 1969. The use of amplification functions to derive response spectra including the effect of local soil conditions. Res. Rept. R69-48, Massachusetts Institute of Technology, Civil Eng. Dept.

Romo M.P. & Jaime, A. 1987. Degradación del S módulo de cortante de las arcillas del Valle de México", Memorias VII Congr. Nac. Ing. g, Sirmica, Querétaro, Qro., 1987. E-31-44.

Romo, M.P. y Seed H.B., 1986. Analytical modeling of dynamic soil response in the Mexico earthquake of September 19, 1985, Proc. ASCE Specialty Int. Conf. on the Mexico Earthquakes-1985, 148-162, Sept 19, 1986, México

Sánchez-Sesma F- J, Chávez-García F. J & Bravo M. A, 1988. Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 78, No 1, pp 83-95.

Schnabel, B; Lysmer, J., & Seed H. B., 1972. Shake a Computer Program for the Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, University of California, Berkeley, EERC Report 72-12-1972.

Seed H. B., & Idriss I. M., 1969. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proceedings Paper 6347, January 1969, pp. 99-137.

Seed, H.B. & Idriss, I.M. 1983. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake. Engineering Research Institute, El Cerrito, California.

Seed H. B., 1987. Influence of local soil conditions on ground motions and building damage during earthquakes. Eighth Nabor Carrillo Lecture, Mexican Society for Soil Mechanics.

Seed, H.B., Romo M.P., Sun J., Jaime A. & Lysmer J., 1988. Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico Qty in the Earthquake of Sept. 19, 1985, Earthquake Spectra (4) pp. 687 – 729.

Sezawa, K., 1927. On the decay of waves in viscoelastic soil bodies, Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokio, Vol. 3, 1927, PP. 43-54.

Singh, S., K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J., M., Mena, E., & Quaas, R., 1988. The Mexico Earthquake of September 19,1985 - A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone, Earthquake Spectra, Vol.4, No.4.

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Richart, F. E., Jr., 1973. Soil motion computations by Characteristics Method, ASCE National Structural Eng. Meeting, San Francisco, meeting reprint 1952.

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Richart, F. E., Jr., 1974. CHARSOIL, Characteristics Method applied to soils, NISEE, University of Berkeley.

Sun J. Golesorkhi & Seed H. B., 1988. Dynamic Moduli and damping ratios for cohesive soils, Rept. No. EERC 88-15. University of California, Berkeley.

Tatsuoka, F., Shibuya, S., & Kuwano, R. 2001. Advanced laboratory stress-strain testing of geomaterials, A. A. Balkema Publishers, Netherlands.

Universidad de los Andes, 2002. Estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Manizales. Bogotá.

Whitman R. V. 1986 Are the soil depositions in Mexico city unique?, Proceedings ASCE international conference on Mexico Earthquakes- 1985, Mexico city.

Whitman, R. V., 1997. The Book, Massachusetts Institute of Technology.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 4 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO	4-1
4.1 INTRODUCCIÓN	4-1
4.1.1 Generalidades	4-1
4.1.2 Metodologías de análisis	4-2
4.1.3 Casos históricos – Efectos de sitio	4-3
4.2 MARCO TEÓRICO: MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA UNIDIMENSIONAL	4-9
4.2.1 Formulación General	4-9
4.2.2 Programa de Análisis: SHAKE 91	4-16
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA MEDIANTE MODELOS UNIDIMENSIONALES	4-18
4.3.1 Introducción	4-18
4.4 RESPUESTA DINÁMICA UNIDIMENSIONAL	4-22
4.4.1 Perfiles de Análisis	4-22
4.4.2 Caracterización Geotécnica y Propiedades Dinámicas	4-27
4.4.3 Señales de análisis para determinar las funciones de transferencia	4-30
4.4.4 Señales Características	4-38
4.4.5 Análisis de sensibilidad	4-44
4.4.6 Análisis de la respuesta dinámica	4-47
4.5 BIBLIOGRAFÍA	4-51
ANEXO 4.1 – FUNCIONES DE TRANSFERENCIA NO LINEALES Y ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME	

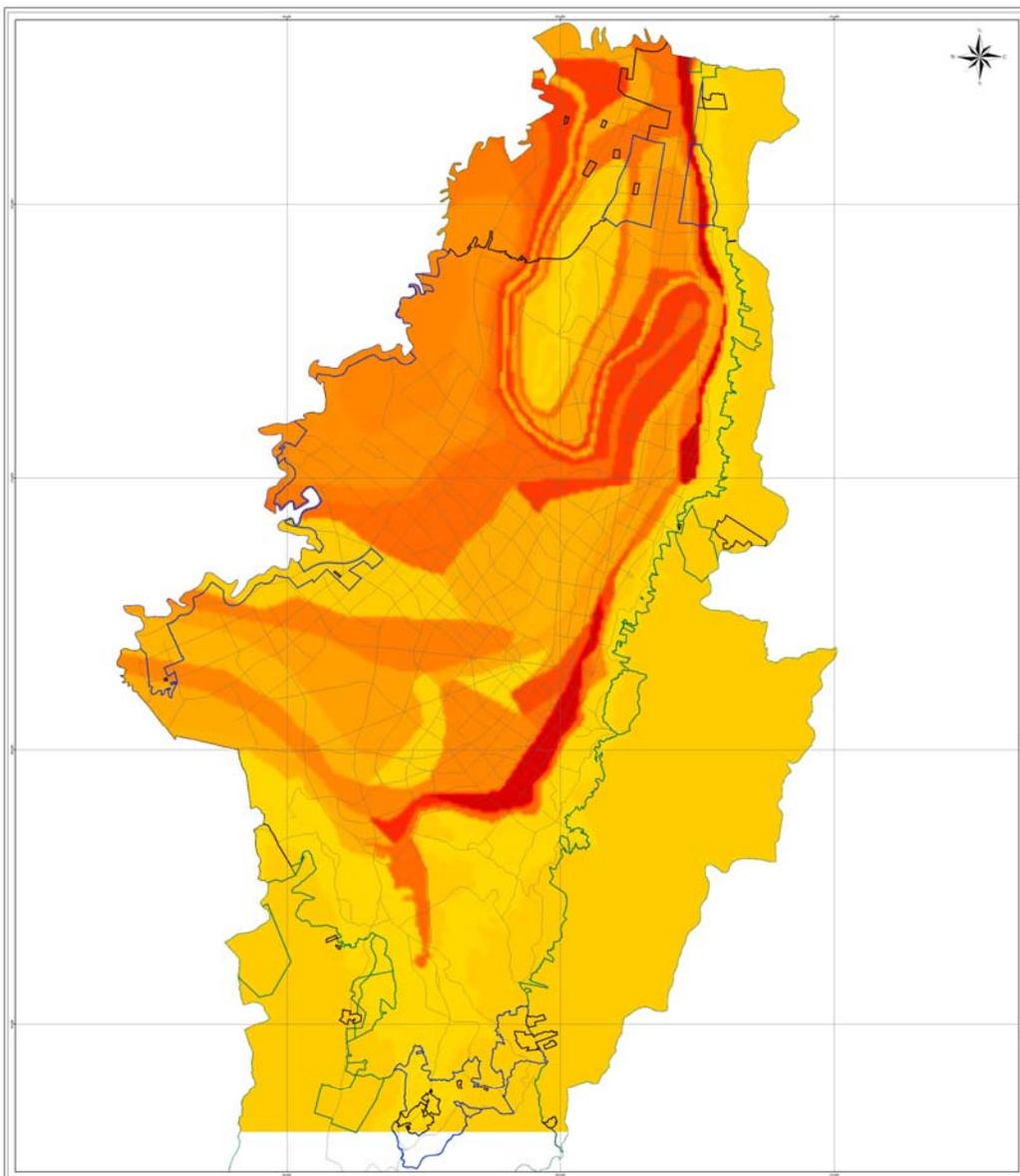
LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Amplificación y deamplificación de los movimientos sísmicos en términos de la aceleración pico (Fuente : Seed & Idriss, 1983).....	4-4
Figura 4.2 Corrección de la amplificación y deamplificación (Fuente : Idriss, 1990).....	4-5
Figura 4.3 Relación entre modulo de cortante y coeficiente de Amortiguamiento vs Deformación (Fuente Dobry & Vucetic, 1987)	4-6
Figura 4.4 Esquema elemento unidimensional de suelo	4-12
Figura 4.5 Líneas características en el plano z-t para seis divisiones de suelo	4-13
Figura 4.6 Curvas modelo lineal equivalente	4-17
Figura 4.7 Esquema efectos de sitio y cálculo de funciones de transferencia	4-19
Figura 4.8 Degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento efectivo en función de la profundidad 4-20	
Figura 4.9 Deformación cortante promedio y aceleración máxima en función de la profundidad	4-21
Figura 4.10 Localización de puntos de estudio por zonas sísmicas.....	4-26
Figura 4.11 Modelos de comportamiento dinámico de suelos blandos	4-29
Figura 4.12 Modelos de comportamiento dinámico de suelos granulares.....	4-30
Figura 4.13 Señales de Fuente Activa	4-33
Figura 4.14 Señales de Fuente Subducción	4-35
Figura 4.15 Espectros normalizados señales fuentes activas	4-37
Figura 4.16 Espectros normalizados señales fuentes subducción	4-37
Figura 4.17 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente cercana.....	4-39
Figura 4.18 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente intermedia.....	4-40
Figura 4.19 Acelerogramas de diseño y espectros de respuesta en roca de fuente lejana	4-41
Figura 4.20 Comparación entre espectros de respuesta de señales de diseño y espectro de amenaza uniforme en terreno firme.....	4-43
Figura 4.21 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo N23.....	4-45
Figura 4.22 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo N50.....	4-46
Figura 4.23 Espectros de respuesta obtenidos del análisis de sensibilidad. Sondeo O03	4-46
Figura 4.24 Resultados Punto de Análisis: N51 - Aeropuerto El Dorado	4-47
Figura 4.25 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 1	4-48
Figura 4.26 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 2	4-48
Figura 4.27 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 3	4-49
Figura 4.28 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 4	4-49
Figura 4.29 Espectros de amenaza uniforme para los puntos analizados en la Zona 5	4-50

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Sismos en que los efectos de sitio han sido importantes	4-3
Tabla 4.2 Identificación puntos de estudio	4-23
Tabla 4.3 Características registros sismos fuente activa	4-32
Tabla 4.4 Características registros sismos fuente subducción	4-32
Tabla 4.5 Características registros sismos fuente cercana	4-38
Tabla 4.6 Características registros sismos fuente regional	4-38
Tabla 4.7 Características registros sismos fuente lejana.....	4-38
Tabla 4.8 Características generales de sondeos incluidos en el análisis de sensibilidad	4-44
Tabla 4.9 Descripción de la asignación de propiedades para cada sondeo.....	4-44

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO



CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de este proyecto consiste en la elaboración del mapa de microzonificación sísmica del área urbana de Bogotá y el desarrollo de las recomendaciones para el diseño sismorresistente de estructuras en la zona estudiada. Estas recomendaciones serán complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decreto 193 de 2006. Las recomendaciones que se presentan se enmarcan dentro del literal A.2.9 “Estudios de Microzonificación” del Decreto 33 de 1998.

El mapa de microzonificación sísmica sirve para establecer los requisitos mínimos de diseño sísmo resistente. Para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad, la microzonificación sísmica establece una especificación de diseño de tipo espectral (para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) de manera que cualquier edificación, diseñada con la especificación proporcionada, tendrá en general la misma probabilidad de sufrir daño o colapso ante un evento sísmico futuro. De esta manera no se establecen, en principio, limitaciones a las características generales de las edificaciones a diseñar. Sin embargo, es claro que edificaciones con características dadas, tendrán especificaciones de diseño más exigentes que otras, dependiendo de su ubicación geográfica. Teniendo en cuenta las exigencias mínimas de la NSR-98, existe la posibilidad de no poder utilizar ciertos sistemas estructurales tradicionales en algunas zonas del Distrito, casos en los cuales el calculista deberá recurrir a sistemas estructurales que ofrezcan mayor rigidez y/o resistencia a las fuerzas horizontales.

Los requisitos de diseño sísmo resistente que se especifican incluyen el nivel de fuerza sísmica de diseño a nivel de la superficie del terreno para diferentes tipos estructurales (desde casas de uno y dos pisos hasta edificaciones de mayor altura, o construcciones como bodegas, edificios industriales, tanques y otros). También se tiene en cuenta la posible ocurrencia de amplificaciones en la respuesta, consecuencia de las condiciones del subsuelo. Los resultados del presente proyecto de investigación pueden complementarse en el futuro con información recolectada posteriormente. Ésta podría incluir las zonas en las cuales existe posibilidad de presentarse fenómenos especiales asociados al sismo tales como eventuales fallas de taludes amplificación topográfica o similares. De esta manera se establece la necesidad de adelantar estudios particulares, en especial, cuando la magnitud del proyecto lo amerite.

No obstante su aparente similitud en comportamiento sísmico, las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, las zonas especiales de reserva (humedales, pantanos y/o lagos), los rellenos, las zonas de fallamientos superficiales, entre otras, deben ser estudiadas por aparte. Esto se debe a que pueden tener un comportamiento sísmico diferente al esperado o a que en el futuro pueden presentar una restricción especial en cuanto a su uso.

Con base en un mapa de zonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones

necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantar un proyecto de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en la zona que se encuentre. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas.

Adicionalmente, la zonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños en sismos futuros esperados, tanto a nivel de las estructuras como en las líneas vitales. Solo después de muchos años de utilización de las especificaciones de diseño sismo resistente, la vulnerabilidad sísmica irá disminuyendo hasta alcanzar los estándares aceptables para la sociedad.

A cada punto que se encuentra dentro del perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad se le asigna un espectro de diseño el cual se define de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma NSR – 98 para edificaciones y que corresponden a los siguientes:

- Espectros de respuesta en términos de aceleración.
- Periodos de retorno de análisis: 475 años.
- Amortiguamientos con respecto al crítico: 5%
- Espectros a nivel de superficie del suelo o en terreno firme en función del tipo de cimentación en que se apoye el edificio y a criterio del ingeniero geotecnista.

5.2 ZONIFICACIÓN EMPLEADA PARA AMENAZA EN SUPERFICIE

5.2.1 Generalidades

La evaluación de la amenaza sísmica a nivel de la superficie del terreno se realiza con base en una zonificación basada en una serie de polígonos o subzonas dentro de las cuales la respuesta sísmica se ha caracterizado a partir de los resultados de la evaluación de la respuesta de sitio de los diferentes sondeos analizados. Lo anterior con el fin de detallar de mejor manera los resultados del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad, utilizando la información disponible en la actualidad. Estas subzonas corresponden a una depuración de las cinco zonas tradicionales incluidas en el Decreto 193 de 2006. Para ello se emplea la información recopilada y se construye un modelo que tiene en cuenta la profundidad y las características de los diferentes depósitos de suelo, junto con la información incluida en el Capítulo 3 de este informe.

En la Figura 5.1 se presenta el mapa de polígonos utilizado para la ciudad el cual se establece con base en la información existente, como por ejemplo el mapa de isoperíodos y el mapa de profundidad de los depósitos, y en la distribución geográfica de todos los sondeos analizados.

5.2.2 Selección de puntos de control

Una vez definidos los polígonos anteriormente descritos, se establece la respuesta sísmica característica a partir de los sondeos que se encuentren contenidos en cada uno, procurando escoger la respuesta más representativa del polígono, de manera conservativa. La asignación de la respuesta no se hace definiendo para cada polígono un espectro de respuesta uniforme, sino una función de transferencia del depósito, lo cual permite tener en cuenta la variación geográfica de la amenaza en roca.

Es importante indicar que el contar con funciones de transferencia para cada polígono es un avance notable con respecto a otros casos donde existen solamente áreas homogéneas o un mapa de microzonificación de áreas características, en cuyo caso se define en cada área una envolvente de la respuesta sísmica, lo que puede conducir a valores demasiado conservadores. En el presente caso se ha seleccionado una microzonificación más detallada con el fin de eliminar posibles factores de sobreestimación de la amenaza que resultarían de la aplicación directa del Decreto 193 de 2006.

La tabla 5.1 presenta una lista de los puntos de control seleccionados. La ubicación geográfica de estos puntos se ilustra en la Figura 5.1, indicando el polígono correspondiente a cada uno.

Tabla 5.1. Puntos de control seleccionados

Identificación Sondeo	Localización Sondeo	Este	Norte
N01	Cll. 170 Cra. 9	1005112	1016788
N02	Autonorte Cll. 200	1004008	1020975
N04	Cll. 138 Club SubOficiales	1001422	1014592
N05	Cll. 100 Autonorte	1002311	1010007
N13	Clínica Corpas	998293	1018284
N17	Barrio Bochica Norte Av. Cundinamarca	996701	1012698
N22	Cll. 13 Av. Boyacá	994499	1005917
N29	Autopista Sur SOACHA	989412	1000031
N30	Autopista Sur SOACHA	988132	1000031
N31	Barrio Bosa Holanda	988027	1003536
N33	Monumento Los Heroes	1001912	1007714
N39	CAD Av. Americas Cra. 30	999502	1003225
N42	Cra. 30 Cll. 6	997699	1001128
N45	Barrio el Tunal	993611	997242
N51	Aeropuerto El Dorado	993310	1010908
O05	Carrera 46 con calle 140A	1002207	1014747
O17	Carrera 30 - calle 45	999791	1004251
O22	Transversal 5A Calle 127	1005740	1011924
O23	Cra 7 Calle 38	997226	996259
O29	Calle 87 Carrera 8	1003397	1007984
O32	Avenida Suba Diagonal 117A	1001730	1011627
O38	Carrera 9 Calle 125	1005178	1011574
PA1	Av. Cll. 68 Cra. 110	994323	1012020
PA5	Av. Cll. 68 Cra. 92	995953	1010787
PA7	Av. Cll. 68 Cra. 83	996705	1010330
PA10	Av. Cll. 68 Av. Boyacá	993290	1003704
PA11	Av. Cll. 68 Cra. 66	998147	1009178
PA17	Av. Cll. 72 Cra. 30	1000827	1007635
PA19	Av. Cll. 72 Cra. 24	1001159	1007402
PA26	Cra. 7 Cll. 61	1001872	1005536
PA37	Cra. 10 Cll. 19	1000401	1001194
PA43	Cll. 13 Cra. 19	999234	1001244
PA46	Cll. 13 Av. Ciudad de Quito	998459	1002001
PA49	Av. Ferrocarril Cll. 9	996957	1002490
PA52	Av. Ferrocarril Cll 2	995383	1001850
PA61	Av. 1ro. Mayo Cra. 74	992692	1002560
AutoSurB	Puente Autop Sur con Avenida Boyaca	992445	999768
Cll114Cr7	Torres Unidas	1004873	1010605
Cll134Cr9	Abadia del Bosque	1004983	1012817
COLGAS	Edificio COLGAS	1001100	1002975
ESSO	Edificio ESSO	1001433	1003528
Megabanco	Torre Megabanco	1003541	1009499
Mudela	Múdela del Río	1003800	1025367
PlazaToros	Plaza de Toros "La Santamaria"	1001211	1001759
PteCll170	Puente Calle 170 Autonorte	1003541	1017240
SurDuro	Terreno Firme Sur	994220	994239

5.3 SUAVIZADO DE ESPECTROS

Para efectos de definir los espectros de diseño, los espectros resultantes del análisis de respuesta dinámica se someten a un proceso de suavizado asociado a la incertidumbre que existe en el cálculo del periodo estructural. Gracias a este proceso se logran suavizar los picos y los valles del espectro de amenaza uniforme que se presentan en la zona de periodos cortos (periodos inferiores a 0.5 seg).

5.3.1 Proceso de suavizado

Partiendo de los espectros que resultan de los análisis de respuesta dinámica (ver Capítulo 4), se aplica un proceso de suavizado a la respuesta de sitio obtenida para los puntos de control, gracias al cual se tiene en cuenta la incertidumbre asociada con el cálculo del período estructural.

El proceso de suavizado por incertidumbre del periodo estructural incluye los siguientes pasos:

1. Seleccionar el espectro asociado a un periodo de retorno de 475 años para cada uno de los puntos de control.
2. Se aumenta el número de ordenadas del espectro seleccionado mediante un procedimiento tipo Bezier
3. Para cada ordenada del espectro se establece un rango comprendido entre el 80 % y el 120 % del periodo de análisis. Es decir para un período de 1 segundo se selecciona simultáneamente períodos de 1.2 y de 0.8 y así para todos los periodos.
4. Se calcula la aceleración espectral promedio y la desviación estándar de los valores comprendidos dentro del rango seleccionado.
5. Se calcula el valor promedio más una desviación estándar y este valor se asigna a la aceleración espectral de la ordenada espectral seleccionada.
6. Se continúa el proceso para todos los puntos del espectro.

El proceso se realiza para todos los espectros asociados a un periodo de retorno de 475 años encontrados para los puntos de control.

5.4 ESPECTROS DE DISEÑO

Una vez suavizados los espectros de respuesta de cada uno de los puntos de control, se especifican las condiciones mínimas de los espectros de diseño. Estas condiciones se establecen teniendo en cuenta la respuesta unidimensional de señales características en todos los puntos incluidos en el análisis (ver Capítulo 4), particularmente las que representan eventos cercanos. Adicionalmente se tiene en cuenta lo establecido en la NSR-98 referente a espectros de diseño sismorresistente en Colombia.

Los espectros de amenaza uniforme obtenidos en los análisis anteriores se utilizan como base para establecer las formas finales de los espectros de diseño. Las consideraciones para construir los espectros de diseño son las siguientes:

- (a) Se define la aceleración mínima del terreno en cada uno de los polígonos de trabajo. La gran mayoría de los polígonos se les asigna una aceleración mínima de diseño de 0.20 g a excepción de algunos sectores al occidente de la ciudad en los cuales se asigna una aceleración de 0.15 g.
- (b) A todos los espectros de respuesta obtenidos se les aplica un espectro mínimo correspondiente al de diseño en la zona de bajos períodos debido a las altas variaciones encontradas en estos sectores y a la necesidad de recortar algunos picos muy altos pero de muy bajo rango de períodos por lo cual no serían de una afectación significativa a las estructuras en este rango de períodos.
- (c) A partir de cierto periodo estructural se adopta la forma resultante del espectro de amenaza uniforme suavizado adoptando la rutina especificada en el numeral 5.3.

Se definen entonces dos espectros mínimos de diseño para la ciudad de Bogotá. El primero se establece en la zona de depósitos lacustres más profundos, localizados al occidente de la ciudad, que corresponde a los polígonos representados por los sondeos N17, N51 y PA1. El segundo se establece para el resto del área de la ciudad, y corresponde al espectro de diseño en roca de la norma NSR-98, es decir, un espectro de diseño para un nivel de importancia $I = 1$, y un perfil de suelo S1. Las Figuras 5.2 y 5.3 presentan los coeficientes espectrales de los espectros mínimos. En la Figura 5.4 se grafican estos espectros

En la versión del programa SISBOG, se presentan los espectros de diseño resultantes en las diferentes zonas de Bogotá.

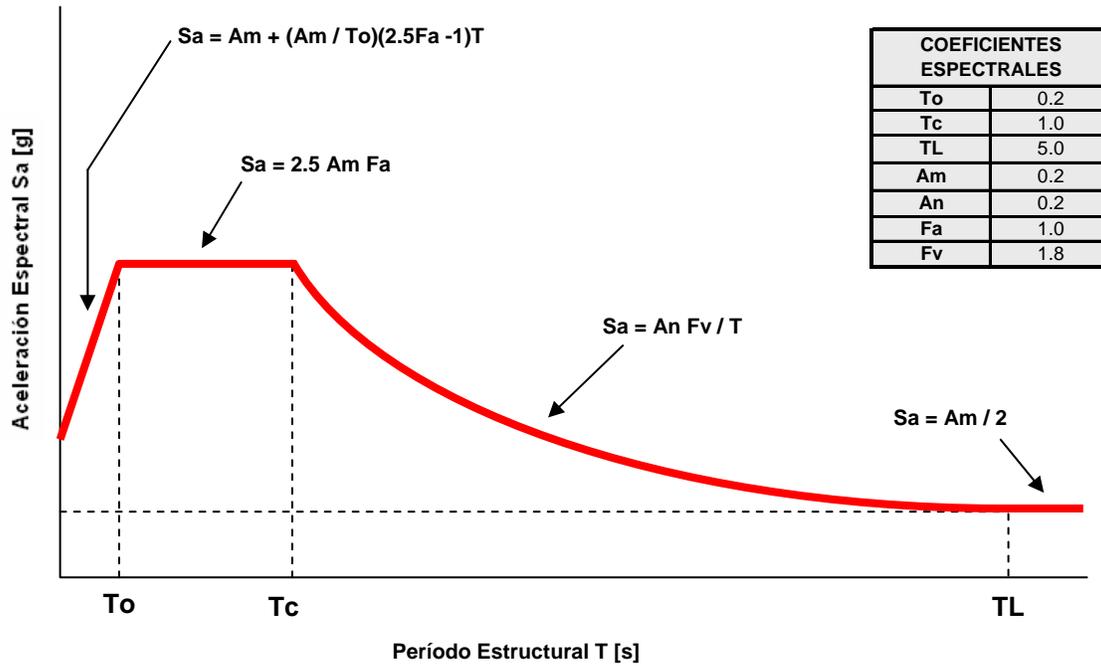


Figura 5.2 Coeficientes espectrales del espectro mínimo de depósitos lacustres profundos

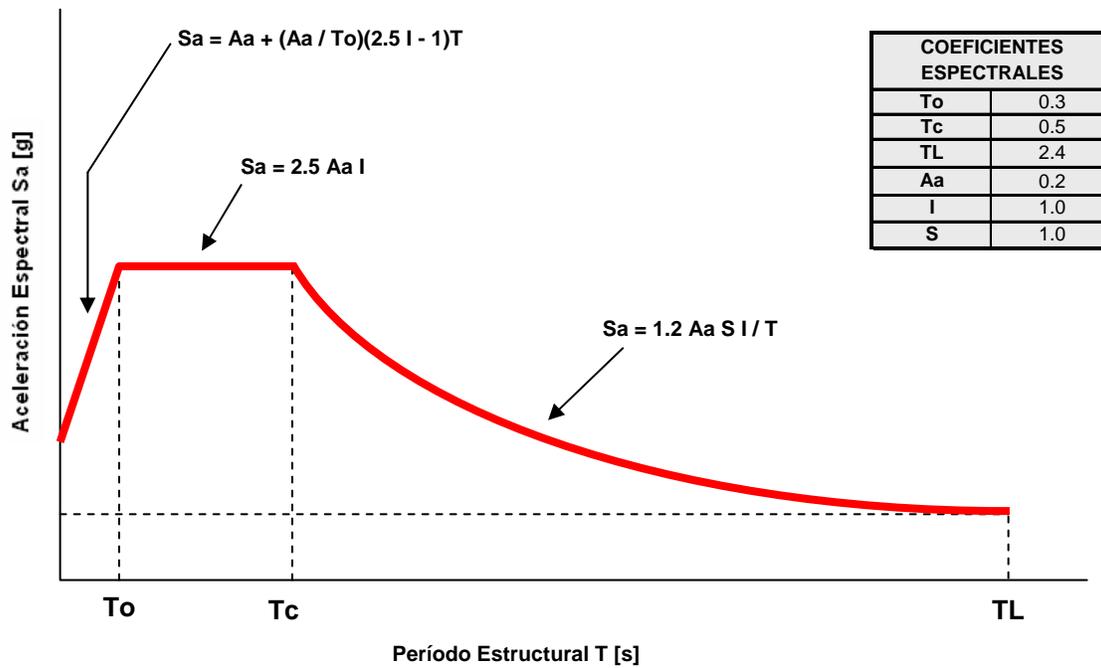


Figura 5.3 Coeficientes espectrales del espectro mínimo. Roca NSR-98

Los espectros de diseño en la ciudad de Bogotá, son el resultado de limitar la respuesta uniforme suavizada en cada punto por el espectro mínimo correspondiente, lo que significa que para cada punto en la ciudad, el valor del espectro de diseño corresponderá al máximo entre el de respuesta uniforme y el mínimo establecido. La Figura 5.5 muestra los espectros de diseño comparativamente con los espectros de amenaza uniforme, para los puntos de control.

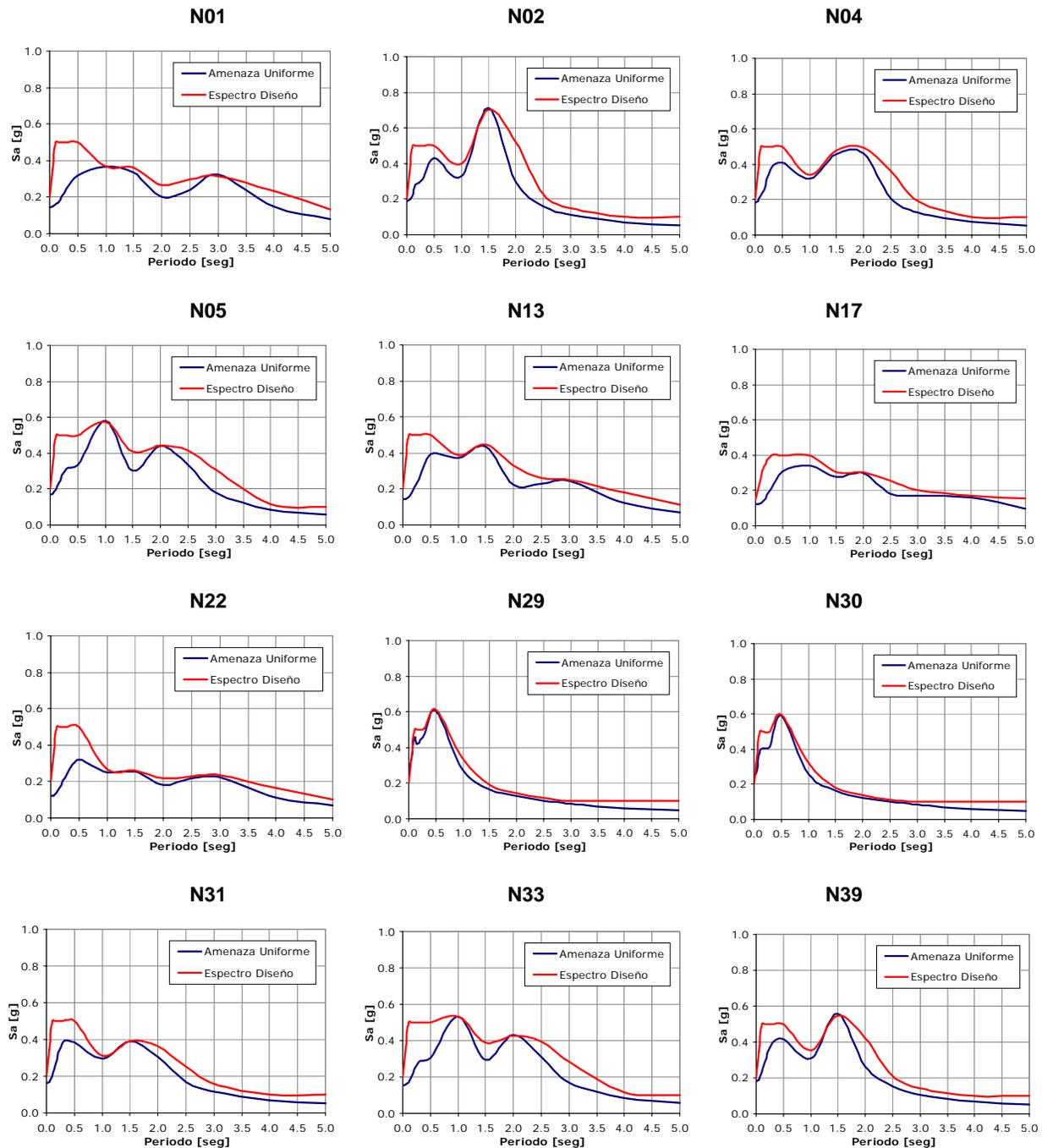
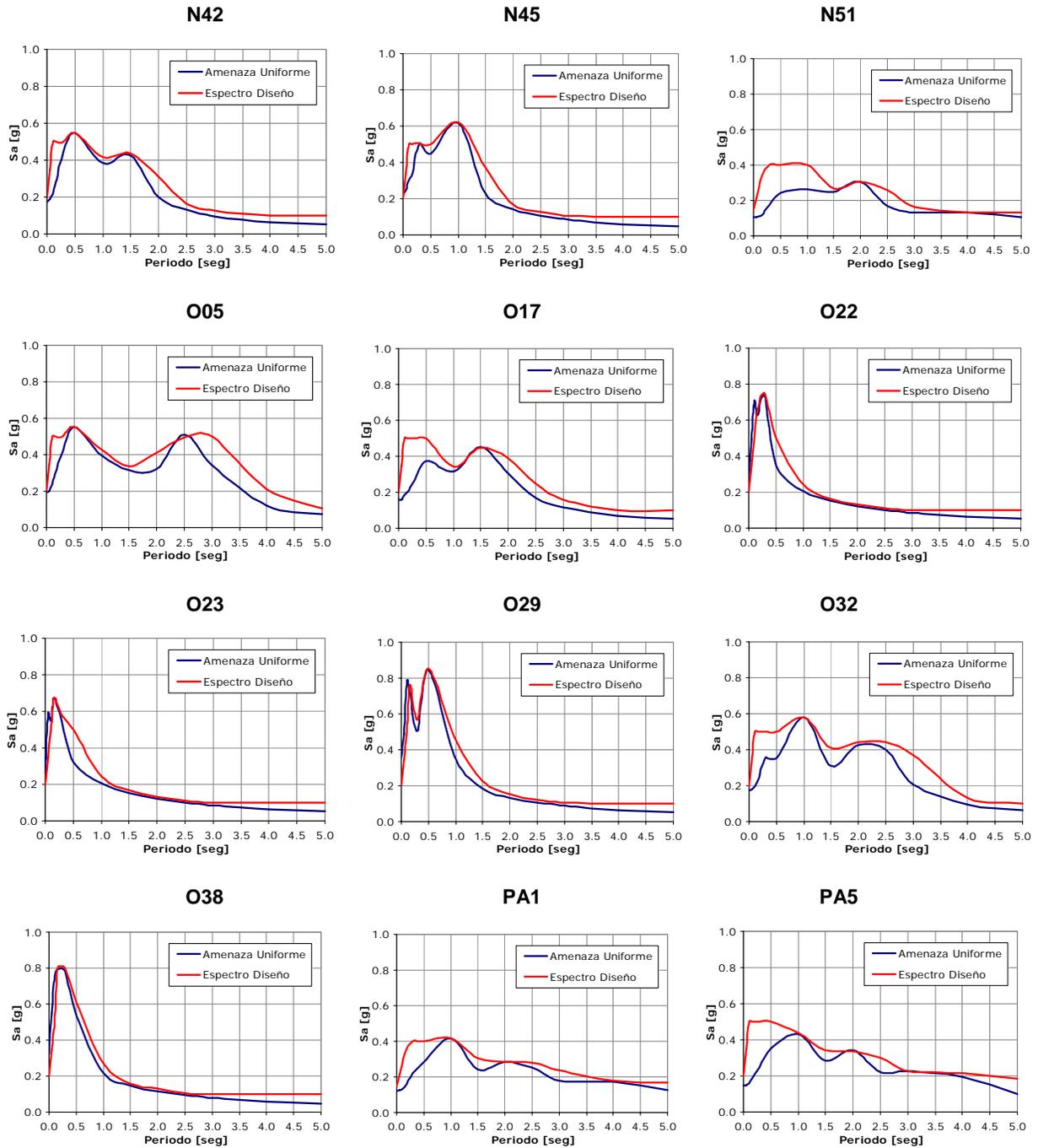
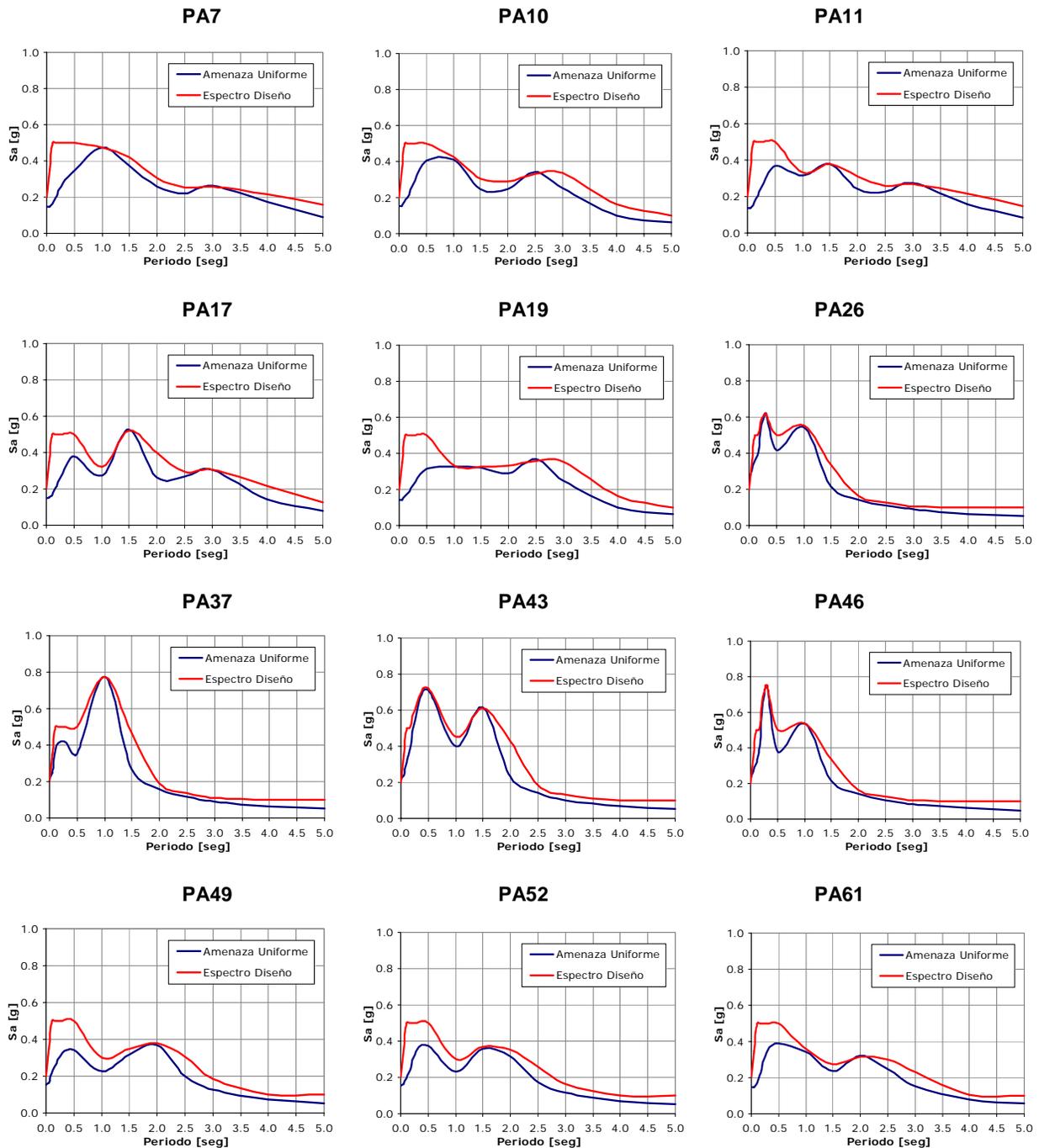


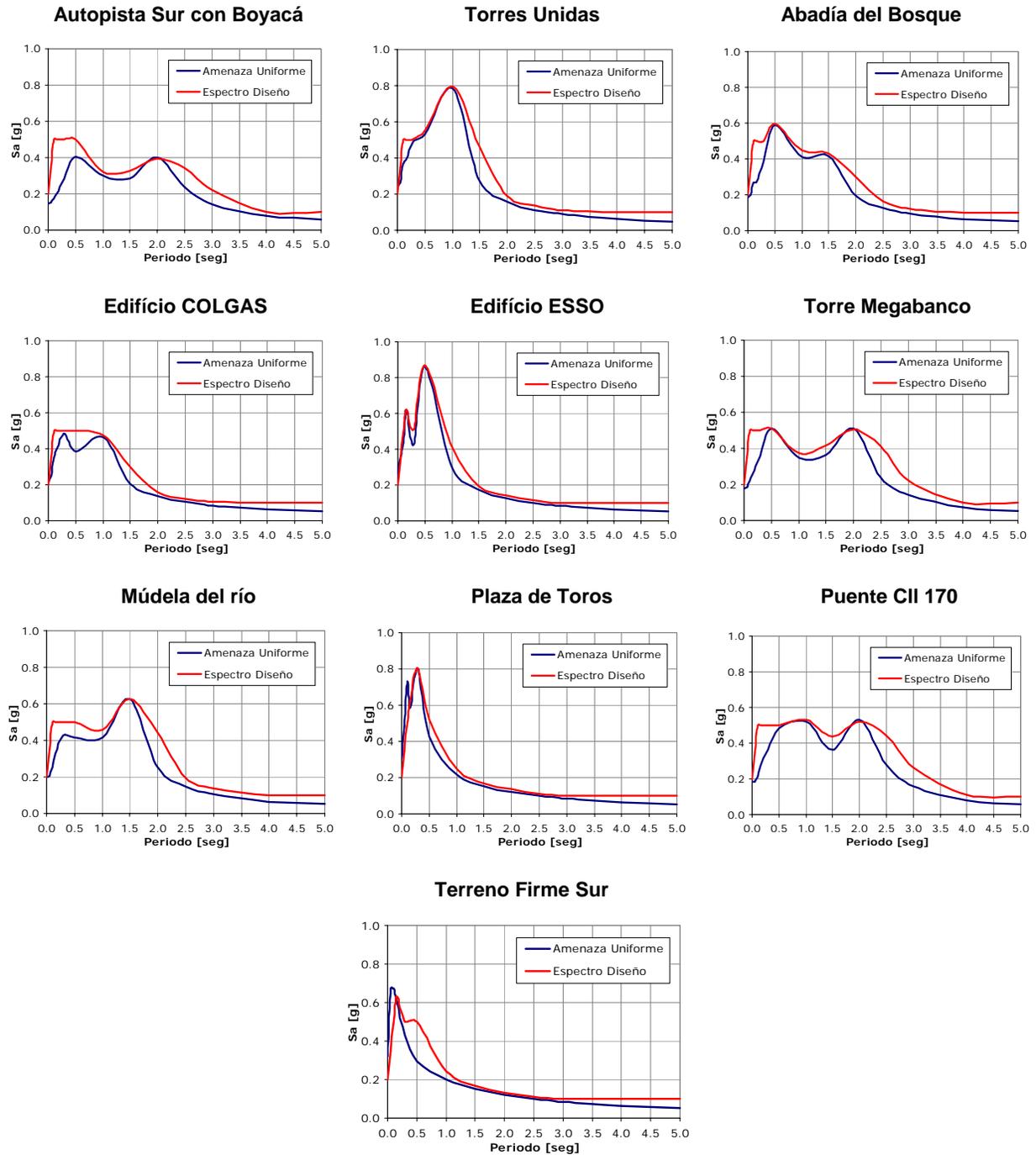
Figura 5.4 Espectros de diseño para puntos de control



Continuación Figura 5.4 Espectros de diseño para puntos de control



Continuación Figura 5.4 Espectros de diseño para puntos de control



Continuación Figura 5.4 Espectros de diseño para puntos de control

5.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

5.5.1 Generalidades

La microzonificación sísmica de Bogotá se construye a partir de los polígonos establecidos en el numeral 5.2, estableciendo como base una función de transferencia particular para cada polígono y realizando un análisis de amenaza uniforme en cada punto de la ciudad, junto con el posterior suavizado y la corrección necesaria por espectro mínimo.

De esta manera, se calculó un espectro de diseño particular para puntos distanciados cada 100m en la ciudad, obteniendo así una grilla de puntos con respuesta calculada. Este tratamiento permite eliminar los problemas de contorno de zonas que presenta la normativa actual, y estableció la posibilidad de efectuar una interpolación entre puntos de zonas con diferentes funciones de transferencia, que se realizó siguiendo el procedimiento de Kriging [Golden Software, 2002].

5.5.2 Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño

Para efectos de definir los espectros de diseño en un predio específico de la ciudad que tenga en cuenta la metodología anterior, se ha desarrollado un sistema de visualización (SISBOG V 1.1) en el cual se han incluido los espectros interpolados, según lo explicado anteriormente, cada 50 m. El sistema indicará al usuario el espectro de diseño recomendado en cada punto de la ciudad, mediante la selección visual (o con coordenadas) del predio exacto a estudiar con ayuda de todo el sistema de visualización disponible. En el Capítulo 6 se explica en detalle el funcionamiento del sistema y el procedimiento para obtener los espectros de diseño en cualquier punto de la ciudad.

5.5.3 Mapa de Microzonificación sísmica

La metodología de microzonificación propuesta no establece como tal zonas homogéneas o sectores de igual comportamiento. Por esta razón, no se adopta como tal un mapa de microzonificación sísmica. Se tiene más bien un mapa de variación continua de espectros de respuesta de diseño en toda la ciudad. Para efectos de ilustración únicamente se presentan mapas de microzonificación sísmica con tendencias de variación en los espectros. La Figura 5.5 presenta en forma ilustrativa las variaciones en las formas espectrales de diseño para la ciudad.

Para efectos de ilustrar la variación continua en la forma de los espectros de un punto a otro, se ha seleccionado como factor de graficación en la Figura 5.5 la aceleración espectral correspondiente a un periodo estructural de $T=1.0$ seg en espectros con un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%. Se ha seleccionado este factor ya que se trata de las aceleraciones espectrales que mayor variación presentan geográficamente de punto a punto en comparación con las aceleraciones espectrales para otros periodos estructurales.

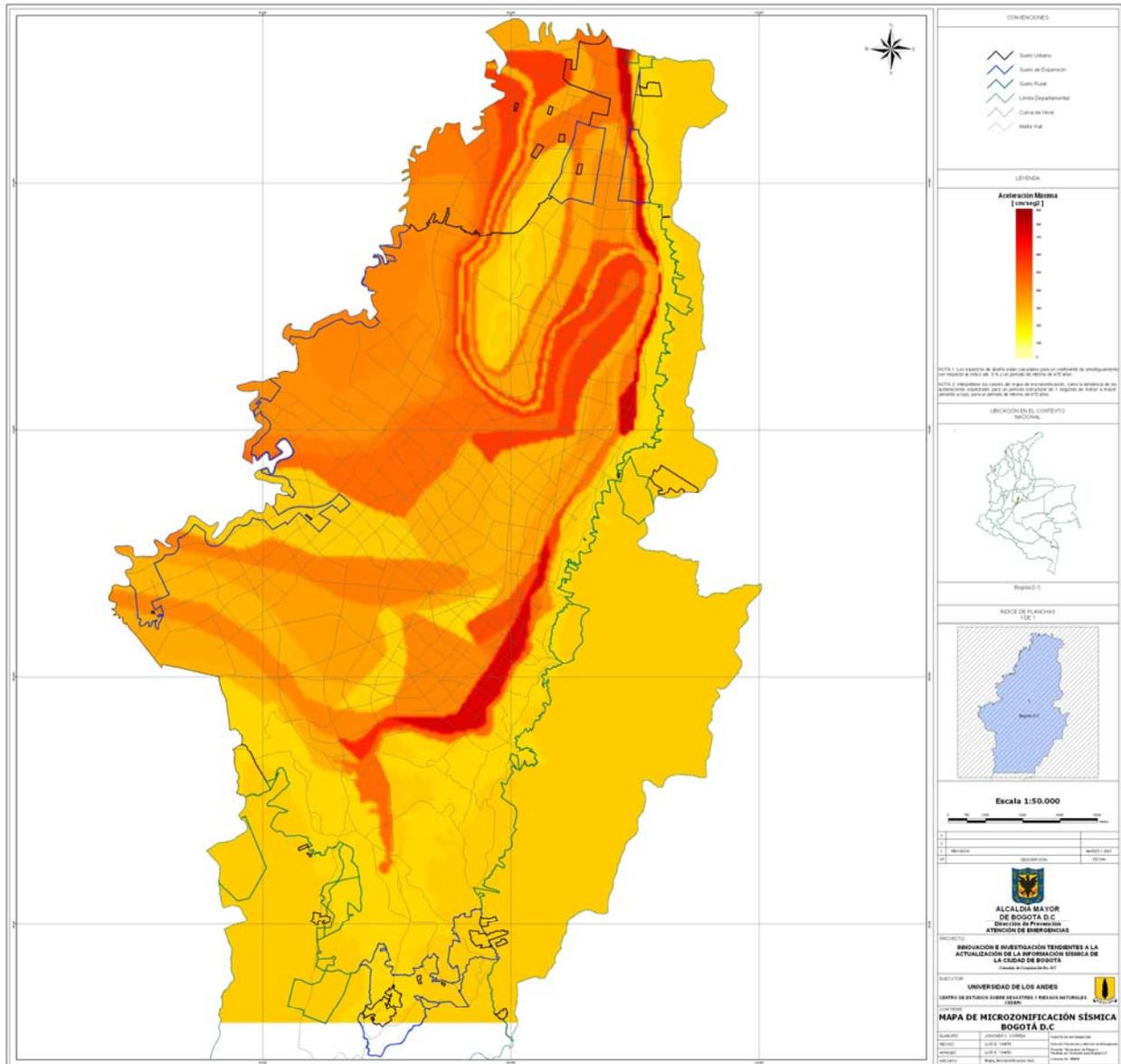


Figura 5.5 Mapa de variación de formas espectrales de diseño para Bogotá (aceleración espectral para T=1.0seg)

5.6 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS

En esta sección se presentan una serie de mapas de amenaza representativos para la ciudad de Bogotá, como resultado de los análisis de respuesta dinámica y zonificación sísmica. En las Figuras 5.6 a 5.22 se presentan los siguientes mapas de amenaza:

- Aceleración en superficie del terreno para $T_{ret}=475$ años
- Velocidad máxima del terreno para $T_{ret}=475$ años
- Desplazamiento máximo del terreno para $T_{ret}=475$ años.
- Juego de mapas de aceleración espectral en superficie del terreno para $T_{ret}=475$ años y para todos los periodos estructurales ($T=0.05, 0.1, 0.5, 0.3, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0$ y 5.0 segundos).
- Aceleración máxima en superficie del terreno para $T_{ret}=1000$ años.
- Aceleración máxima en superficie del terreno para $T_{ret}=2500$ años.

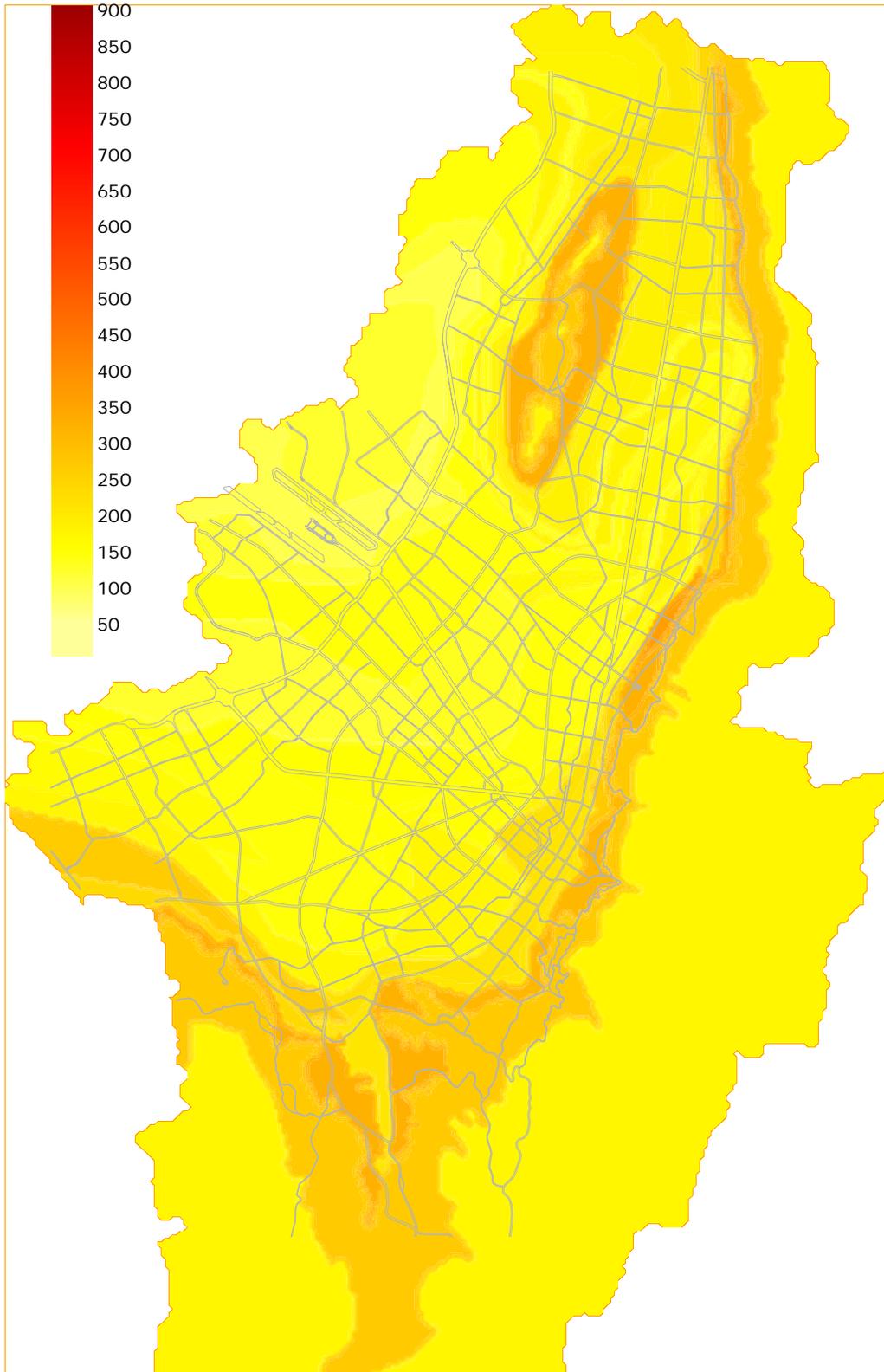


Figura 5.6 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 475$ años

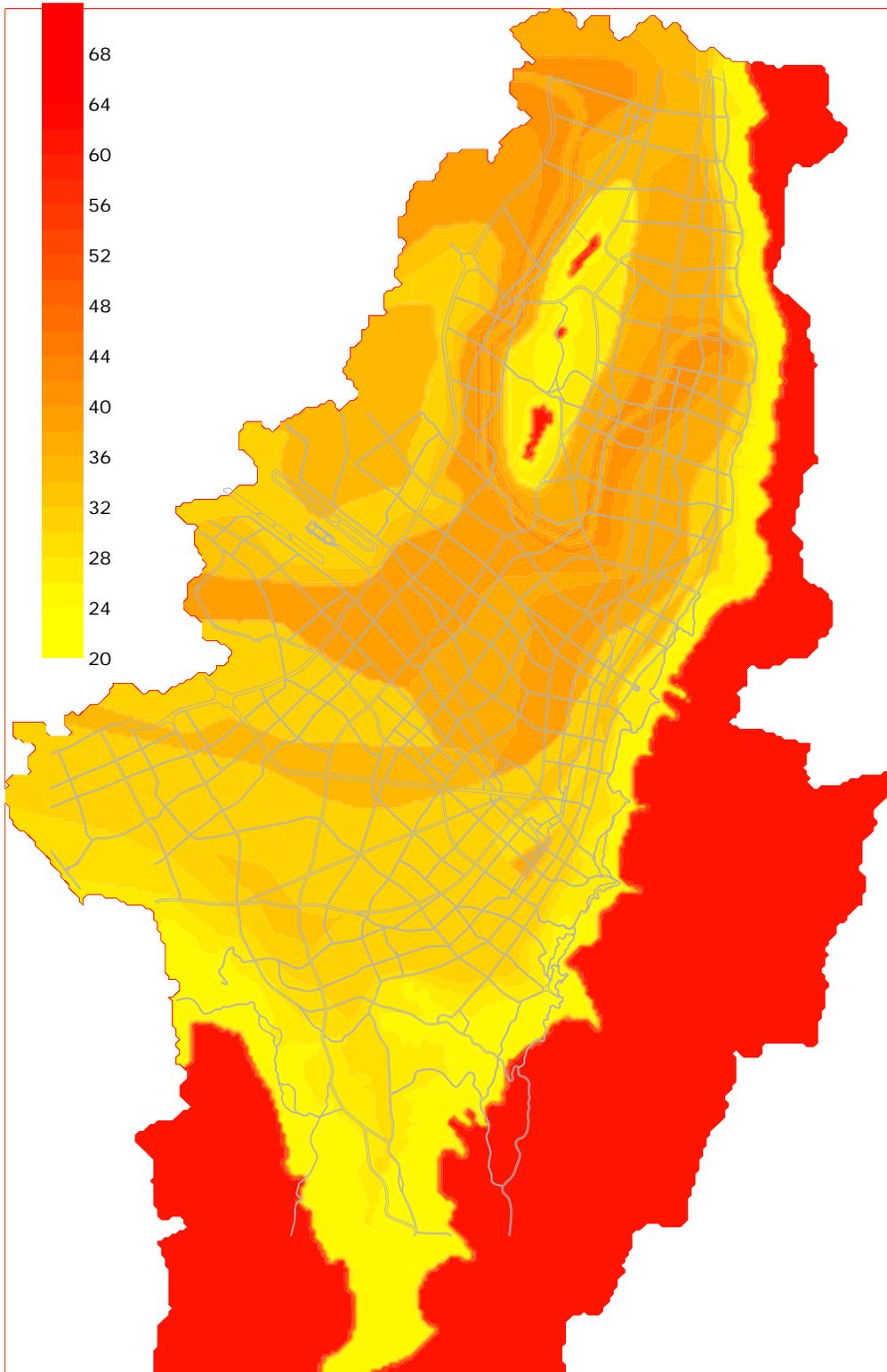


Figura 5.7 Velocidad máxima del terreno, $T_r = 475$ años

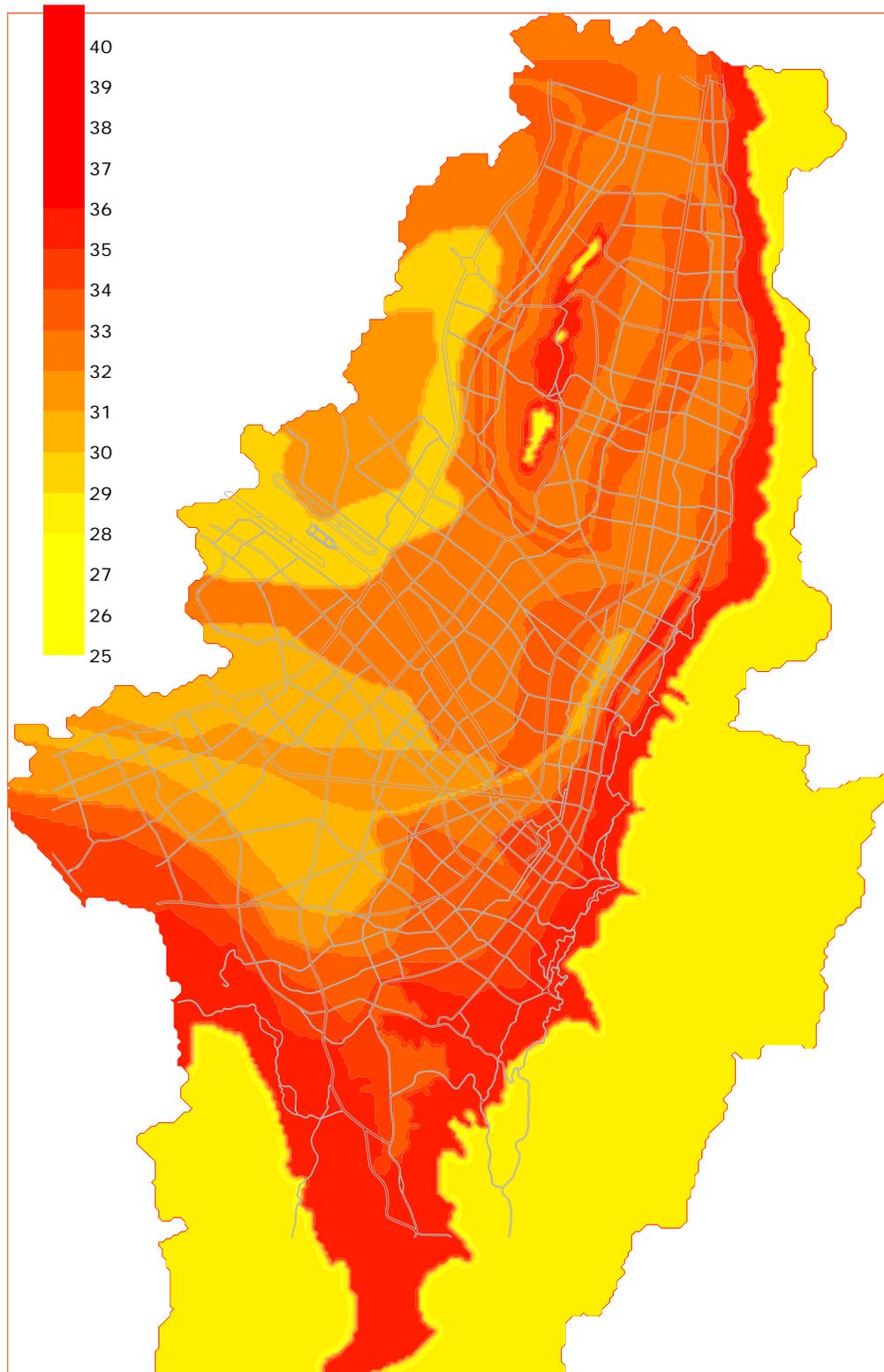


Figura 5.8 Desplazamiento máximo del terreno, $T_r = 475$ años

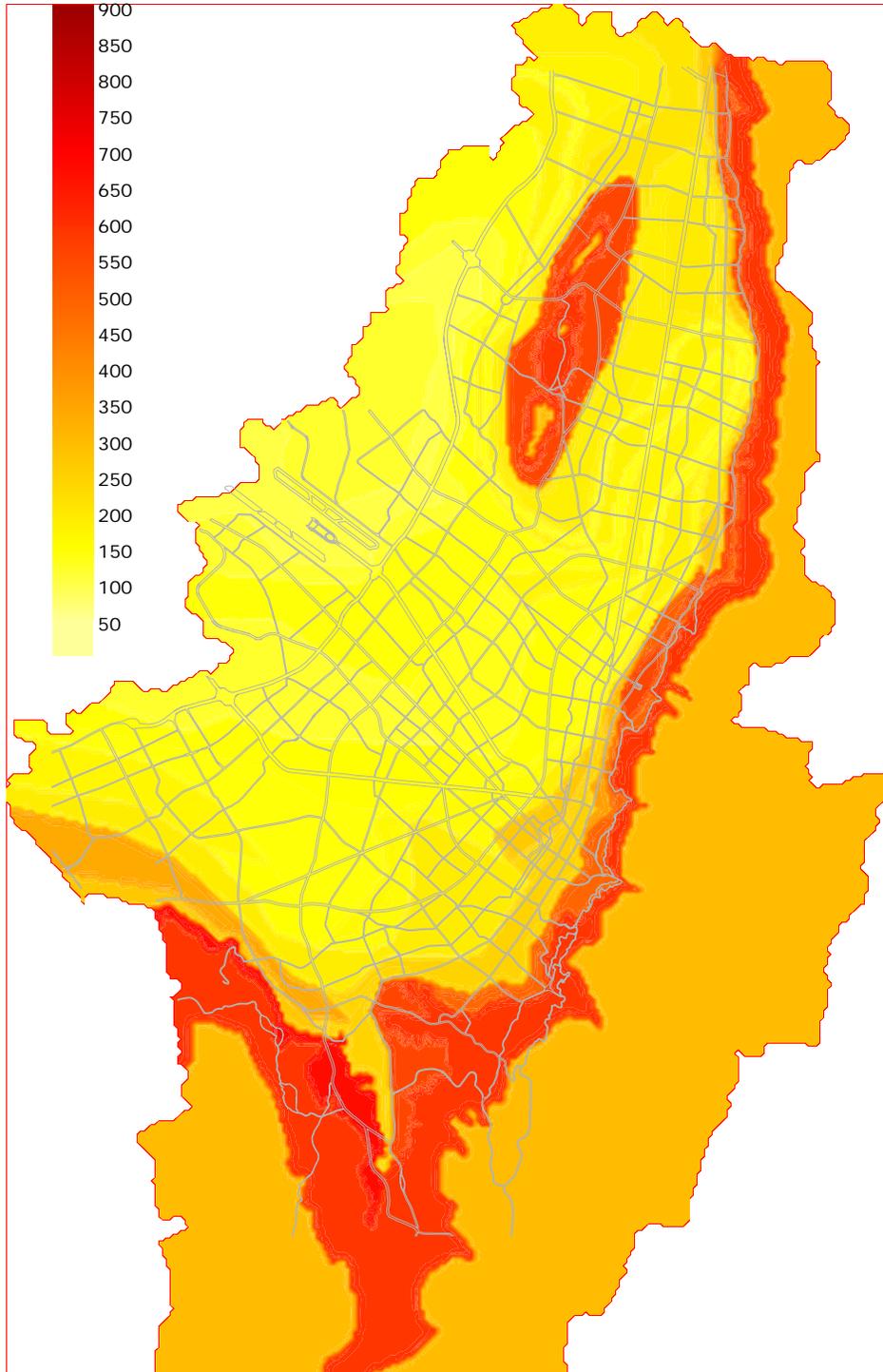


Figura 5.9 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.05 seg

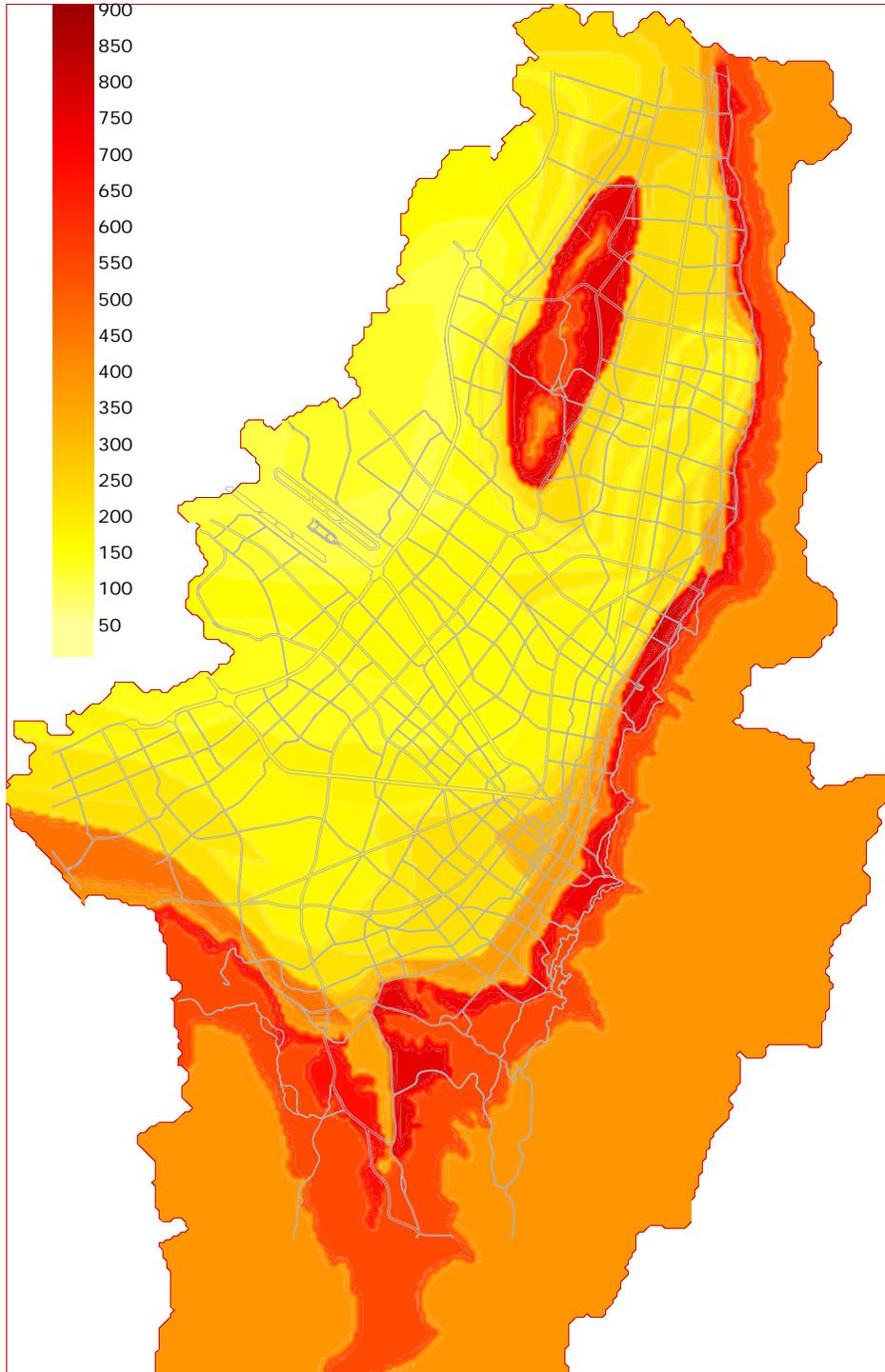


Figura 5.10 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 0.1 seg

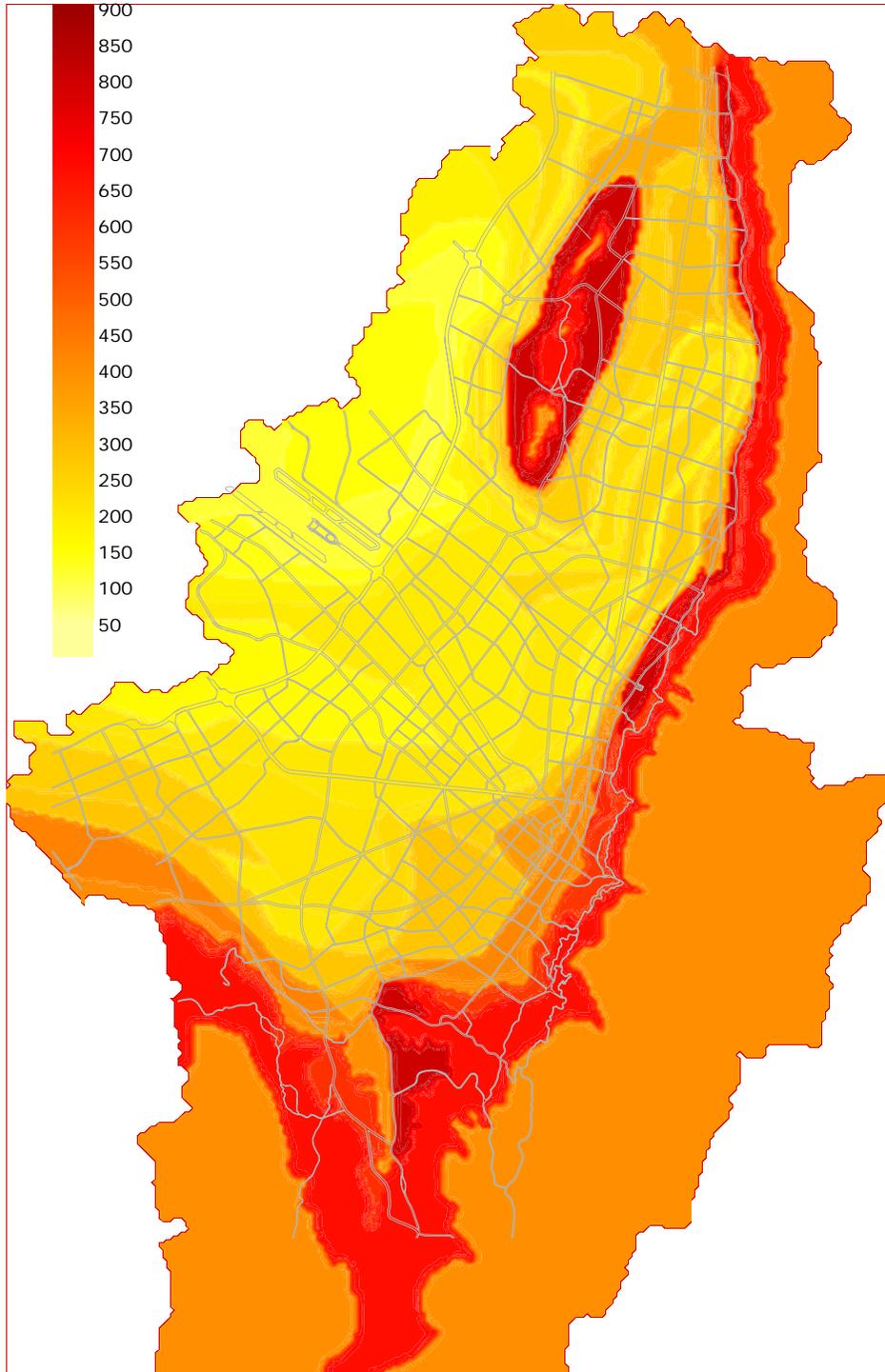


Figura 5.11 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.15 seg

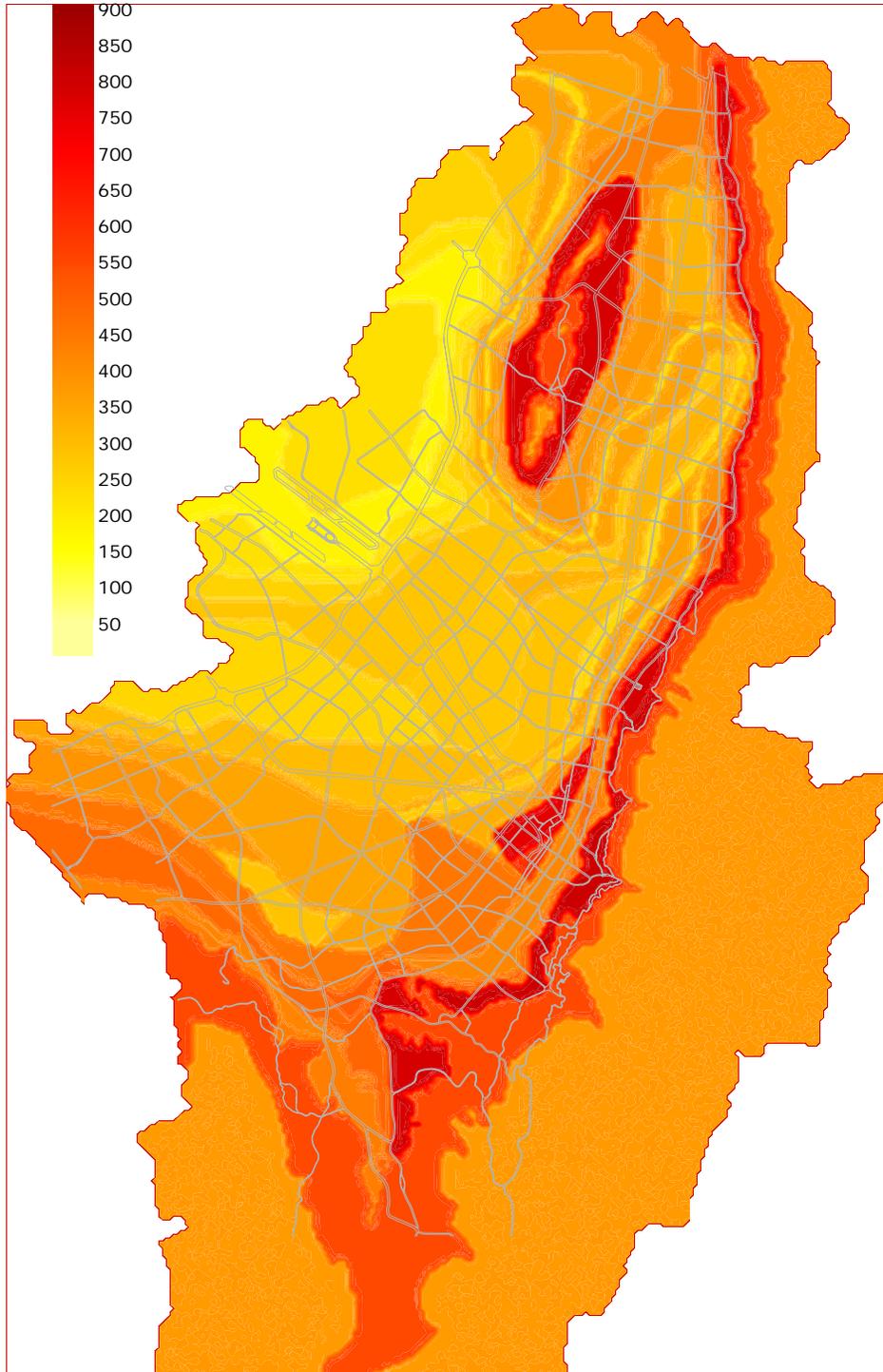


Figura 5.12 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.3 seg

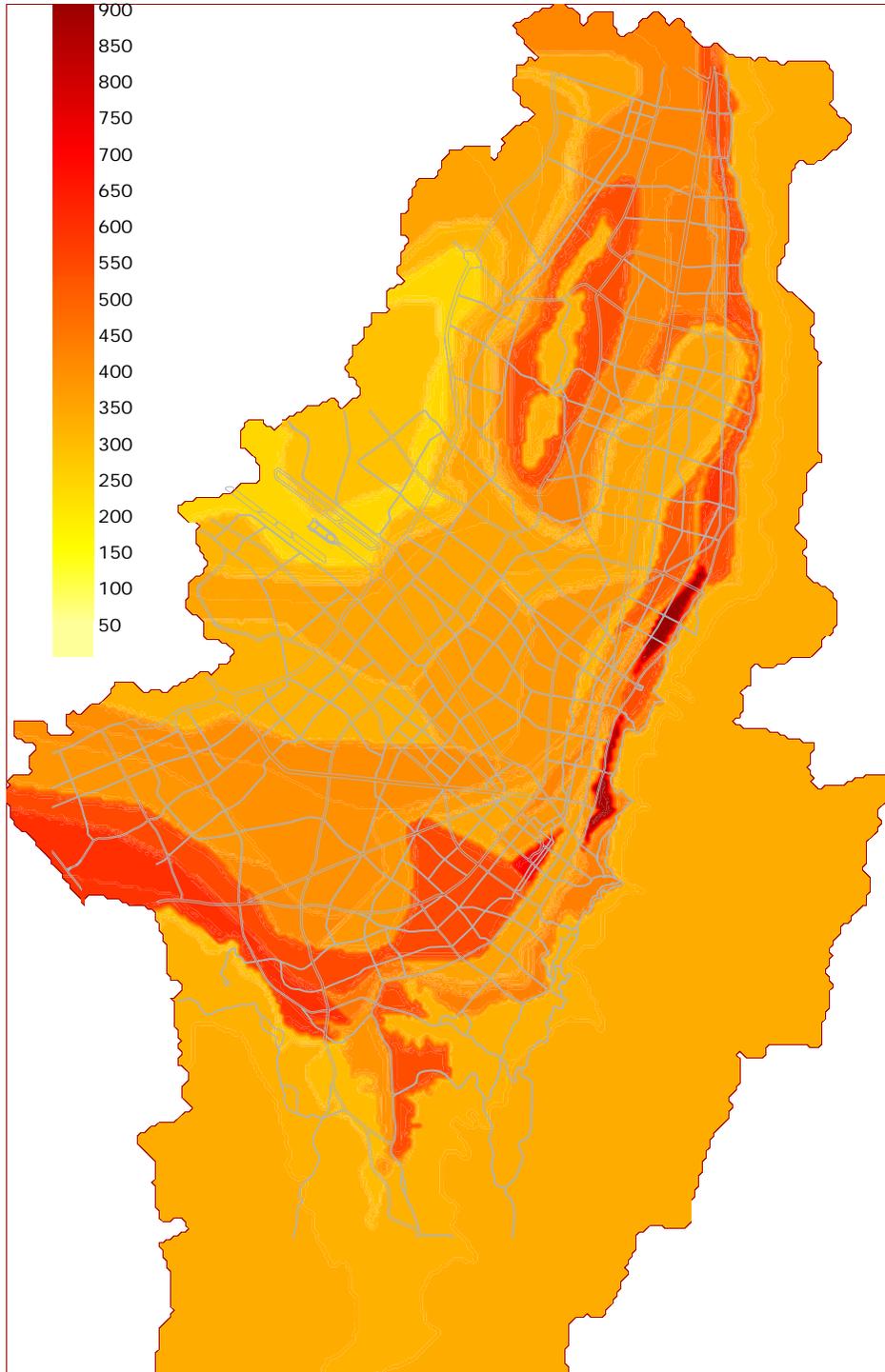


Figura 5.13 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 0.5 seg

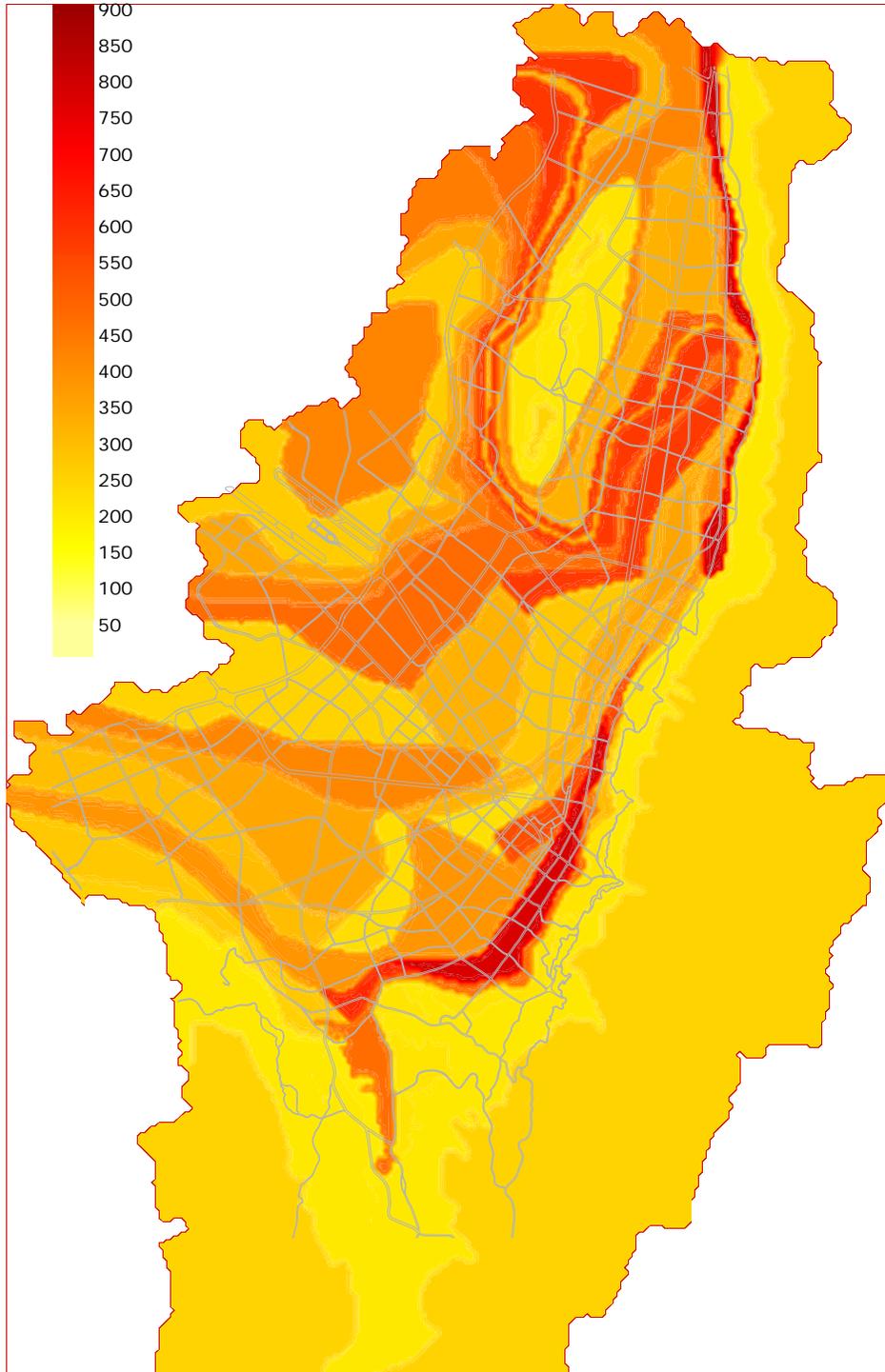


Figura 5.14 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 1.0 seg

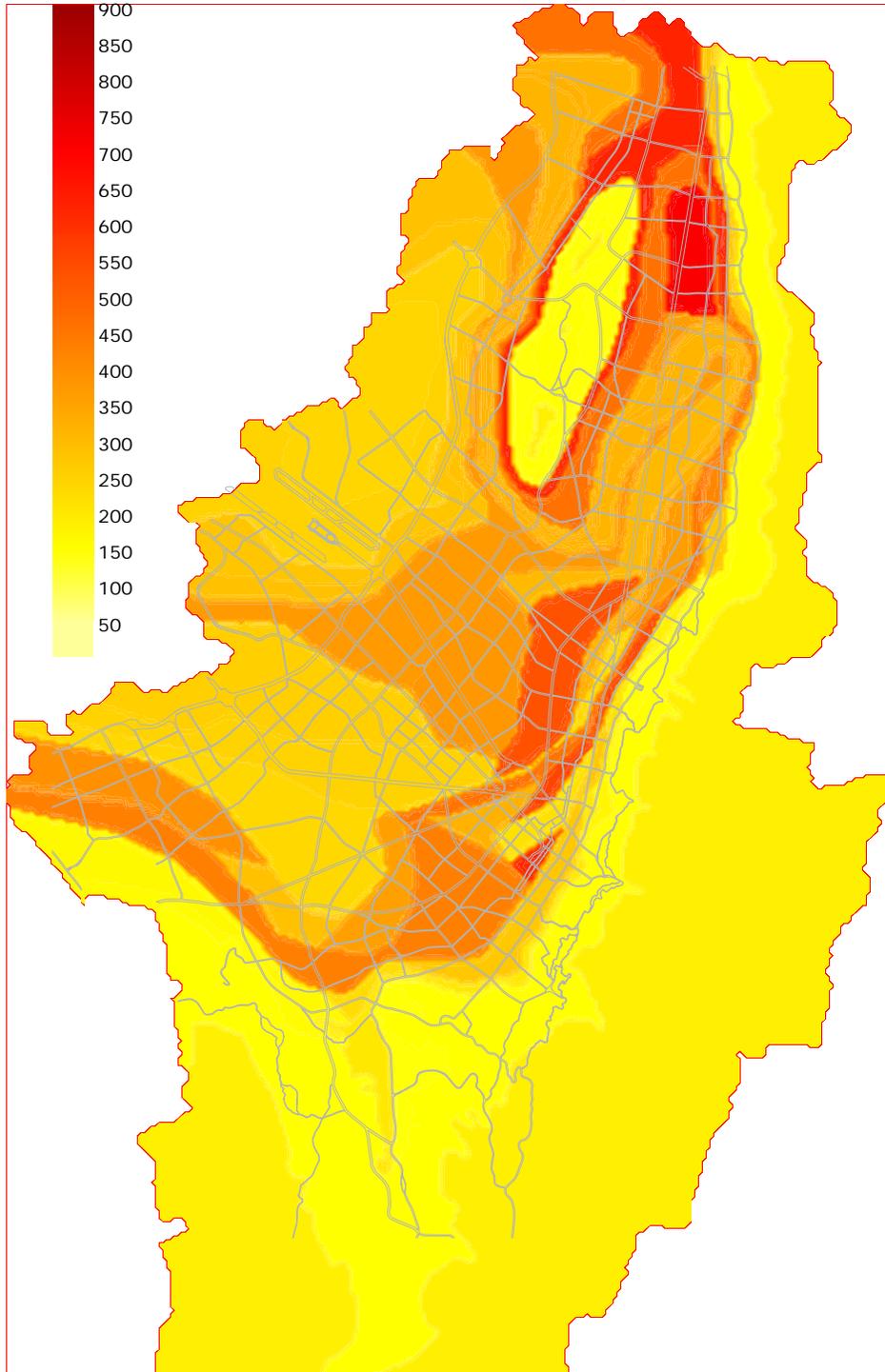


Figura 5.15 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 1.5 seg

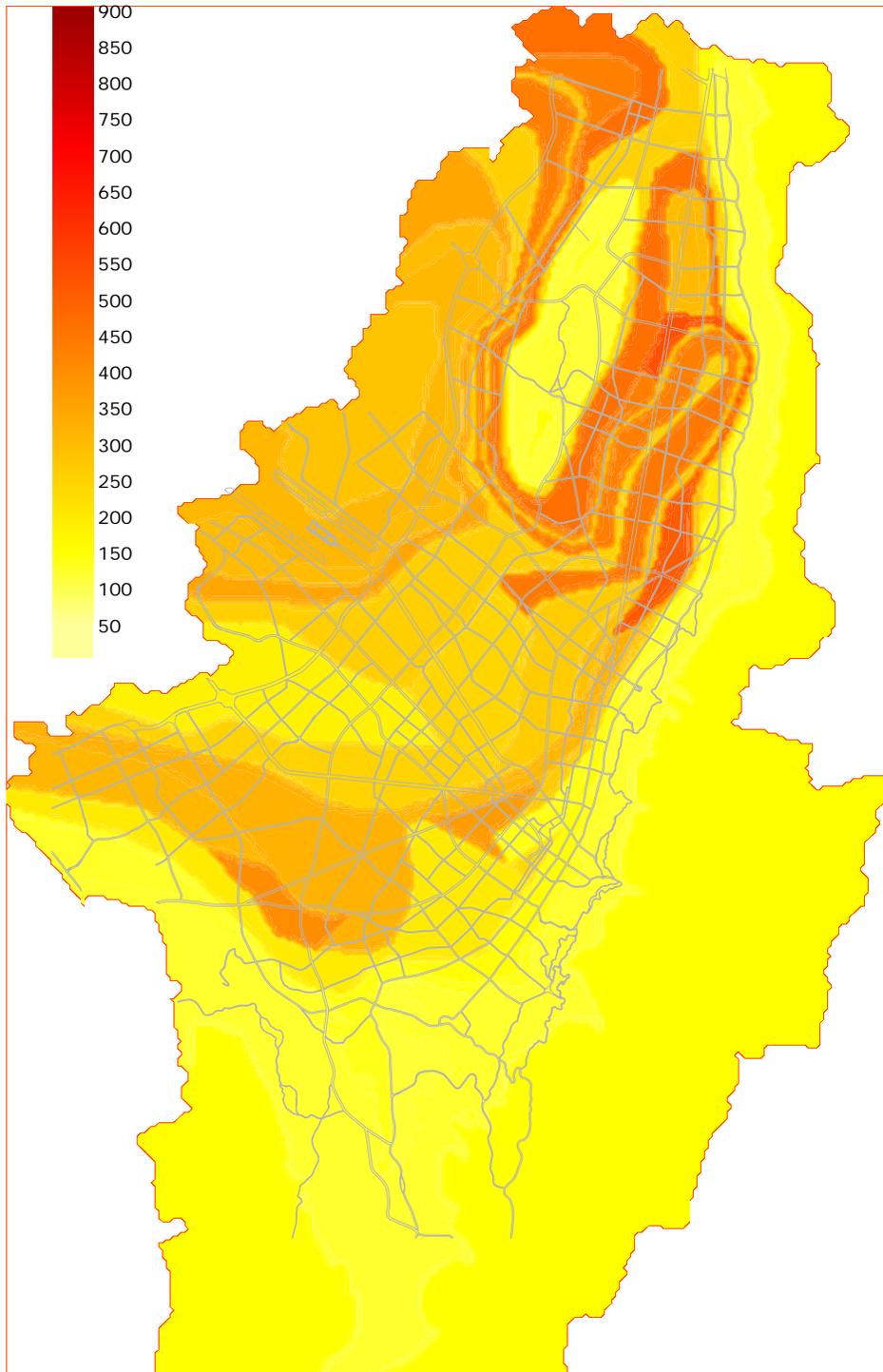


Figura 5.16 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 2.0 seg

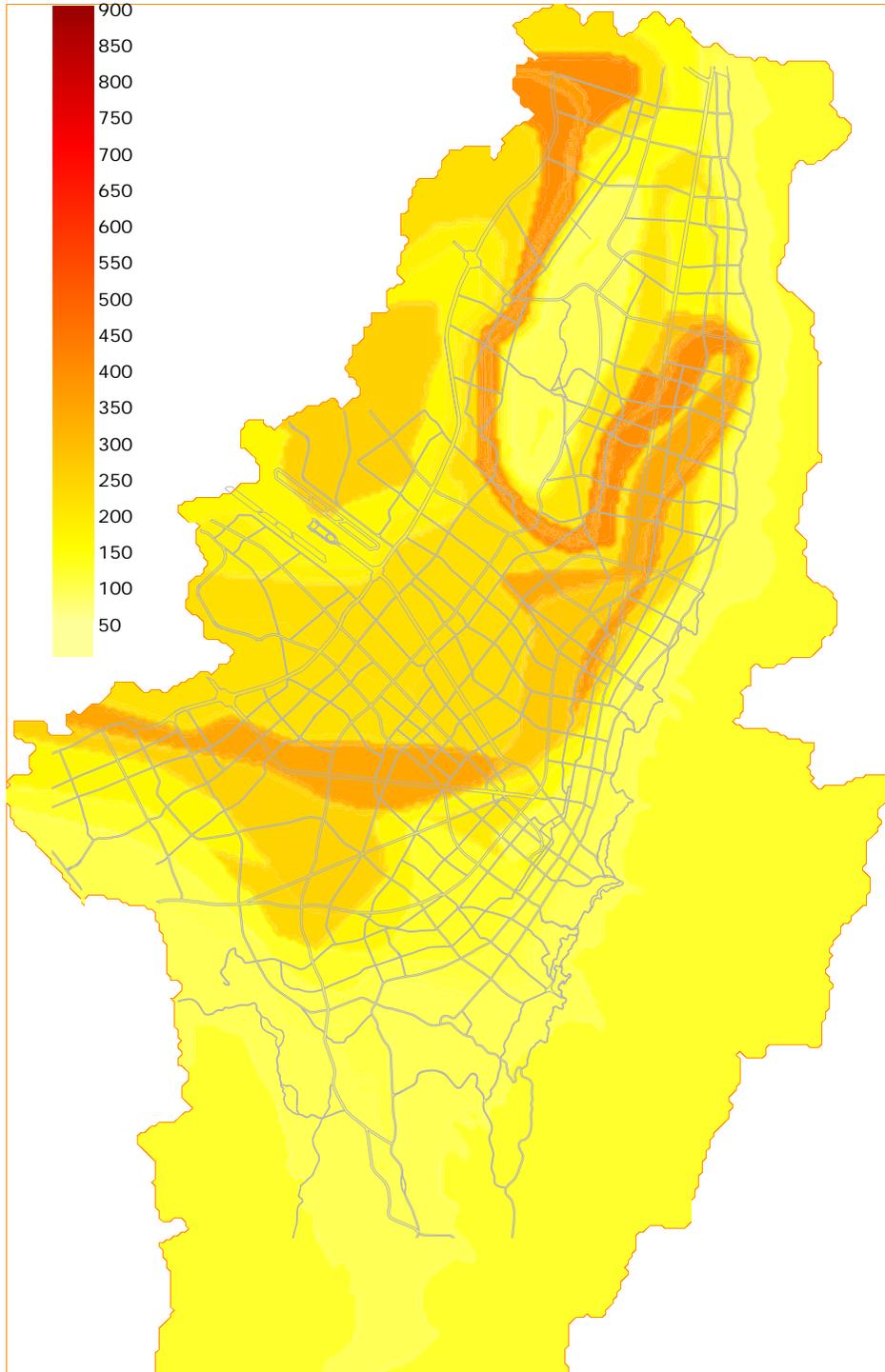


Figura 5.17 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 2.5 seg

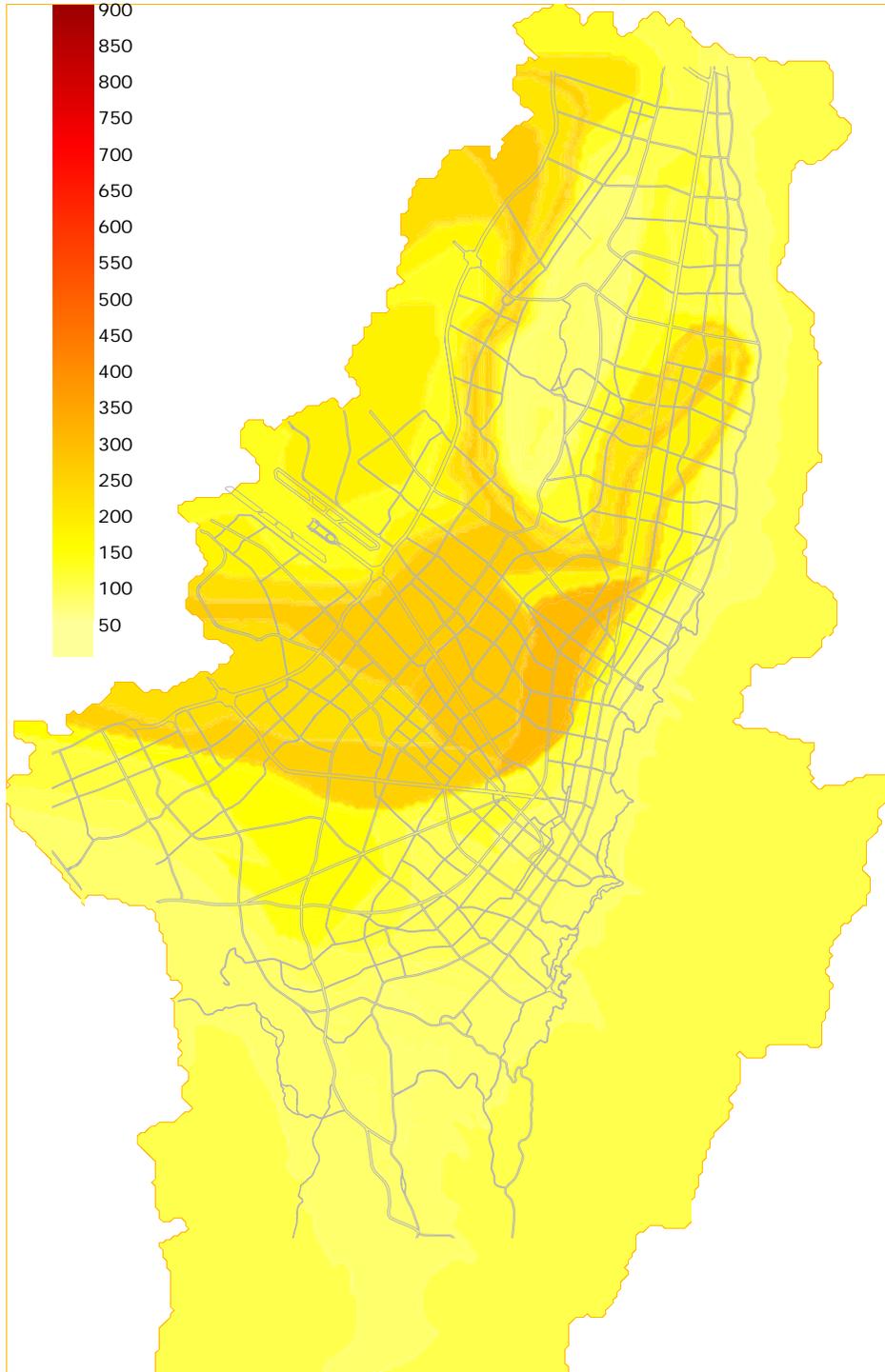


Figura 5.18 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 3.0 seg

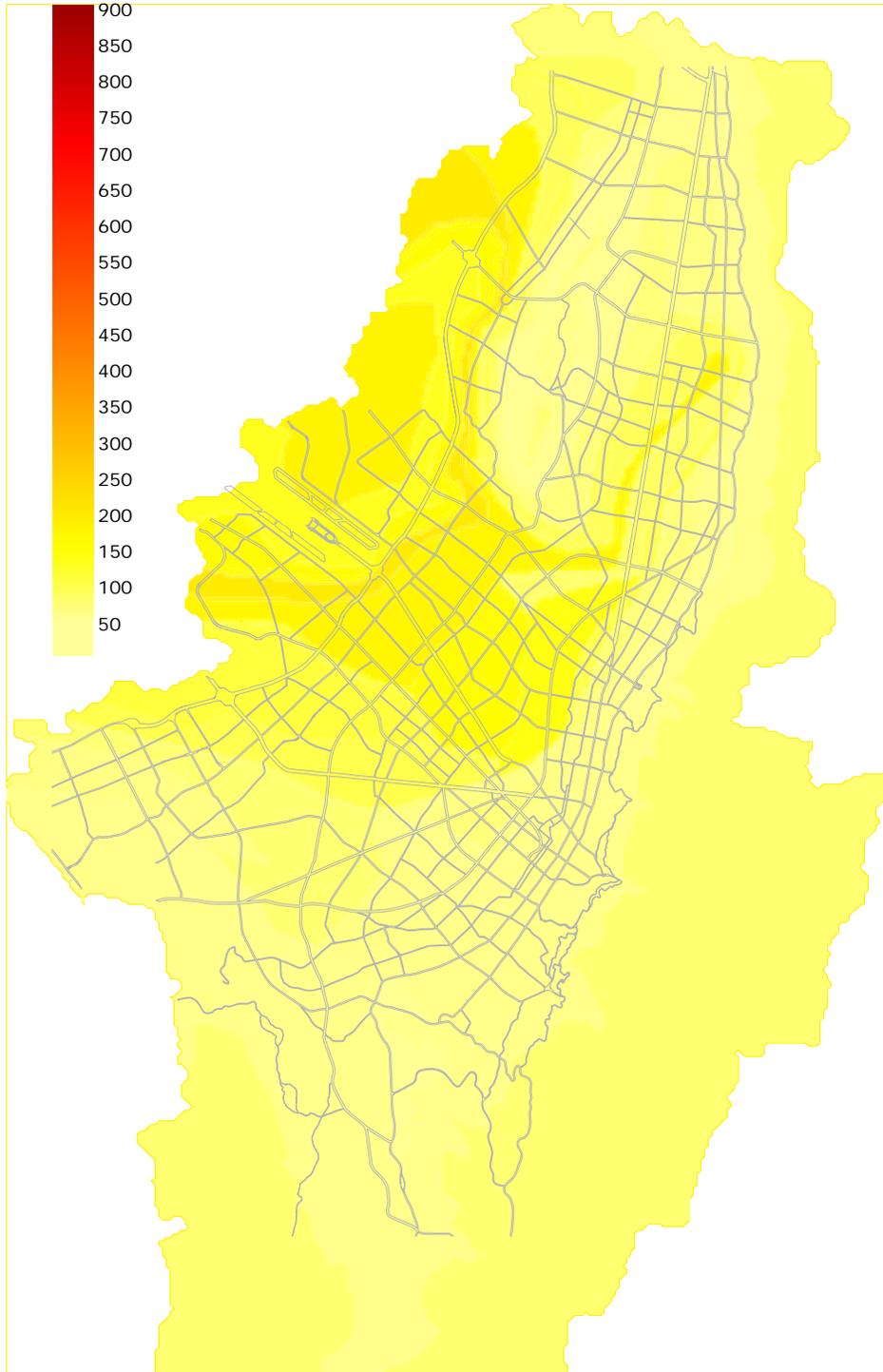


Figura 5.19 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 4.0 seg

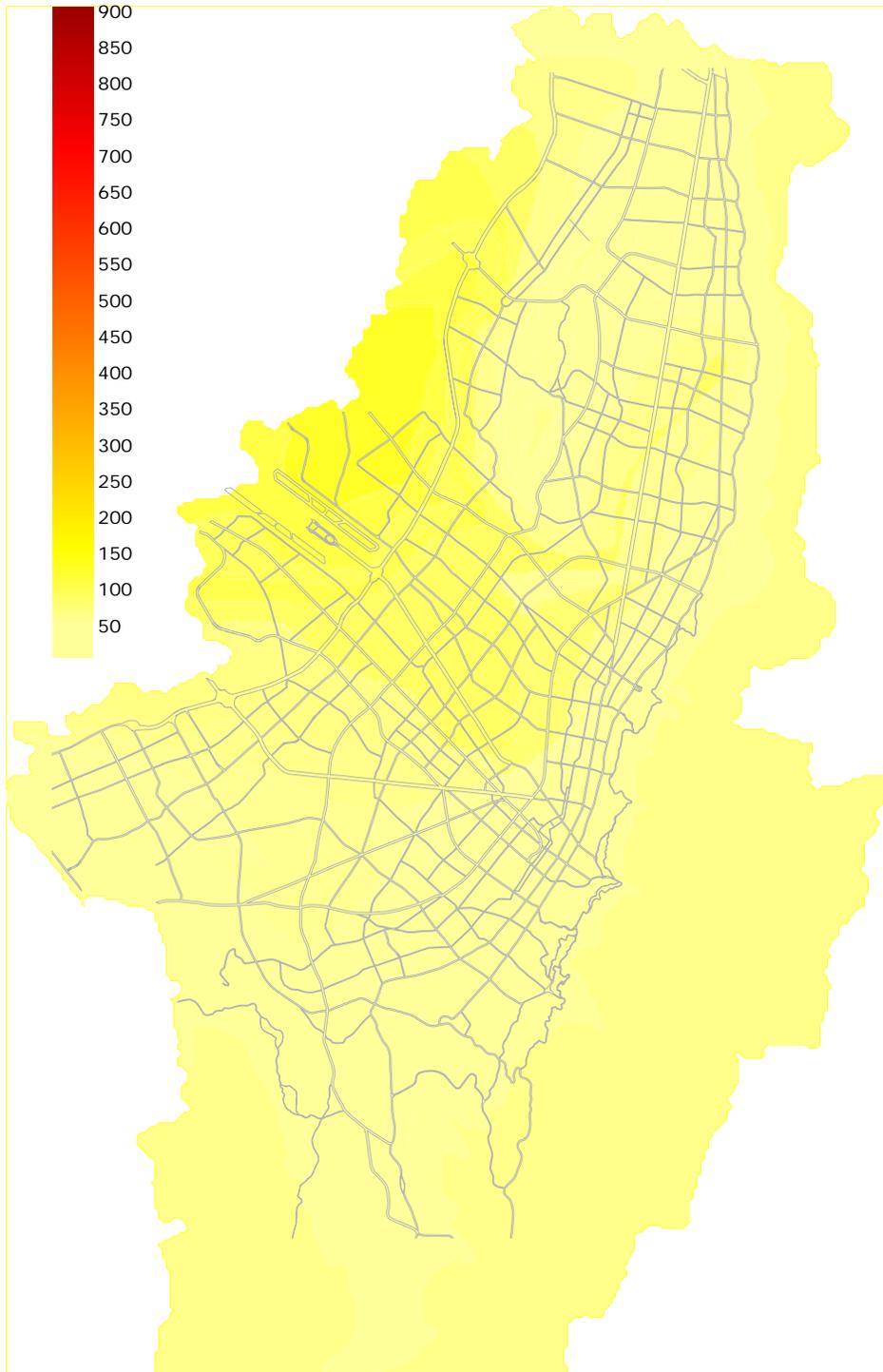


Figura 5.20 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r=475$ años, periodo estructural 5.0 seg

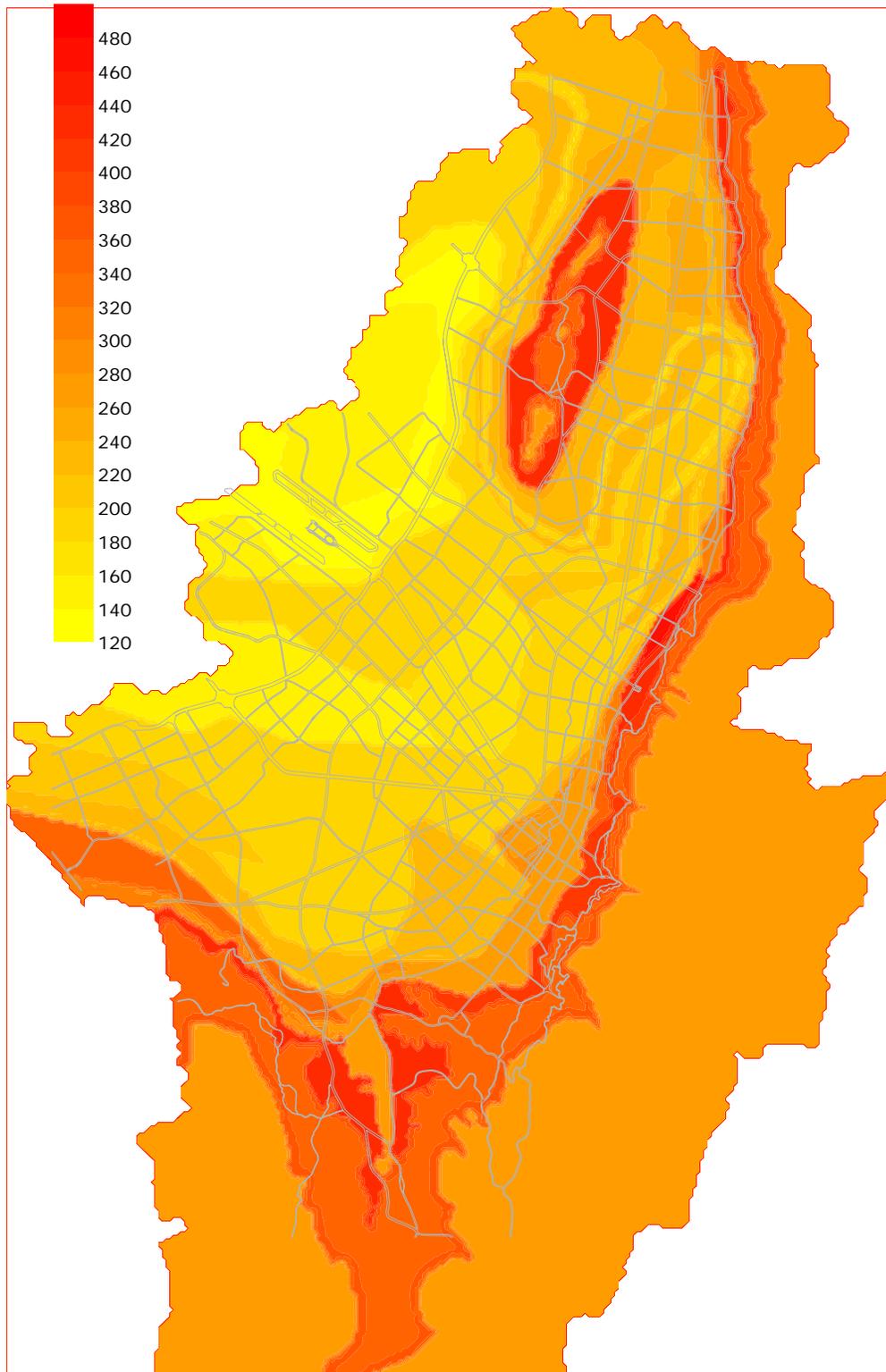


Figura 5.21 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 1000$ años

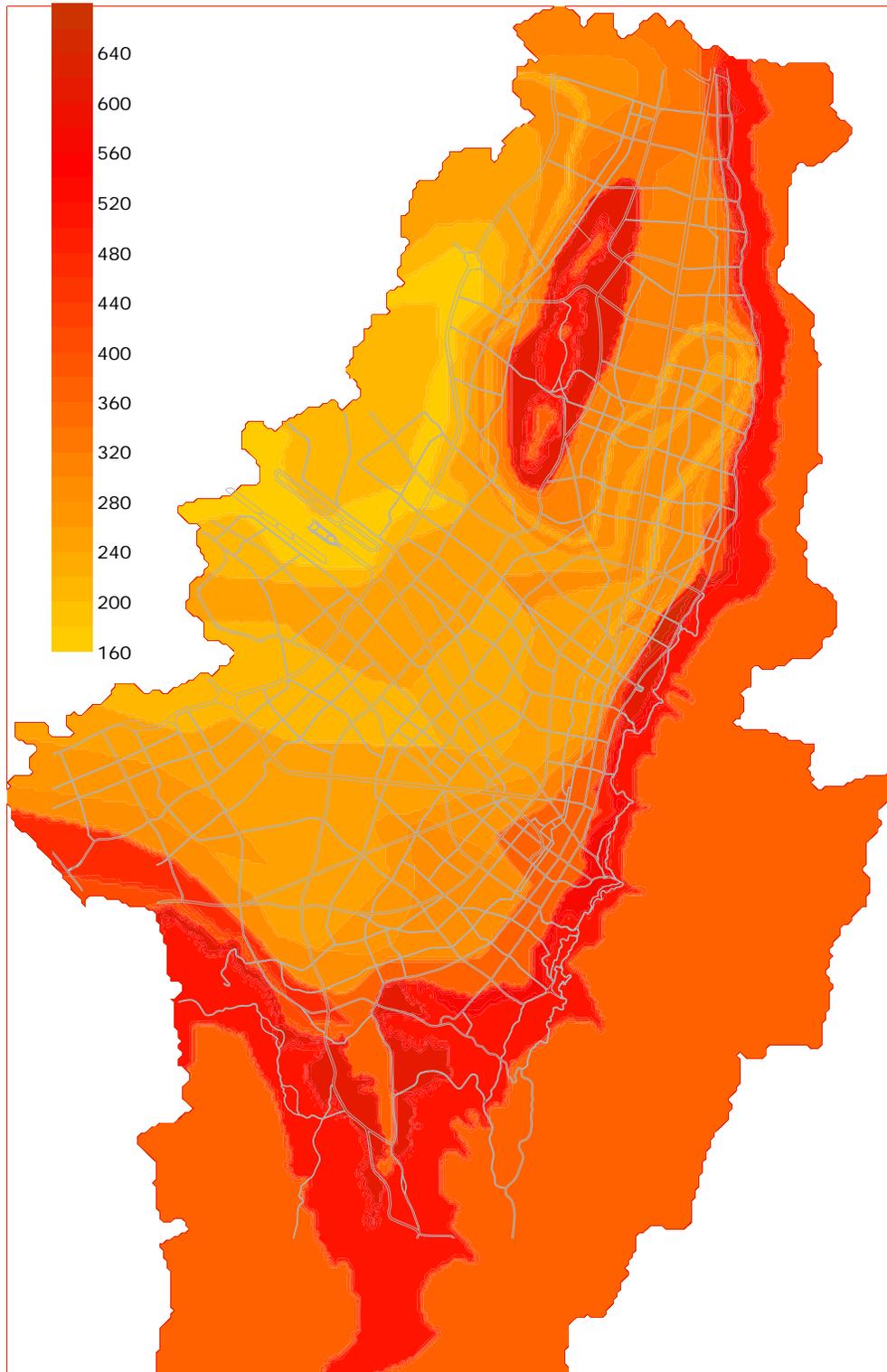


Figura 5.22 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 2500$ años

5.7 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

Con base en los resultados encontrados en el presente estudio se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales:

1. La calibración del modelo de comportamiento propuesto solo puede realizarse mediante el registro de una serie de eventos sísmicos que puedan ser registrados en las estaciones acelerográficas instaladas en diferentes puntos de la ciudad. Para una adecuada calibración se requiere además que los registros disponibles tengan amplitudes significativas ya que para señales de baja amplitud los ruidos locales no permiten una adecuada interpretación. Por otro lado se pretende calibrar el comportamiento en el rango inelástico de los suelos para lo cual se requieren de señales sísmicas significativas (en general señales que se clasifican como de movimientos fuertes).
2. Para efectos de conocer el comportamiento global de los diferentes depósitos característicos de la zona se recomienda la instalación de instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.
3. Otro aspecto que requiere mayor estudio es el de la caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse en el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. Además deben realizarse perforaciones adicionales en las diferentes zonas de la ciudad con el fin de confirmar la delimitación de cada una de ellas. Debe darse prioridad a los métodos de investigación de campo y a ensayos básicos como son la medición de la velocidad de onda de cortante en el sitio con métodos como el Down Hole o similares. En cuanto a la ubicación de posibles nuevos puntos de investigación deberá darse prioridad a las zonas de expansión de la ciudad y las zonas en que los puntos de control se encuentren más alejados.
4. Los aspectos de modelación bi y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo para poder ser aplicados al caso de Bogotá. La instrumentación resulta vital para conocer mejor las características de amplificación de diferentes depósitos y el comportamiento de los efectos topográficos.
5. Los efectos geométricos locales, asociados a la heterogeneidad de los depósitos de suelo o a cambios topográficos en superficie (como el caso de taludes o colinas) deben evaluarse en detalle para efectos de complementar la normativa de diseño. Para esto se recomienda igualmente adelantar una instrumentación básica que permita el dimensionamiento de estos efectos.
6. Con los resultados de este estudio, la ciudad puede emprender una serie de actividades complementarias tales alternativas de reducción y mitigación del riesgo en edificaciones (públicas y privadas), retención y transferencia del riesgo sísmico de la ciudad, evaluación del riesgo de los sistema de líneas vitales (energía, acueducto, alcantarillado, comunicaciones, gas y otros) y elaboración de los planes de contingencia respectivos y otros.

5.8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Aguilar, R., A. Arciniega, M. Ordaz, L.E. Pérez-Rocha, E. Reinoso, y F.J. Sánchez-Sesma. 1991. Respuesta sísmica del Valle de México: Aplicaciones y teoría, Informe final de actividades del Centro de Investigación Sísmica A.C. a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.

Alcaldía de Manizales & Universidad de los Andes. 1998. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales - Caldas, Universidad de los Andes, Marzo de 1998

Berg, Glen V. 1982. Seismic Design Codes and Procedures. Earthquake Engineering research Institute.

Chopra Anil. K. 1982. Dynamics of Structures. Earthquake Engineering Research Institute.

Corporación Autónoma Regional del Quindío, CRQ. 1997. Microzonificación Sísmica Preliminar de la Ciudad de Armenia - Quindío", Universidad de los Andes, Julio de 1997

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDES, 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.

Decreto 193 del 08 de Junio de 2006. "Por el cual se complementa y modifica el Código de construcción de Bogotá D. C., se adoptan los espectros de diseño y las determinantes de la Microzonificación Sísmica".

García L. E. 1996. Dinámica Estructural y Diseño Sismorresistente. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

Golden Software. 2002. SURFER, Surface Mapping System Version 8.00, February 2002.

Housner G.W & Jennings P.C. 1982. Earthquake Design Criteria. Earthquake. Engineering research Institute.

Hudson D.E. 1982. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering research Institute.

INGEOMINAS & Universidad de los Andes. 1992. Microzonificación Sísmogeotectónica de Popayán.

INGEOMINAS. 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico-Científico.".

Meli, R. 1986. Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la Ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), *Informe Interno DE/ESTV2/ 1*, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Meli, R. & Avila, J. 1988. Analysis of building response, Earthquake Spectra, 5, 1-18.

Miranda E. 1991. Seismic and Upgrading of existing structures. Tesis Doctoral. Universidad de California en Berkeley- Berkeley, CALIFORNIA, Estados Unidos de América

National Earthquake Hazards Reduction Program. 1994. Recommended provisions for seismic regulation for building”. Part 1 and 2. 1994 Edition.

Newmark N.M. & Hall W.J. 1982. Earthquake Spectral and Design. Earthquake Engineering Research Institute.

Ordaz, M, Reinoso E. y Pérez Rocha L. E. 1996. Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos, Ingeniería Sísmica, (53) 25-35.

Ordaz M. & Perez-Rocha L. E. 1998. Estimation fo strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach, Earthquake Engineering Structural Dynamics 27 – 99-901.

República de Colombia. 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997. Decreto 33 de 1998.

Rosas H. & Ruiz, S (1990), Factor de amplificación de la respuesta de estructuras con resistencia asimétrica, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 39, pp. 15-26

Sarría A. 1996. Ingeniería Sísmica. Ediciones UNIANDES.

Seed H. B, Idriss & I.M Lysmer. 1982. Ground motions and soil liquefaction during Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.

Universidad de los Andes & INGEOMINAS.1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá.

Universidad de los Andes. 2002. Microzonificación Sísmica de la ciudad de Manizales.

Veletsos A. S. & Newmark N. M. 1960. Effect of inelastic behavior on the response of simple system to earthquake motion. Proceedings of second world conference on earthquake engineering 895 – 912.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 5	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO	5-1
5.1	INTRODUCCIÓN	5-1
5.2	ZONIFICACIÓN EMPLEADA PARA AMENAZA EN SUPERFICIE	5-3
5.2.1	Generalidades	5-3
5.2.2	Selección de puntos de control	5-3
5.3	SUAVIZADO DE ESPECTROS	5-6
5.3.1	Proceso de suavizado	5-6
5.4	ESPECTROS DE DISEÑO	5-7
5.5	MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA	5-13
5.5.1	Generalidades	5-13
5.5.2	Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño	5-13
5.5.3	Mapa de Microzonificación sísmica	5-13
5.6	MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS	5-15
5.7	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS	5-33
5.8	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	5-34

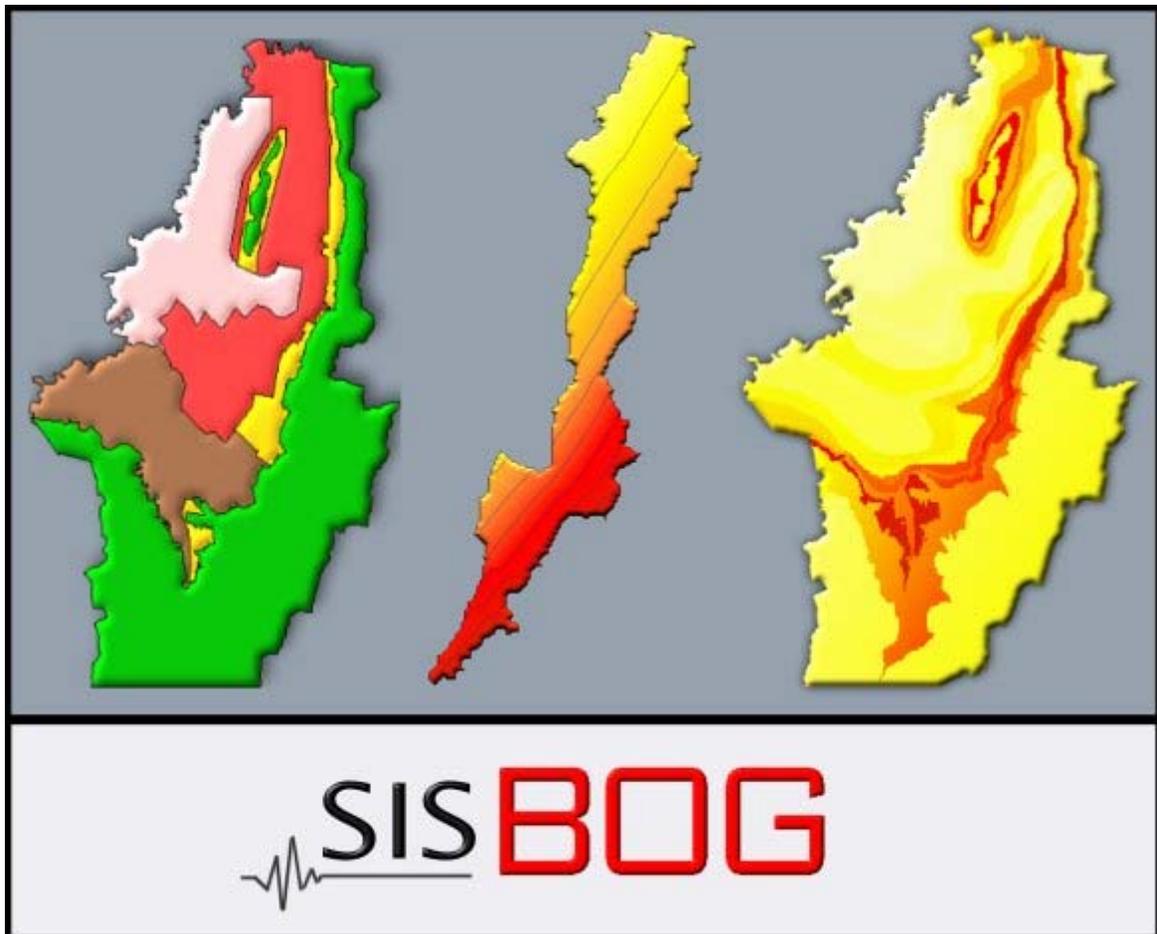
LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Mapa de polígonos y puntos de control utilizados como base para la microzonificación sísmica	5-5
Figura 5.2 Coeficientes espectrales del espectro mínimo de depósitos lacustres profundos	5-8
Figura 5.3 Coeficientes espectrales del espectro mínimo. Roca NSR-98	5-8
Figura 5.4 Espectros de diseño para puntos de control.....	5-9
Figura 5.5 Mapa de variación de formas espectrales de diseño para Bogotá (aceleración espectral para $T=1.0\text{seg}$)	5-14
Figura 5.6 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 475$ años.....	5-16
Figura 5.7 Velocidad máxima del terreno, $T_r = 475$ años	5-17
Figura 5.8 Desplazamiento máximo del terreno, $T_r = 475$ años	5-18
Figura 5.9 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.05 seg	5-19
Figura 5.10 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.1 seg	5-20
Figura 5.11 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.15 seg.....	5-21
Figura 5.12 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.3 seg	5-22
Figura 5.13 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.5 seg	5-23
Figura 5.14 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.0 seg	5-24
Figura 5.15 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.5 seg	5-25
Figura 5.16 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 2.0 seg	5-26
Figura 5.17 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 2.5 seg	5-27
Figura 5.18 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 3.0 seg	5-28
Figura 5.19 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 4.0 seg	5-29
Figura 5.20 Aceleración espectral en superficie del terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 5.0 seg	5-30
Figura 5.21 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 1000$ años	5-31
Figura 5.22 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 2500$ años	5-32

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1. Puntos de control seleccionados..... 5-4

SISTEMA DE INFORMACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ – SISBOG V1.0



CAPÍTULO 6 SISTEMA DE INFORMACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ – SISBOG V1.0

6.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales productos del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá es el sistema de información sísmica de Bogotá **SISBOG V1.0**. Se trata de sistema de cómputo general para el manejo de la información sísmica en la ciudad.

Las funciones principales del sistema son:

- a) Visualización de toda la información básica e información sísmica del distrito
- b) Análisis de escenarios disponibles de amenaza sísmica para nuevos proyectos de desarrollo
- c) Generación automática de espectros de diseño de acuerdo con los parámetros de la NSR-98 en las áreas urbanas del distrito.

El sistema maneja principalmente la siguiente información:

- a) Información básica catastral que incluye predios, ríos, barrios, comunas, curvas de nivel, distribución de predios e información catastral adicional.
- b) Información de amenaza sísmica que incluye mapas en la superficie del terreno (para el área urbana del distrito) para la totalidad de las fuentes, calculados para varios periodos de retorno (100, 200, 475 o 1000 años) en términos de aceleración, velocidad máxima o desplazamiento máximo, y para distintas ordenadas espectrales (0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.30, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 y 5.00 seg.).
- c) Información de espectros de amenaza obtenidos mediante la ubicación geográfica del punto de interés. Es posible obtener un espectro de aceleración (cm/seg^2) para cada uno de los periodos de retorno calculados (200, 475, 1000 o 2500 años) además de los espectros equivalentes de pseudo-velocidad (cm/s) o desplazamiento (cm).

El sistema de información sísmica **SISBOG V1.0** se convierte en una plataforma general para el manejo de toda la información del distrito. Desarrollos futuros permitirían convertir el sistema en un sistema general de gestión de riesgo incluyendo además de riesgo sísmico, el riesgo de inundaciones, de avalanchas, de deslizamientos y otros riesgos de tipo antrópico (incendios, explosiones, contaminación y otros).

El sistema podría también aplicarse en el futuro para permitir la actualización y cálculo automático del riesgo en todas las componentes mencionadas. La alcaldía mayor de Bogotá D.C. tiene el reto de mantener actualizada la información del sistema, adelantar actualizaciones y complementaciones del mismo con miras a conformar una excelente herramienta para la gestión general de riesgos en la región.

6.2 REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN

6.2.1 Requerimientos de Hardware

Los requerimientos de hardware mínimos para la instalación de **SISBOG V1.0**, son los siguientes:

- Computador PC o compatible con un procesador Pentium III (o Superior) y velocidad del procesador superior a 1.5 GHz.
- Sistemas operativos: Microsoft® Windows 2000™ o XP™
- Una capacidad libre en disco duro de 250 Mb o Superior.
- 256 MB de Memoria Extendida (RAM).
- Unidad de CD-ROM o Disquete (De acuerdo a la forma en que se encuentren los instaladores)

Para asegurar un correcto funcionamiento del sistema, con alta velocidad de procesamiento y visualización, se recomienda que el computador donde se va instalar cumpla con los siguientes requerimientos de hardware:

- Computador PC o compatible con un procesador Pentium IV y velocidad del procesador de 2.0 GHz.
- Sistema operativo: Microsoft® Windows XP™
- Una capacidad libre en disco duro de 500 Mb.
- 512 MB de Memoria Extendida (RAM).
- Tarjeta de video 32Mb.

6.2.2 Proceso de instalación

Para la instalación del software, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Inicie Windows™ introduzca el CD en la unidad D. (Donde la letra D corresponde al nombre de la unidad de CD, disponible en su computador)
2. Entre al Explorador de Windows™ y seleccione la unidad correspondiente donde se encuentre los instaladores (Unidad D), luego entre a la Carpeta Instaladores.
3. Ejecute el programa **setup.exe** de esta unidad, con este comando se inicia el programa de instalación. Este programa es un instalador secuencial el cual instala los requerimientos de software que necesita **SISBOG V1.0** para ejecutar. Estos requerimientos de software son: Microsoft® FrameWork® V1.0 y el paquete de idiomas de Microsoft® FrameWork®.
4. Una vez se ha instalado los requerimientos de software para el **SISBOG V1.0** se inicia la instalación del software como tal, por ello siga cuidadosamente cada uno de los pasos que el asistente de instalación le indique.

6.2.3 Iniciando y finalizando SISBOG V1.0

Haga clic sobre *Inicio/Programas/SISBOG* del menú Inicio para dar inicio al software. El programa de instalación crea automáticamente un acceso directo en el escritorio de su computador, desde el cual puede iniciar también **SISBOG V1.0**.

Para finalizar la aplicación se puede utilizar cualquiera de los métodos estándar que posee Windows® para finalizar aplicaciones (ejemplo: Alt+F4, clic sobre la X de la barra del programa, etc.) o en el menú *Archivo/Salir*. Antes de iniciar el proceso de finalización de la aplicación el software revisa si se han hecho modificaciones a la configuración del mismo y procede a preguntar al usuario si desea guardar los cambios realizados. Si se hace clic sobre el botón *Aceptar*, los cambios serán almacenados en la configuración por defecto y la próxima vez que se inicie el software iniciara con esta configuración. Si el usuario desea retornar a la configuración por defecto del sistema tiene que accionar el comando *Archivo/Conf. por defecto* en el menú del programa.

Cuando se inicia el programa, el sistema muestra una ventana de bienvenida, la cual contiene una barra de progreso que indica el nivel de carga de datos. Es importante estar atento al avance de esta barra debido a que el proceso de carga, dependiendo del hardware y sistema operativo disponible, puede tardar entre algunos segundos a varios minutos.

6.3 INTERFASE DEL USUARIO Y COMANDOS GRÁFICOS

6.3.1 Descripción general

La pantalla principal de **SISBOG V1.0** esta compuesta por cuatro áreas: área de herramientas y menús, área de presentación geográfica y tabla de datos; área de selección, control de visualización y cálculo, y el área de barra de estado y mensajes de procesamiento (ver Figura 6.1, las áreas respectivas resaltadas por marcadores en rojo, verde, amarillo y azul).

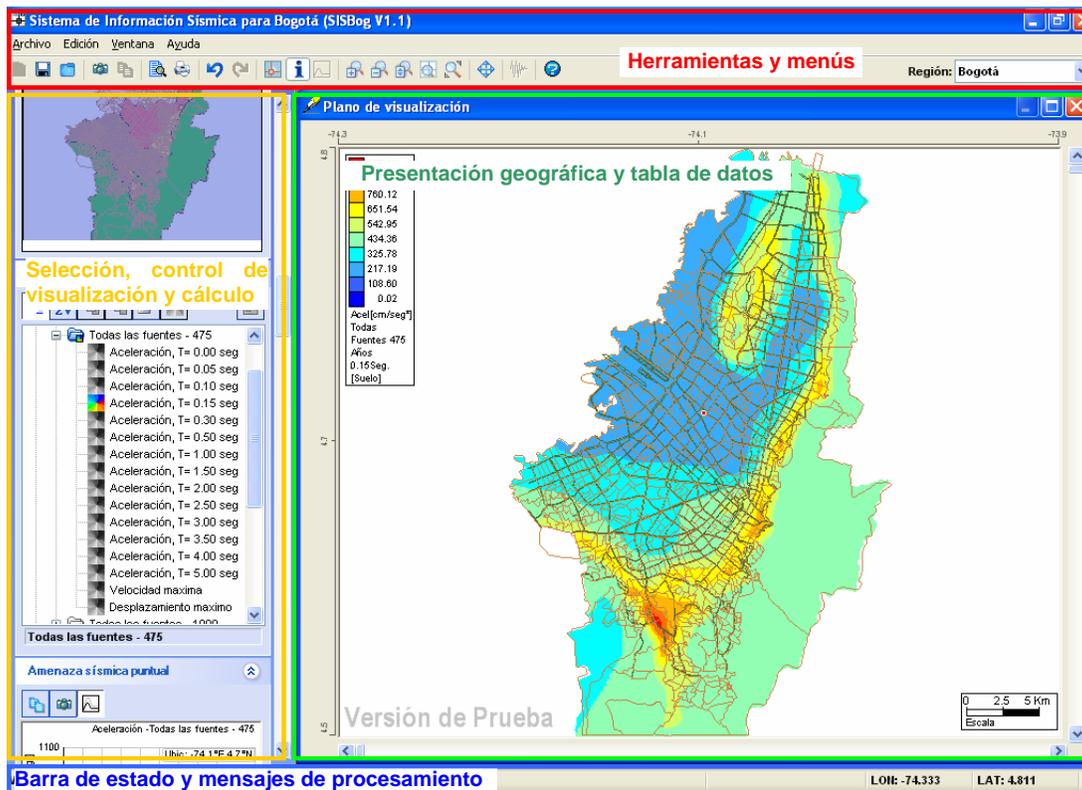


Figura 6.1 Vista General del Programa

La barra de menús de **SISBOG V1.0** está compuesta por cuatro menús desplegables donde se encuentran las funciones necesarias para manejar archivos (Archivo), los controles de visualización del mapa (Edición), control de visualización de ventanas de trabajo (Ventana) y además de un menú de ayuda (Ayuda).

En el área de presentación geográfica se tendrán siempre dos ventanas de información incrustadas que corresponden al plano de visualización y a la lista de Información detallada de objetos. En estas ventanas no está disponible el botón de cerrar en el cuadro de control aunque estas pueden ser ordenadas y redimensionadas. La tabla de visualización de objetos también es posible minimizarla.

El área de selección, control de visualización y cálculo presenta hasta 5 controles expandibles (el número de controles depende de los privilegios de usuario disponibles de acuerdo a la clave de instalación suministrada). Es posible expandir uno a uno cada control a voluntad del usuario. En el momento que la altura total de los controles supere la altura del contenedor, el sistema automáticamente hace visible una barra de desplazamiento vertical al lado izquierdo del contenedor, para poder navegar entre los controles expandibles.

6.3.2 Herramientas y menús

La barra de menús en **SISBOG V1.0** posee cuatro menús desplegables por medio de los cuales se puede acceder a algunas de las funciones del sistema, en lo que se refiere a manejo de archivos y a visualización del plano. En cada uno de los menús se encuentra:

1. **Archivo:** Desde este menú se puede acceder a las funciones, Abrir y Guardar región, Abrir y Guardar informe. Además de estas funciones existen opciones para configurar la impresora e imprimir el informe. Desde este menú también se pueden exportar datos de imagen y texto del estudio actual.
2. **Editar:** Desde este menú se pueden controlar algunas de las funciones de visualización del mapa, la posición y visualización de las herramientas y opciones de copiar el mapa actual como imagen y los datos del espectro de diseño.
3. **Ventana:** En este menú se encuentran las funciones de organización vertical, horizontal, cascada de las ventanas, explorador y navegador de las ventanas de plano de visualización y tabla de información detalla de objetos.
4. **Ayuda:** Bajo este menú se encuentra la ayuda, acceso directo al programa para pedir la clave de usuario al administrador del sistema, un método para cambiar la información y código de instalación del usuario. Además se encuentran los créditos de los creadores de **SISBOG V1.0**.

El sistema **SISBOG V1.0** presenta dos modos principales de operación. La primera es un modo de "operación geográfica  " que permite la edición de la vista actual en la ventana de localización geográfica al tiempo que impide la selección de objetos. El cursor por defecto de esta operación es un cursor tipo mira. El segundo modo de operación corresponde al "modo de selección  " mediante el cual es posible seleccionar las entidades disponibles en la ventana de localización geográfica, sin deshabilitar los comandos de visualización. En este modo de operación el cursor del mouse corresponde a una mano apuntadora. En el modo de selección cuando se tiene seleccionado un mapa de amenaza activo, se deshabilita la selección de objetos por el cálculo de espectros de sitio del punto seleccionado.

Existe además un modo auxiliar que corresponde al "modo de visualización del espectro elástico de diseño  ". Este modo solo está disponible si se encuentra en modo de selección y no existe un mapa de amenaza activo. Mediante este comando se puede alterar la forma como funciona el modo de visualización. Si se encuentra activado, el programa anulará la selección de objetos y siempre calculará el espectro de sitio del punto seleccionado.

Cada vez que se cambie el modo de selección el comando activo de la ventana de localización geográfica será cancelado. En la barra de herramientas se encuentran los siguientes comandos que se explican a continuación:

- **Abrir nuevo archivo** : Por medio de esta función se reinicia la visualización a la forma por defecto de la instalación original.
- **Guardar** : Permite guardar los cambios sobre la configuración de visualización de la región activa en análisis.
- **Abrir región** : Cierra el plano de la región actual y abre el plano de la región seleccionada.
- **Copiar imagen al portapapeles** : Copia la vista actual del plano como imagen al portapapeles, para ser utilizada el cualquier programa que soporte imágenes. El la imagen copiada al portapapeles incluye además un recuadro con la vista aérea de la sección visible en el plano actual (ver Figura 6.2)

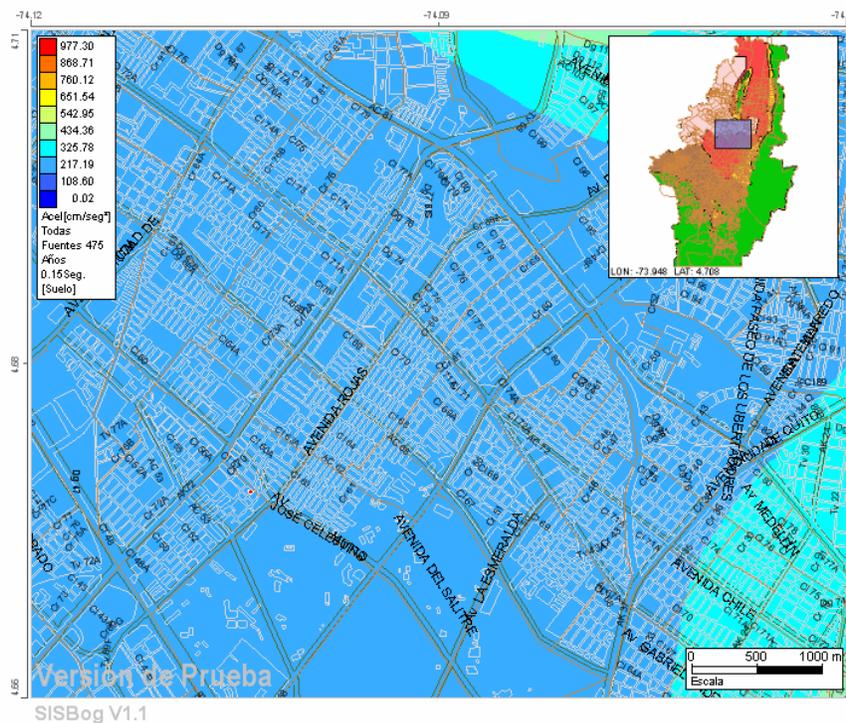


Figura 6.2 Resultado al hacer una copia de la imagen

- **Copiar datos al portapapeles** : Copia los datos de la tabla de *información detallada de objetos* al portapapeles, para ser exportados a otro programa de procesamiento o edición.
- **Vista preliminar** : Presenta una vista preliminar del informe del espectro elástico para diseño sismo resistente.
- **Imprimir reporte** : Imprime el informe del espectro elástico para diseño sismo resistente.
- **Deshacer** : Cancela el último comando gráfico realizado, dejando la vista como se encontraba anteriormente.
- **Rehacer** : Rehace el último comando que ha sido cancelado mediante el comando deshacer.
- **Zoom acercar** : Acerca la región seleccionada hacia su centro en un porcentaje de 40%. El comando es accionado con solo hacer clic sobre el icono o menú del sistema.
- **Zoom alejar** : aleja la región seleccionada desde su centro en un 40%. El comando es accionado con solo hacer clic sobre el icono o menú del sistema.

- **Zoom dinámico** : aleja o acerca la región de observación de acuerdo al sentido en que se desplace el ratón. Para ejecutar esta función se debe picar en el ícono luego sobre el mapa y desplazarse hacia arriba, Zoom acercar, o hacia abajo, Zoom alejar, según convenga. Este comando se hace disponible de forma inmediata al darle vueltas al botón central del mouse.
- **Zoom ventana** : Realiza el zoom de acuerdo a la selección de una ventana dentro del plano. Para realizar esta acción se debe seleccionar la herramienta, luego escoger un punto inicial de selección de ventana (punto rojo de la Figura 6.3) haciendo clic sobre la ventana del plano de visualización. En ese momento se activara un rectángulo de visualización azul que cambiará su tamaño a medida que mueve el ratón sobre la pantalla. Esta ventana azul indicará qué área se desea magnificar; para ejecutar el comando se debe hacer clic sobre el otro extremo de la pantalla que se desea presentar (punto azul de la Figura 6.3).

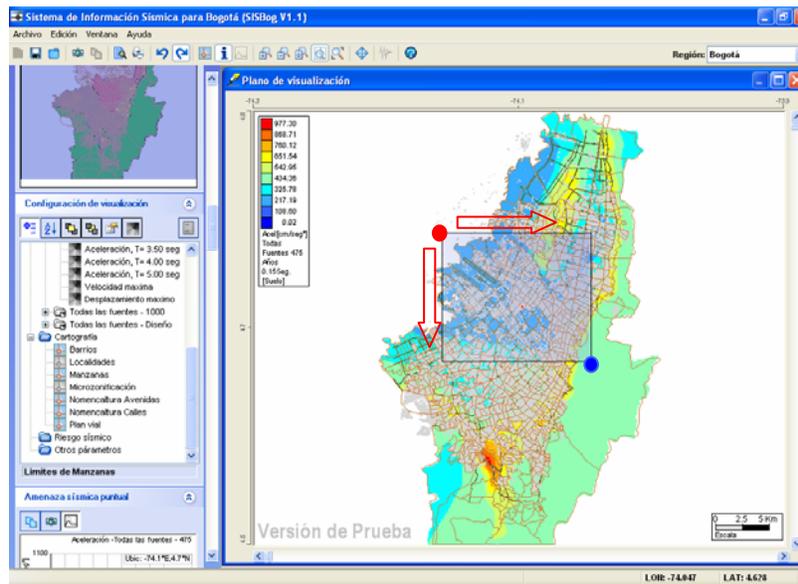


Figura 6.3 Proceso de zoom por ventana

- **Zoom extender** : Extiende el plano a los límites de visualización máxima, es una manera de deshacer los zooms previos. El comando se acciona con solo hacer clic sobre el icono o menú del sistema.
- **Mover ventana** : Permite caminar por sobre el plano de visualización para llegar a regiones no visibles actualmente. Para realizar esta acción se debe seleccionar la herramienta hacer clic sostenido y desplazando la vista hasta el lugar seleccionado. Este comando permanece activo hasta el momento que sea cancelado mediante el accionamiento de otro comando o el cambio del modo de operación. Este comando está disponible de forma inmediata si se hace clic con el botón central del mouse.
- **Ver acelerogramas de diseño** : Despliega la ventana de visualización y exportación de los acelerogramas de diseño.
- **Selección de región** : Región: Bogotá : En esta lista desplegable se encuentran almacenados los planos ubicados en el mismo directorio de instalación. Cuando se selecciona uno de ellos el sistema cierra el plano actual (correspondiente a una región) y abre el nuevo plano seleccionado.

6.3.3 Plano de visualización y tabla de datos

En esta ventana se presenta el mapa de ubicación geográfica que permite realizar la búsqueda cartográfica de información. Para interactuar en esta área se deben usar los Comandos de visualización del plano descritos más adelante, bajo el mismo título.

En el perímetro de esta área se pueden observar las coordenadas (en unidades longitud – latitud) del sector que se está estudiando, al igual que una escala (en kilómetros o metros dependiendo del nivel zoom) en la parte inferior para una mejor interpretación del área en observación.

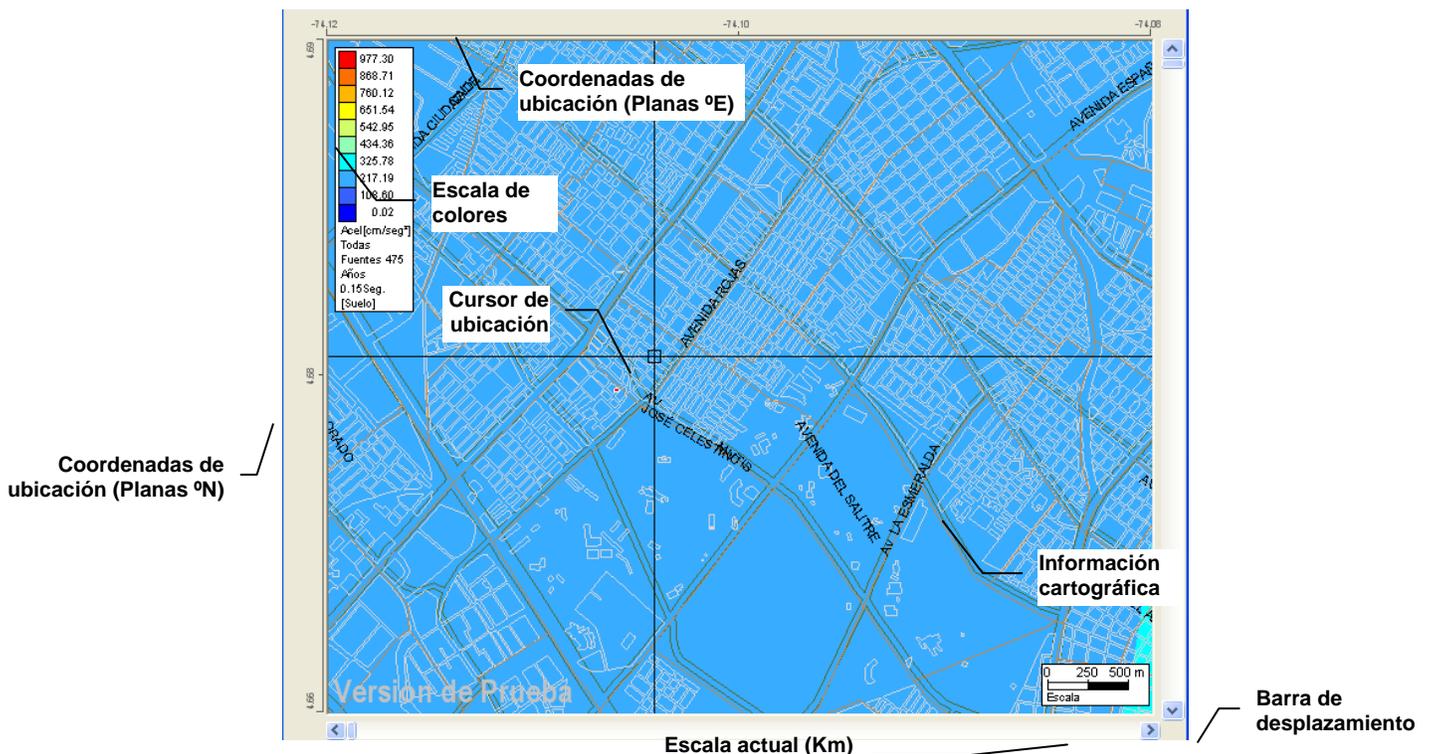


Figura 6.4 Plano de visualización cartográfica

Cuando se desplaza el mouse sobre el plano de visualización es posible ver las coordenadas actuales (en el sistema coordenado de latitud, longitud) de visualización en la barra de estado, en las dos ultimas casillas de izquierda a derecha. Las barras de desplazamiento permiten mover el área actual de visualización del plano, para ubicar el área de interés en el plano.

En el plano de visualización es posible ver tres tipos de capas de información diferentes:

1. **Capas de amenaza sísmica:** Corresponden a grillas de datos calculados con un delta de desplazamiento constante y cuyos resultados se muestran en forma gráfica. El mapa resultante es un espectro de colores asociado a una escala segmentada. En las capas de amenaza sísmica solo es posible activar una capa de amenaza a la vez, pero es posible configurar los colores y los rangos de asociación usados por la paleta. La amenaza sísmica depende de la región que se esté analizando en el momento. Los valores de amenaza reportados tienen en cuenta los efectos de sitio, es decir la

amenaza se presenta a nivel de la superficie del terreno. Las intensidades de los mapas de amenaza fueron calculadas teniendo en cuenta la contribución de todas las fuentes.

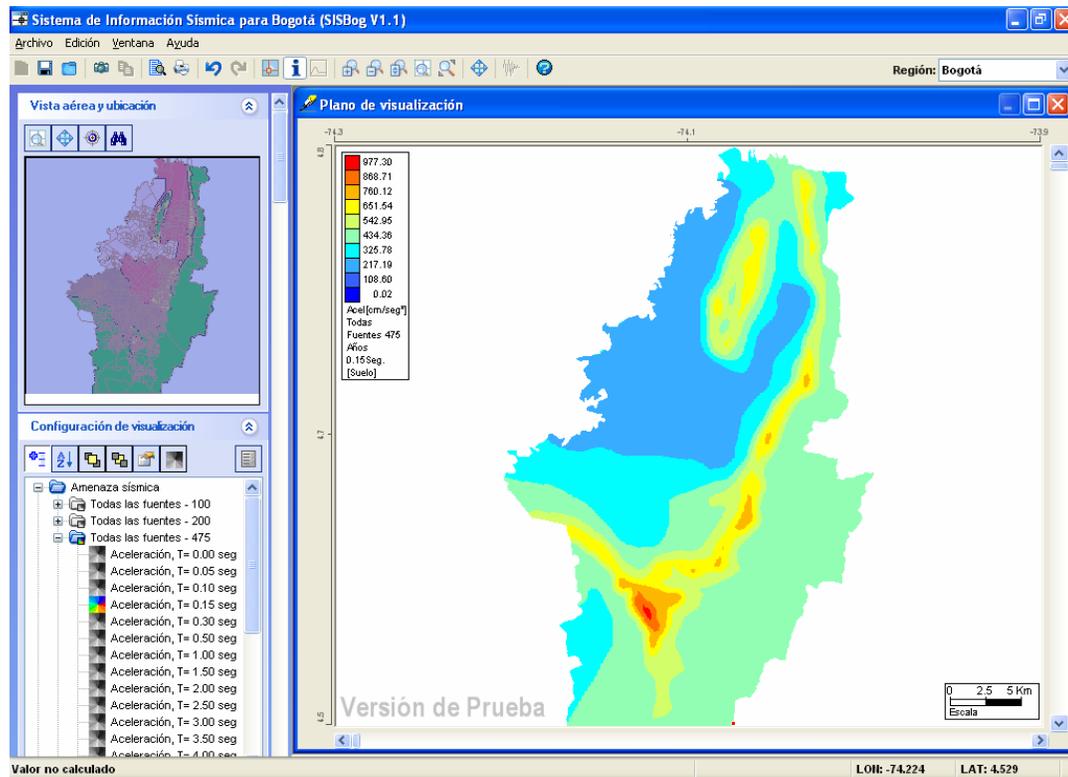


Figura 6.5 Bogotá, plano con solo la capa de amenaza sísmica encendida (Todas las fuentes, retorno de 500 años y periodo de 0 Seg).

2. **Capas de cartografía:** Son capas vectoriales que poseen información geográfica espacial. En estas capas es posible tener varias capas encendidas al mismo tiempo y configurar los colores, tamaños de fuente y espesores de línea.

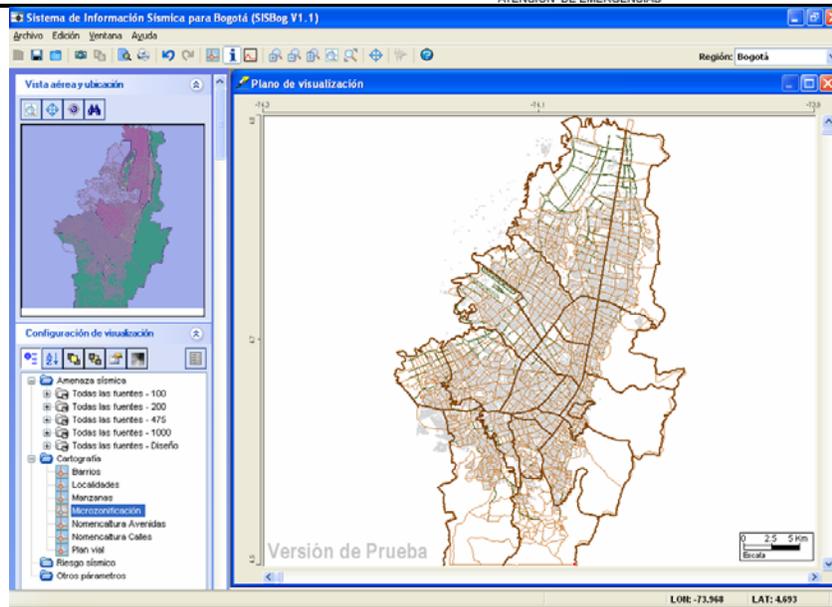


Figura 6.6: Bogotá, plano con solo las capas cartográficas encendidas

- Riesgo sísmico y otros parámetros:** Se presentan mediante la asociación de colores a los objetos base de análisis, de acuerdo al parámetro establecido, para ser visualizadas es necesario tener la capa de *manzanas de cálculo* encendida. Solo es posible tener uno visible a la vez y funcionan de igual manera que las capas de amenaza sísmica.

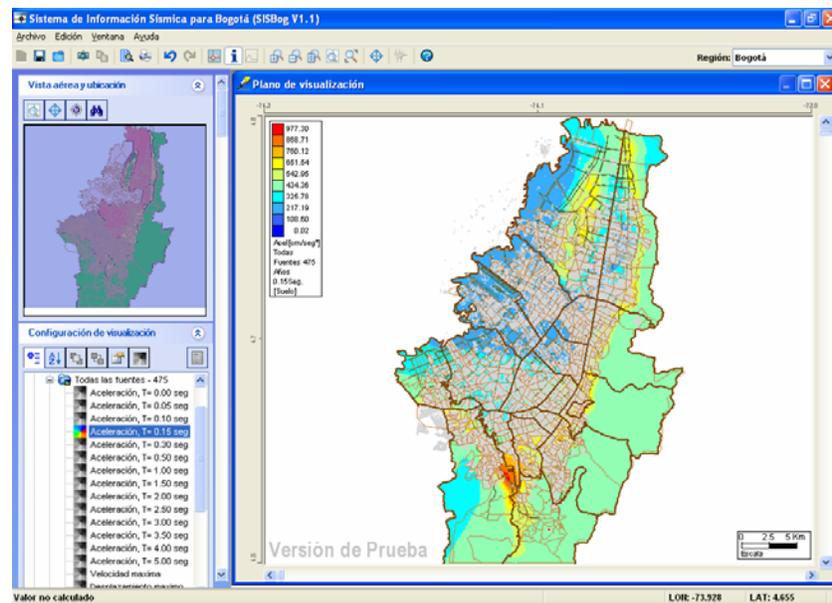


Figura 6.7 Bogotá, plano con solo la capa de riesgo sísmico encendido (Prima pura en pesos)

El plano de visualización presenta dos modos de funcionamiento: el primero permite solo el cambio en los parámetros de visualización como nivel de zoom y ubicación de la ventana de visualización, mientras que en el modo de información es posible alterar los parámetros de visualización y además pedir información de los objetos pertenecientes al plano.

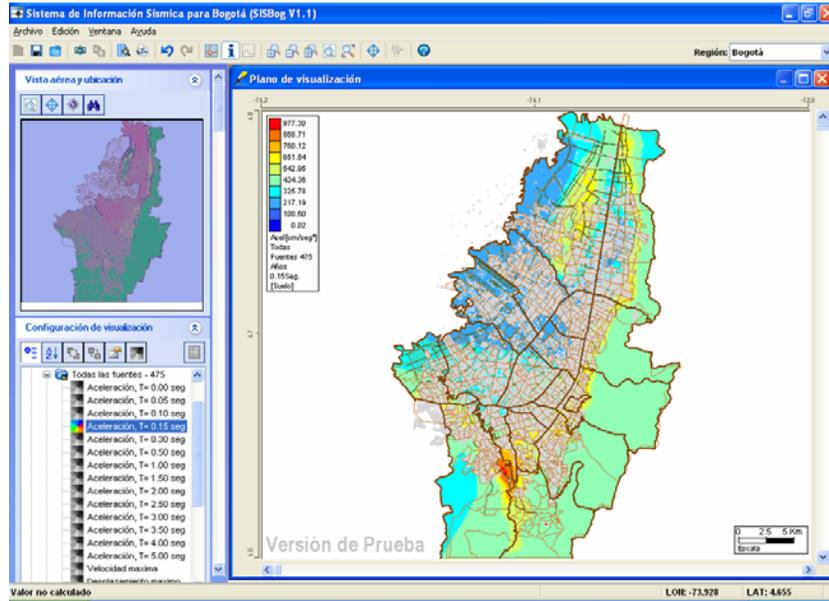


Figura 6.8 Bogotá, plano con toda la información cartográfica encendida, riesgo sísmico (Prima pura en pesos) y amenaza sísmica (Todas las fuentes, retorno de 475 años y periodo de 0.15 Seg)

6.4 BASE DE DATOS DEL SISTEMA

El sistema **SISBOG V1.0** tiene una serie de bases de datos que conforman el sistema de información básico. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las bases de datos incluidas en el sistema, de los campos que componen cada una de las bases de datos y la información disponible.

El sistema **SISBOG V1.0** internamente una serie de grillas con los valores de aceleración espectral (para periodos estructurales iguales a 0.00 segundos, 0.05 segundos, 0.10 segundos, 0.15 segundos, 0.30 segundos, 0.50 segundos, 1.00 segundos, 1.50 segundos, 2.00 segundos, 2.50 segundos y 3.00 segundos), velocidad máxima del terreno y desplazamiento máximo del terreno a nivel de suelo a nivel de superficie (teniendo en cuenta los efectos de sitio) para cada uno de los tres municipios de análisis. Los valores de amenaza sísmica fueron calculados para periodos de retorno de: 200 años, 475 años, 1000 años, 2500 años y Diseño. El sistema permite el despliegue de mapas de la intensidad sísmica seleccionada asociada un periodo de retorno dado (seleccionado entre los 5 periodos de retorno de calculados).

6.5 SELECCIÓN, CONTROL DE VISUALIZACIÓN Y CÁLCULO

6.5.1 Generalidades

En el área de control de visualización y cálculo, se presentan una serie de controles expandibles que poseen las herramientas de control de visualización. Cada control posee un botón de expansión (ver Figura 6.9) el cual permite que únicamente las herramientas que se están utilizando en el momento estén disponibles y expandidas.

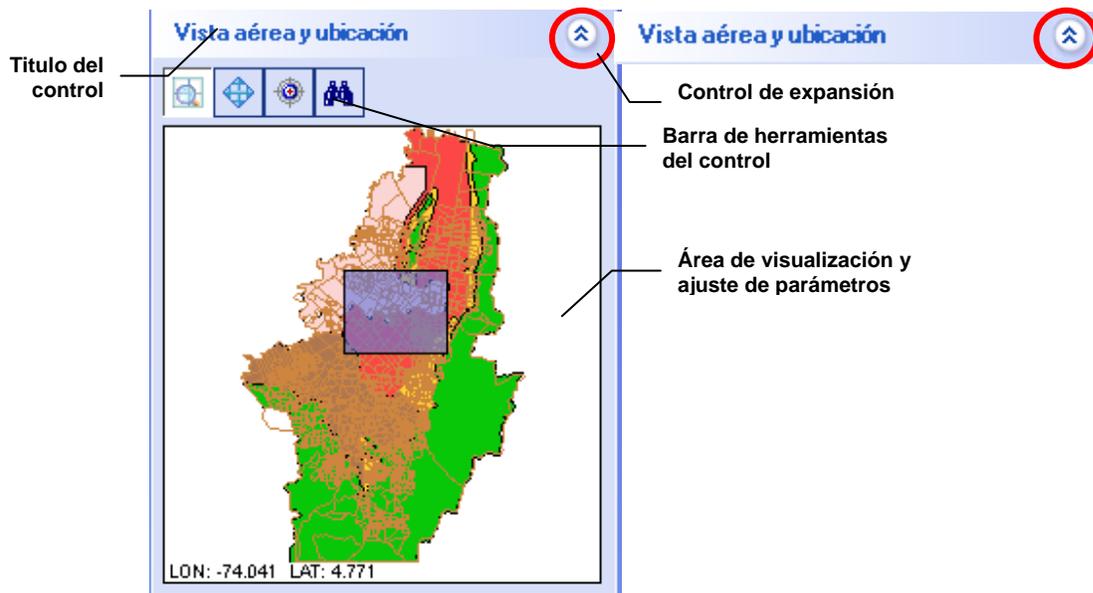


Figura 6.9 Control expandible (Expandido y contraído)

Cuando se supera la altura útil disponible para las herramientas, el área donde se ubican estas herramientas aumentará su área disponible mediante la visualización de una barra de desplazamiento. Algunos de los botones de la barra de herramientas de los controles son del tipo selección, caso en el cual estos permanecen oprimidos hasta que el usuario seleccione otra herramienta diferente. Para saber si un botón está oprimido o no, debe observarse si se ha presentado un cambio de color en el fondo del mismo. El botón está oprimido cuando el fondo del mismo es blanco.

6.5.2 Vista aérea y ubicación

En el control de vista aérea y ubicación se encuentran los elementos para realizar una búsqueda en forma paramétrica sobre el plano, o realizar una selección de áreas directamente sobre la vista aérea. La vista aérea es un pequeño cuadro que posee la vista general extendida del plano, con un cuadro azul que indica el área actual visible en el plano de visualización (ver Figura 6.10).



Figura 6.10 Control de ubicación rápida

Los comandos para realizar la edición de visualización en la vista aérea son los siguientes:

- **Zoom ventana** : Realiza el Zoom de acuerdo con la selección de una ventana dentro del plano. Para realizar esta acción se debe seleccionar la herramienta, luego escoger un punto inicial de selección de ventana haciendo clic sobre la ventana de "Vista Aérea", en ese momento se activará un rectángulo de visualización azul que cambiara su tamaño a medida que mueve el ratón sobre la pantalla. Esta ventana azul indicará el área que se desea magnificar. Para ejecutar el comando se debe hacer clic sobre el otro extremo de la pantalla que se desea presentar.
- **Mover ventana** : Permite desplazarse por el plano de visualización para llegar a regiones no visibles en la imagen activa. Para realizar esta acción se debe seleccionar la herramienta, luego se debe hacer un clic sostenido y desplazar la vista hasta el lugar seleccionado.
- **Ubicación puntual** : Con este método se selecciona un punto de visualización al hacer clic sobre el plano de visualización aérea.

El método de *ubicación paramétrica*  consiste en que mediante la selección de parámetros de filtrado es posible ubicarse rápidamente en el plano cartográfico. En la sección de *ubicación por sector*, el sistema tiene almacenado en la base de datos las zonas, regiones y subregiones (por ejemplo en las ciudades corresponden a: localidad o comuna, barrio y manzana). Estos elementos se encuentran almacenados dentro de una lista desplegable, lo que permite que una vez sea seleccionado se filtre el siguiente nivel hasta llegar al nivel de detalle necesario. Cada vez que se selecciona un elemento de la lista desplegable, el plano de visualización cambia para contener en su totalidad el objeto correspondiente (dependiendo del nivel de información existente en cada municipio, estos cuadros desplegables pueden tener acceso a todos o solo algunos de los niveles).

En el cuadro de *ubicación por coordenada*, es posible realizar un zoom sobre un punto específico del plano de visualización. Para lograr esto se deben introducir las coordenadas geográficas del punto de interés y accionar el botón *ubicar*. Si el plano posee información adicional sobre *puntos de interés*, al desplegarse la lista y ser seleccionado un elemento de ella, el sistema ubica automáticamente el punto en el centro del plano de visualización.

En el cuadro de *búsqueda por parámetros* es posible encontrar un grupo de objetos que cumplan con las condiciones establecidas y navegar a través de los objetos resultantes. El procedimiento consiste en seleccionar el parámetro (campo en la tabla de *información detallada de objetos*), para luego seleccionar un *comando*, que corresponde al operador de comparación y en el campo *criterio* se debe escribir el valor de comparación. Una vez estos parámetros están configurados se debe accionar el botón **Buscar**, con lo cual se procesa la selección y es posible iniciar la navegación mediante el accionamiento de las flechas. Cada vez que se avance o retroceda dentro del registro resultante, el plano de visualización centrará el objeto actual de búsqueda y lo señalará con un marco selección.

6.5.3 Configuración de visualización

En el cuadro de configuración de visualización se encuentran disponibles las herramientas de control de visualización y configuración de capas. Existen cuatro grupos () de capas disponibles en el programa, el grupo de  - *Amenaza sísmica*,  - *Cartografía*,  - *Riesgo sísmico* y  - *Otros parámetros*.

En el grupo de *Amenaza sísmica* se encuentran almacenados los mapas de amenaza, discriminados para distintos parámetros de simulación. En el grupo de *Cartografía* se encuentran todos los elementos gráficos del tipo vectorial que definen la cartografía de la ciudad. En el grupo de *Riesgo sísmico* se encuentran disponibles las distintas simulaciones de riesgo sobre la infraestructura expuesta de la ciudad y que se representan mediante colores asociados a una paleta y el color de relleno de los objetos de análisis (manzanas). Finalmente *Otros parámetros* corresponden a las variables adicionales asociadas en la tabla de *Información detallada de objetos*, y estos se representan de la misma manera que las capas de *Riesgo sísmico*.

En *Amenaza Sísmica*, *Riesgo Sísmico* y *Otros parámetros* solo es posible tener una capa activa a la vez, mientras que en *Cartografía* se pueden tener un conjunto de capas encendidas en forma simultánea. El proceso de edición de visualización se realiza mediante un doble clic con el puntero del mouse sobre la capa que se desea alterar su visibilidad. Los iconos de cada tipo de capa al cambia su estado de color, si está establecido en escala de grises, indica que la capa se encuentra apagada.

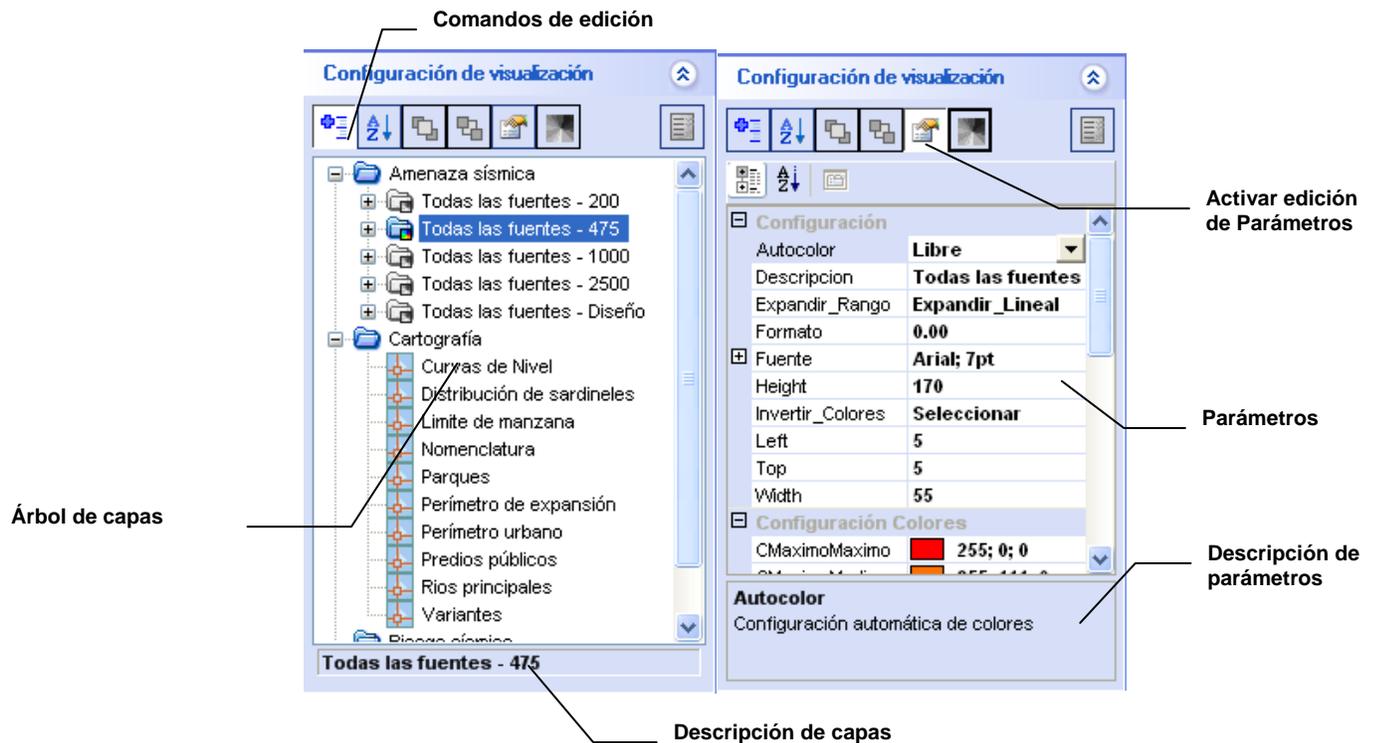


Figura 6.11 Control de visualización

A continuación se hace una descripción de los comandos disponibles en la opción *Configuración de visualización*:

- **Ordenar capas por árbol jerárquico** : Se agrupan las capas disponibles.
- **Orden alfabético de las capas** : La presentación del árbol de control de visualización se realiza de la forma lineal, en la cual las capas se presentan en orden alfabético.
- **Enviar capa al frente** : Mediante esta opción se envía la capa activa del árbol a la parte superior, lo cual genera que esta última se coloque sobre las demás capas una vez sea redibujada. Para seleccionar una capa se debe hacer clic sobre la capa que se desea, quedando resaltada en el árbol de control de visualización. Las capas de riesgo y amenaza, siempre se redibujan en el fondo de todas las demás capas, dibujando amenaza primero y luego riesgo; por esto, éstas no se pueden enviar al frente o al fondo.
- **Enviar capa al fondo** : Envía la capa actual de visualización al fondo de las demás, es el proceso inverso al comando anterior.
- **Ver propiedades de capa** : Despliega la grilla de edición de propiedades gráficas para la capa actual seleccionada. Cada una de las propiedades presenta un mensaje de ayuda, el cual describe su uso en la parte inferior del control.
- **Apagar la capa de amenaza activa** : Con este comando es posible apagar la capa de amenaza activa reduciendo así el tiempo necesario de búsqueda dentro de las distintas simulaciones.
- **Ver propiedades de visualización para el control gráfico** : Despliega la grilla de edición de propiedades gráficas para el control de localización geográfica. Cada una de las

propiedades presenta un mensaje de ayuda, describiendo su uso en la parte inferior del control.

6.5.4 Amenaza sísmica puntual

En este control es posible ver los comandos asociados con la visualización de los espectros de respuesta del punto de cálculo seleccionado. En el plano de visualización el punto de cálculo aparece señalado como un círculo rojo con borde blanco.

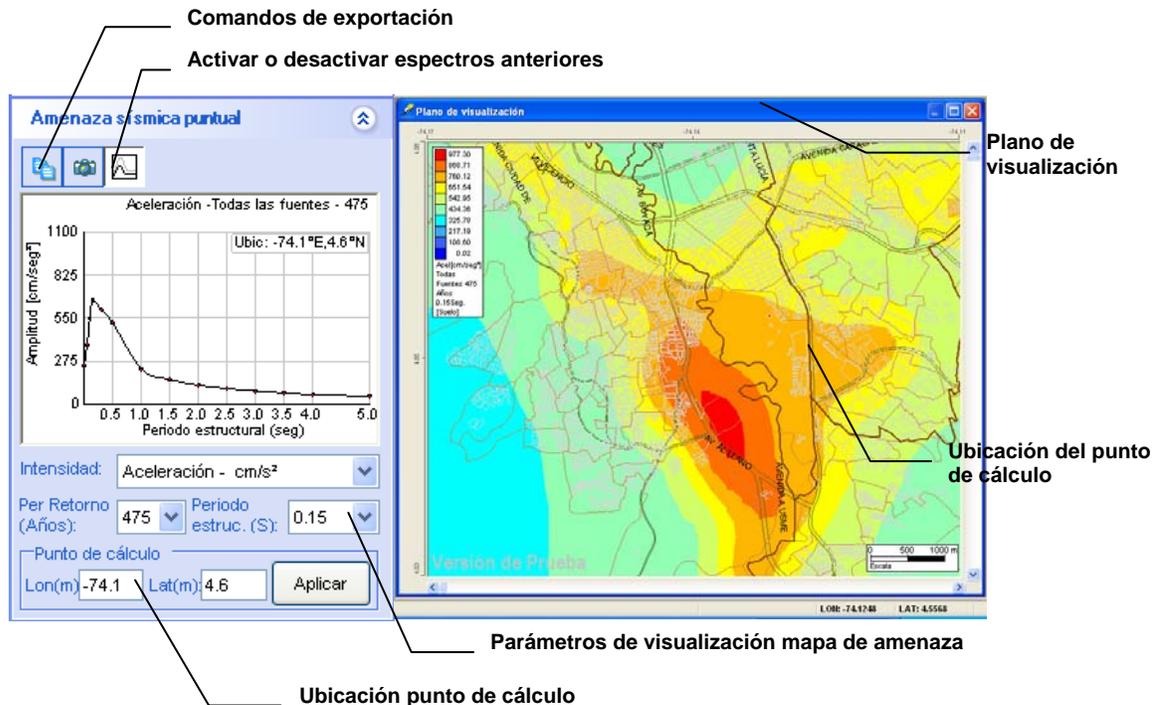


Figura 6.12 Control de amenaza sísmica puntual

Mediante las listas expandibles de *Intensidad*, *Periodo de retorno (Años)* y *Periodo estructural (Seg)* es posible alterar el mapa de amenaza que se encuentra activo en el plano de visualización (de igual manera a como se hace al activar un mapa de amenaza mediante el árbol de capas en el control de *Configuración de visualización*). Si en el campo *Intensidad* se selecciona *Velocidad – cm/s* o *Desplazamiento – cm*, el sistema no cambia el mapa de amenaza a visualizar, sino calcula la pseudo-velocidad o el desplazamiento para el espectro seleccionado en el momento. En el área de *punto de cálculo* es posible cambiar las coordenadas de ubicación del espectro de sitio, y recalcularlo al hacer clic sobre el comando **Aplicar**.

Los espectros de respuesta en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento para los diferentes parámetros indicados y para la ubicación geográfica seleccionada se evalúa mediante la interpolación de los valores disponibles en las coordenadas cercanas.

6.5.5 Resumen Estadístico

Algunas variables de la tabla de *Información adicional de objetos*, pueden presentar un resumen estadístico que se ve reflejado en una gráfica de barras y en unas variables que aparecen en este control. Para ver este resumen estadístico se debe seleccionar una variable sobre la lista expandible *Variable de análisis*. Una vez se ha seleccionado, el sistema calcula la gráfica y las variables estadísticas, escribiendo las variables descriptivas del conjunto existente dentro de la tabla de *Información adicional de objetos*. El programa selecciona automáticamente los rangos de clases siempre y cuando se encuentre activada la caja de selección *Rango Automático*. Si esta caja no se encuentra seleccionada es posible variar el número de clases con el control ubicado junto al cuadro de selección (ver Figura 6.13)

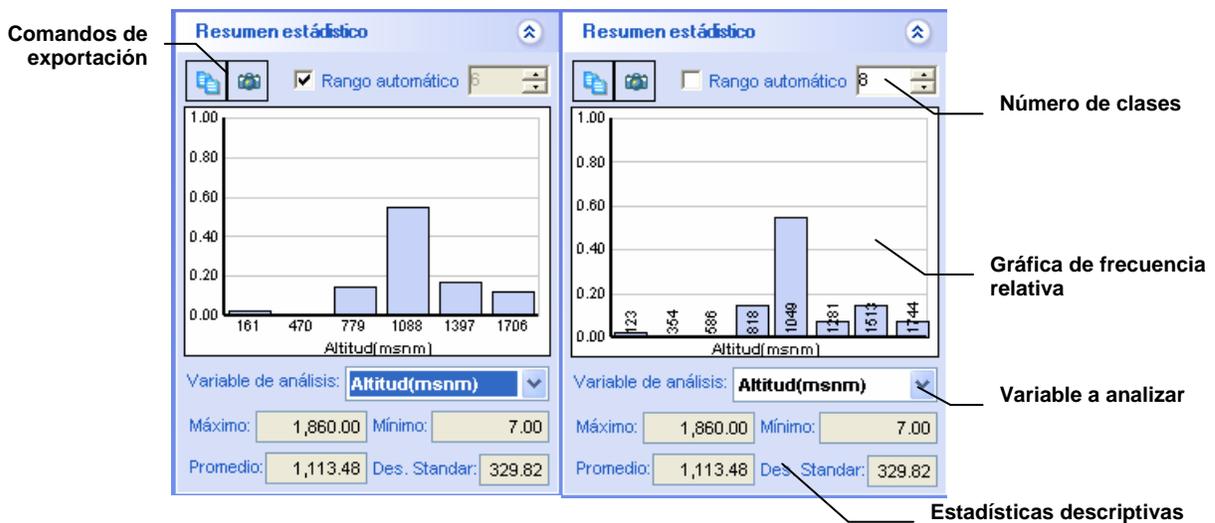


Figura 6.13 Análisis estadístico, con rango automático (izq.) y rango manual (der.)

Al igual que el control anterior es posible exportar los datos del resumen estadístico mediante los comandos de exportación. Con el comando se copia la imagen del grafico frecuencial al portapapeles y con se copian los datos generadores de la gráfica y los valores de las variables estadísticas (ver Figura 6.14).

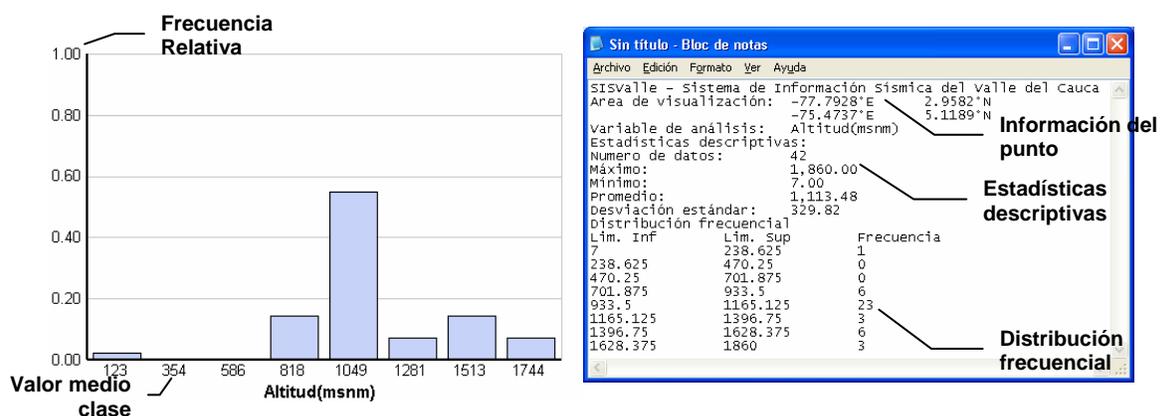


Figura 6.14 Resultados copiar imagen y copiar datos para el control de resumen estadístico

6.5.6 Informe Espectros de Diseño

En el control de *Datos para generación de Informe* se encuentran agrupados los datos que aparecen dentro del informe. Los informes son independientes al plano de la región y por ello deben ser almacenados en archivos separados, de extensión (*.iss). Los comandos de guardar  y recuperar  informes se encuentran disponibles en la barra de comandos del control de *Datos para generación de Informe*. Los informes se encuentran vinculados con la región de donde fueron generados y guardados y por ello no es posible abrir un informe cuando se tiene seleccionada otra región en el sistema. Los comandos disponibles dentro del control de *Datos para generación de Informe*, son:

- **Recuperar informe de disco** : Abre un informe que se encuentre almacenado.
- **Guardar informe en disco** : Guarda el informe actual en disco.
- **Ver vista preliminar del informe** : Abre la ventana de vista preliminar del informe (ver Figura 6.15).
- **Configurar página** : Configura la página de la impresora predeterminada del sistema.
- **Imprimir informe** : Permite al usuario determinar la impresora de destino e imprimir el informe.
- **Copiar datos del espectro de diseño** : Copia los datos del espectro de diseño al portapapeles de windows.



The screenshot shows a software control window titled "Espectro de diseño". At the top, there is a toolbar with icons for "Recuperar informe", "Guardar informe", "Ver vista preliminar del informe", "Configurar página", "Imprimir informe", and "Copiar datos del espectro de diseño". Below the toolbar, the window is divided into two main sections: "Datos proyecto" and "Profesional responsable". The "Datos proyecto" section contains fields for "Nombre:", "COMUNA", "BARRIO", "Dirección:", "Ficha catastral:", "Propietario:", "Cédula:", "Telefono:", and "Ciudad:". The "Profesional responsable" section contains fields for "Nombre:", "Cédula:", and "Matricula prof:". Labels with arrows point to these fields and the toolbar icons, identifying them as "Recuperar informe", "Guardar informe", "Vista previa informe", "Configuración de página", "Copiar espectro datos espectro de diseño", "Imprimir informe", and "Datos del informe".

Figura 6.15 Parámetros de entrada para el informe de espectro de diseño

En el control se deben especificar los siguientes campos del informe (ver Figura 6.15):

- **Nombre - Proyecto:** Campo específico para el nombre del proyecto correspondiente al sitio de estudio.
- **Comuna:** Campo específico para el nombre de la comuna correspondiente al sitio de estudio.
- **Barrio:** Campo específico para el nombre del barrio correspondiente al sitio de estudio.
- **Dirección:** Campo específico para la dirección del sitio de estudio.
- **Ficha catastral:** Campo específico para la ficha catastral correspondiente al predio del sitio de estudio.
- **Propietario:** Campo específico para el nombre del propietario del proyecto.
- **Cédula - Propietario:** Campo específico para el número de cédula del propietario.
- **Teléfono:** Campo específico para el teléfono del propietario.
- **Ciudad:** Campo específico para la ciudad.
- **Nombre - Responsable:** Campo específico para el nombre del responsable del estudio.
- **Cédula - Responsable:** Campo específico para el número de cédula del responsable del estudio.
- **Matrícula Profesional:** Campo específico para el número de matrícula profesional del responsable del estudio.

En el informe se presentan cuatro títulos:

- **Información General del Proyecto:** Bajo este título está señalada la información general del proyecto, datos personales del propietario, teléfonos, etc.
- **Mapa de Ubicación:** Bajo este título se describen los datos de ubicación geográfica del proyecto, al igual que el mapa de la zona en estudio. Es la misma vista que presenta el plano de visualización actual.
- **Espectro de Diseño:** Bajo este título se presentan tabulados los valores de aceleración del espectro de diseño, al igual que la gráfica correspondiente y los demás valores con los que fue calculado.
- **Firma del Profesional Responsable:** Bajo este se encuentran los datos del responsable del presente estudio.

Dentro de la ventana de vista preliminar (ver Figura 6.16) se encuentra el control de zoom de visualización , que al ser accionado permite realizar un escalamiento del informe en pantalla. Con los botones  y , se pueden alternar la vista de una o dos hojas.

Ver una o dos hojas

Cerrar vista previa

Control de visualización de hoja

Imprimir informe

Nivel de zoom vista preliminar

Vista previa Informe

Vista preliminar

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

NOMBRE DEL PROYECTO			
CORONA	BARRIO		
DIRECCIÓN	FECHA CATASTRAL		
PROPIETARIO	CÉDULA A/R/T		
TELÉFONO	CIUDAD		
ARCHIVO INFORME	INFORME GUARDADO		

2. # AFABE UBICACIÓN

PUNTO DE ANÁLISIS		COORDENADAS LÍMITES DE VISUALIZACIÓN	
LONGITUD (°W)	87°56'00"	LONGITUD (°W)	87°48'00"
LATITUD (°N)	06°05'00"	LATITUD (°N)	06°07'00"

3. ESPECTRO DE DISEÑO

PERIODO (seg)	ACELERACIÓN (cm/s²)
0.05	300
0.10	277
0.15	250
0.20	222
0.30	167
0.40	150
0.50	133
0.75	111
1.00	100

4. FIRMA DEL PROFESIONAL RESPONSABLE

NOMBRE: _____ CÉDULA: _____

FIRMA: *SIS Ibagué* O.D./M./A.A.A.A. v1.1

MATRÍCULA PROFESIONAL: _____

BAJO LA RESPONSABILIDAD DE FIRMAR ESTOY PRESTANDO LA INFORMACIÓN OBRERA EN ESTE FORMULARIO CORRESPONDE AL RESULTADO FINAL DEL SISTEMA DE CÁLCULO DE ESPECTROS DE DISEÑO PARA LA CIUDAD DE IBAGUÉ (SIS Ibagué) Y QUEDÓ HE MODIFICADO EN NINGUNA FORMA DICHO RESULTADO

ESPACIO RESERVADO PARA USO EXCLUSIVO DE LA CURADURÍA URBANA

ENCARGADO: _____ CÉDULA: _____

FIRMA: _____

OBSERVACIONES: _____

SISTEMA DE CÁLCULO DE ESPECTROS DE DISEÑO PARA IBAGUÉ SIS Ibagué V1.1

Figura 6.16 Vista preliminar del informe de espectro elástico de diseño

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 6 SISTEMA DE INFORMACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ – SISBOG V1.06-1

6.1 INTRODUCCIÓN	6-1
6.2 REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN	6-2
6.2.1 Requerimientos de Hardware	6-2
6.2.2 Proceso de instalación	6-2
6.2.3 Iniciando y finalizando SISBOG V1.0	6-3
6.3 INTERFASE DEL USUARIO Y COMANDOS GRÁFICOS	6-4
6.3.1 Descripción general	6-4
6.3.2 Herramientas y menús	6-5
6.3.3 Plano de visualización y tabla de datos	6-8
6.4 BASE DE DATOS DEL SISTEMA	6-12
6.5 SELECCIÓN, CONTROL DE VISUALIZACIÓN Y CÁLCULO	6-13
6.5.1 Generalidades	6-13
6.5.2 Vista aérea y ubicación	6-13
6.5.3 Configuración de visualización	6-15
6.5.4 Amenaza sísmica puntual	6-17
6.5.5 Resumen Estadístico	6-18
6.5.6 Informe Espectros de Diseño	6-19

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Vista General del Programa.....	6-4
Figura 6.2 Resultado al hacer una copia de la imagen.....	6-6
Figura 6.3 Proceso de zoom por ventana	6-7
Figura 6.4 Plano de visualización cartográfica.....	6-8
Figura 6.5 Bogotá, plano con solo la capa de amenaza sísmica encendida (Todas las fuentes, retorno de 500 años y periodo de 0 Seg).	6-9
Figura 6.6: Bogotá, plano con solo las capas cartográficas encendidas	6-10
Figura 6.7 Bogotá, plano con solo la capa de riesgo sísmico encendido (Prima pura en pesos)	6-10
Figura 6.8 Bogotá, plano con toda la información cartográfica encendida, riesgo sísmico (Prima pura en pesos) y amenaza sísmica (Todas las fuentes, retorno de 475 años y periodo de 0.15 Seg).....	6-11
Figura 6.9 Control expandible (Expandido y contraído).....	6-13
Figura 6.10 Control de ubicación rápida	6-14
Figura 6.11 Control de visualización	6-16
Figura 6.12 Control de amenaza sísmica puntual.....	6-17
Figura 6.13 Análisis estadístico, con rango automático (izq.) y rango manual (der.)	6-18
Figura 6.14 Resultados copiar imagen y copiar datos para el control de resumen estadístico.....	6-18
Figura 6.15 Parámetros de entrada para el informe de espectro de diseño.....	6-19
Figura 6.16 Vista preliminar del informe de espectro elástico de diseño.....	6-21