CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

Certificado
GP 137-1

Certificado
SC 6593-1

Certificado
CO-SC 6593-1

ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES

INFORME FINAL

VOLUMEN 1

ORIGINAL

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA

SUBDIRECCIÓN DE TÉCNICA Y GESTIÓN

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

OCTUBRE DE 2010

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

BOGOTÁ BICENTENARIO

BOG BOGOTÁ POSITIVA
GOBIERNO DE LA CIUDAD

Certificado N° GP 137-1
Certificado N° SC 6593-1
Certificado N° CO-SC 6593-1

Gestión y ejecución de políticas en materia de conocimiento, prevención, mitigación y recuperación frente a riesgos públicos de origen natural y antrópico no intencional y la coordinación para la atención de emergencias en la ciudad de Bogotá.

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

Certificado
GP 137-1

Certificado
SC 6593-1

Certificado
CO-SC 6593-1

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA

GUILLERMO ESCOBAR CASTRO
Director

LUCY ESPERANZA GONZÁLEZ MARANTES
Subdirección de Técnica y de Gestión

GLADYS PUERTO – LINDON LOSADA
Coordinación de Investigación y Desarrollo

FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA
Responsable de Grupo Escenario de Daño

Grupo Técnico
Fernando Javier Díaz
Iván Mauricio Ordóñez
Gerardo Alonso Rodríguez
Adriana Lucia Beltrán

Entidades Participantes
Universidad de los Andes
Sociedad Colombiana de Geotecnia
Asociación de Ingeniería Sísmica

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

Diagonal 47 No. 77A -09 Interior 11 - Conmutador: 4292801 Fax. 4292833 - Bogotá D.C. - Colombia
Página Web: www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co mail: fopae@fopae.gov.co

Certificado
GP 137-1

CERTIFICADO
ISO 9001
Certificado
SC 6593-1

Certificado
CO-SC 6593-1

RESUMEN

Bogotá viene adelantando desde hace varios años diversas actividades en torno a la gestión integral del riesgo sísmico del área urbana de la ciudad. Han transcurrido más de una década desde que se publicaron los resultados del primer estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, tiempo en el cual es estado del conocimiento ha avanzado considerablemente en diferentes aspectos. Por lo anterior, el FOPAE desde finales del año 2005 a través del Ingeniero Fernando Ramírez (Director DPAE 2003 a 2006), la Ingeniera Diana Rubiano (Directora DPAE 2007) y el Ingeniero Guillermo Escobar (Actual Director FOPAE) y la participación de representantes de la Sociedad Colombiana de Geotecnia, la Asociación de Ingeniería Sísmica, y la Universidad de los Andes, emprendieron labores encaminadas a realizar la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá con base en los estudios más recientes de amenaza sísmica regional y de respuesta de sitio local. Dicha propuesta de actualización se consolidad en el estudio "Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones", el cual se presenta en este documento técnico que será el soporte para que sean adoptados en la reglamentación de diseño sismo resistente de edificaciones de la ciudad, la propuesta de actualización fue objeto de una etapa de discusión pública y concertación con los diferentes actores del proceso.

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN....1
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN....2
1.2 OBJETIVOS....3
1.2.1 General....3
1.2.2 Específicos....3
1.3 ALCANCE....4
1.4 MARCO LÓGICO DE ACTIVIDADES....4
1.4.1 Estudios previos y convenios inter-administrativos....5
1.4.2 Amenaza sísmica y señales de Diseño....5
1.4.3 Modelo geológico geotécnico....5
1.4.4 Interpretación de señales de la RAB....5
1.4.5 Respuesta dinámica de los terrenos....5
1.4.6 Zonificación de la respuesta sísmica y espectros de diseño....6
1.4.7 Recomendaciones para la reglamentación....6
2 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS....7
2.1 ESTUDIO BASE E INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA....7
2.1.1 Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB....7
2.1.2 Señales sísmicas compatibles con la amenaza....8
2.1.3 Información cartográfica y catastral de la ciudad....8
2.1.4 Estudios de amenaza sísmica de Colombia....8
2.2 CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS....10
2.2.1 Convenio de cooperación 667 de 2005 FOPAE – UNIANDES.....10
2.2.2 Convenio de cooperación 460 de 2006 FOPAE – SCG.....10

2.2.3 Convenio de cooperación 487 de 2006 FOPAE – AIS: 10

2.2.4 Resumen de resultados de los convenios 10

3 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO 14

3.1 ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA (INGEOMINAS & UNAL, 2010) 14

3.1.1 Amenaza sísmica total y desagregada 15

3.1.2 Desagregación 16

3.2 ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA (AIS, 2009) 17

3.2.1 Amenaza sísmica total y desagregada 18

3.2.2 Desagregación 19

3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS 21

3.4 SEÑALES DE DISEÑO 23

3.4.1 Empleadas por los convenios 23

3.4.2 Empleadas por FOPAE 26

4 MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD 28

4.1 METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN 28

4.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 30

4.2.1 Modelo digital del terreno 30

4.2.2 Geología local escala 1:25.000 30

4.2.3 Geología semi-detallada de los Cerros Orientales y de Suba de la Ciudad de Bogotá. 35

4.2.4 Zonificaciones geotécnicas anteriores 39

4.2.5 Exploraciones geotécnicas 40

4.2.6 Variación espacial de la humedad natural y velocidad de onda cortante 44

4.2.7 Perfiles típicos 44

4.2.8 Información sísmica 48

4.2.9 Cruces temáticos y análisis superficial 49

4.2.10 Mapa de zonificación geotécnica 50
4.2.11 Secciones esquemáticas de los depósitos de la ciudad 50
4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA RESPUESTA SÍSMICA.....55
4.3.1 Profundidad del basamento rocoso.....55
4.3.2 Período fundamental del suelo.....55
4.3.3 Cruces temáticos y análisis en profundidad.....58
4.3.4 Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica 58
5 INTERPRETACIÓN DE SEÑALES REGISTRADAS POR LA RAB 61
5.1 RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ.....61
5.1.1 Descripción de la red.....62
5.1.2 Eventos registrados.....63
5.1.3 Procesamiento y publicación de registros.....64
5.2 INTERPRETACIÓN DE REGISTROS 65
5.2.1 Análisis de la respuesta sísmica de cada estación 65
5.2.2 Registros en profundidad y relaciones espectrales.....69
5.2.3 Análisis de los registros del sismo de Quetame, Cundinamarca. 70
5.2.4 Síntesis de la interpretación de registros 75
5.3 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS.....75
5.3.1 Velocidad de onda cortante.....76
5.3.2 Amortiguamiento viscoso o mínimo.....79
5.3.3 Modelos de degradación del módulo y amortiguamiento compatibles.....79
5.4 CALIBRACIÓN DE MODELOS DE RESPUESTA DINÁMICA.....80
5.5 SÍNTESIS DE RESULTADOS.....83
6 MODELACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL SUBSUELO 85
6.1 MODELACIONES DE LOS CONVENIOS INTER ADMINISTRATIVOS 85
6.1.1 Universidad de los Andes - UNIANDES 85

6.1.2 Sociedad Colombiana de Geotecnia - SCG 87
6.1.3 Asociación de Ingeniería Sísmica - AIS 89
6.1.4 Agrupación de los modelos de respuesta 94
6.2 MODELACIONES UNIDIMENSIONALES 95
6.2.1 Procedimiento de modelación 95
6.2.2 Definición de perfiles de análisis 95
6.2.3 Propiedades dinámicas 95
6.2.4 Modelación con EERA 96
6.2.5 Espectros de respuesta 97
6.2.6 Relaciones espectrales y funciones de transferencia 98
6.2.7 Análisis de resultados unidimensionales 98
6.3 MODELOS BIDIMENSIONALES 100
6.3.1 Procedimiento de modelación 100
6.3.2 Definición de secciones típicas de análisis 100
6.3.3 Propiedades dinámicas 102
6.3.4 Modelación con QUAD4M 103
6.3.5 Espectros de respuestas 106
6.3.6 Relaciones espectrales 106
6.3.7 Análisis de resultados bidimensionales 107
6.4 RELACIONES ESPECTRALES PROMEDIO 108
7 ZONIFICACIÓN Y ESPECTROS DE RESPUESTA 116
7.1 ZONIFICACIÓN DE RESPUESTA SÍSMICA 116
7.1.1 Mapa de zonificación de respuesta sísmica 116
7.1.2 Consideraciones generales 119
7.1.3 Espectros de respuesta uniformes en superficie 119
7.2 PARÁMETROS REQUERIDOS POR LA NSR-10 124

7.2.1 Espectros de diseño para edificaciones nuevas 124
7.2.2 Espectros de diseño de seguridad limitada 128
7.2.3 Espectro de diseño de umbral de daño 131
7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON DEL ESTUDIO DE 1997 135
7.4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA NORMATIVIDAD 138
7.4.1 Recomendaciones para el reglamento de sismo resistencia 138
7.4.2 Otras recomendaciones 145
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 147
8.1 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS 147
8.2 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO 148
8.2.1 Modelo geológico geotécnico 148
8.2.2 Interpretación de señales de la RAB 149
8.2.3 Respuesta dinámica de los terrenos 149
8.2.4 Zonificación de la respuesta sísmica y espectros de diseño 149
8.2.5 Recomendaciones para la reglamentación 150
9 REFERENCIAS 151

ANEXOS

MAPA 1. Zonificación Geotécnica de Bogotá D.C.

MAPA 2. Zonificación Respuesta Sísmica de Bogotá D.C.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Marco lógico de actividades 4

Figura 2.1. Mapa de zonificación sísmica de Colombia (AIS, 2009) 9

Figura 3.1. Curvas de amenaza de distintas fuentes para Bogotá. (Ingeominas & Unal, 2010)....15

Figura 3.2. Espectros de Amenaza Uniforme por tasa de retorno (Ingeominas & Unal, 2010)....16

Figura 3.3. Espectro de amenaza uniforme por fuentes (Ingeominas & Unal, 2010)....16

Figura 3.4. Curvas de amenaza para Bogotá curvas de Gallego. (AIS, 2009)....18

Figura 3.5. Espectros de Amenaza Uniforme para Bogotá. Curvas de atenuación de Campbell-García....19

Figura 3.6. Espectros de Amenaza Uniforme para Bogotá. Curvas de atenuación de Gallego 19

Figura 3.7. Desagregación de PGA para un período de retorno de 475 años. Ecuaciones de atenuación de Campbell-Garcia 20

Figura 3.8. Desagregación de PGA para un período de retorno de 475 años. Ecuaciones de atenuación de Gallego....20

Figura 3.9. Comparación de Espectros de Amenaza Uniforme obtenidos por AIS e Ingeominas -IGM 21

Figura 3.10. Aceleraciones máximas del terreno PGA. Resultados de INGEOMINAS-UNAL y AIS....22

Figura 3.11. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos....24

Figura 3.12. Espectros promedio de señales y uniformes de amenaza....25

Figura 3.13. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos....26

Figura 3.14. Espectros de señales seleccionadas como representativas para la amenaza en la ciudad 27

Figura 4.1. Esquema metodológico de zonificación 29

Figura 4.2. Modelo tridimensional del terreno de la ciudad....31

Figura 4.3. Modelo tridimensional de pendientes del terreno de la ciudad 31

Figura 4.4. Mapa Geológico Ingeominas 1995 32

Figura 4.5. Localización de estudios geológicos de los cerros semi-detallados. 36

Figura 4.6. Mapa de Unidades Geotécnicas de Cerros Propuesto 37

Figura 4.7. Mapa Geotécnico Ingeominas 1988 41

Figura 4.8. Mapa Geotécnico Ingeominas 1997 42

Figura 4.9. Localización de exploraciones geotécnicas 43

Figura 4.10. Variación de la humedad natural promedio hasta 50 m de profundidad 45

Figura 4.11. Variación de la velocidad de onda de corte promedio hasta 50 m de profundidad 46

Figura 4.12. Mapa de perfiles típicos superficiales 47

Figura 4.13. Mapa de isoperíodos por microtrepidaciones 48

Figura 4.14. Interpretación geotécnica de unidades de abanicos aluviales 49

Figura 4.15. Mapa actualizado de zonificación geotécnica 51

Figura 4.16. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 127 a Cl 200 aprox. 53

Figura 4.17. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 13 a Cl 127 aprox. 53

Figura 4.18. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 36 sur a Cl 13 aprox. 54

Figura 4.19. Esquema geotécnico típico de una sección norte – sur entre Cr 72 a Cl 86 aprox. 54

Figura 4.20. Modelo de basamento rocoso actualizado por SCG y FOPAE 56

Figura 4.21. Isoperíodos de los modelos de respuesta actualizado con datos de UNIANDES y FOPAE 57

Figura 4.22. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica 59

Figura 5.1. Localización de estaciones de la RAB (DPAE, 2008) 62

Figura 5.2. Espectros normalizados de CBART 67

Figura 5.3. Espectros normalizados CUSAL 67

Figura 5.4. Espectros normalizados CUAGR Superficie 68

Figura 5.5. Espectros normalizados CFLOD 68

Figura 5.6. Espectros normalizados CGRAL Superficie 69

Figura 5.7. Relaciones espectrales CUAGR 70

Figura 5.8. Espectros de respuesta en los Down Hole 71

Figura 5.9. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona cerros 72

Figura 5.10. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona piedemonte 72

Figura 5.11. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona lacustre 72

Figura 5.12. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona aluvial 73

Figura 5.13. Distribución de aceleraciones máximas sismo de Quetame (DPAE, 2008) 74

Figura 5.14. Distribución del período natural del depósito sismo de Quetame (DPAE, 2008) 74

Figura 5.15. Relación entre el espesor del depósito y la velocidad de onda cortante promedio 77

Figura 5.16. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CUAGR 82

Figura 5.17. Espectro de respuesta y relaciones espectrales en CUAGR, CBOG1 y CGRAL 83

Figura 6.1. Localización de los modelos de respuesta 93

Figura 6.2. Distribución de los modelos de respuesta en cada zona 94

Figura 6.3. Curvas de degradación y amortiguamiento calculadas para la zona Lacustre 100 97

Figura 6.4. Espectros de respuesta perfil típico zona Lacustre 100 98

Figura 6.5. Relaciones espectrales perfil típico zona Lacustre 100 99

Figura 6.6. Funciones de Transferencia perfil típico zona Lacustre 100 99

Figura 6.7. Sección bidimensional de análisis Piedemonte A 100

Figura 6.8. Sección bidimensional de análisis Piedemonte B 101

Figura 6.9. Sección bidimensional de análisis Piedemonte C 101

Figura 6.10. Sección bidimensional de análisis Piedemonte C (acercamiento) 101
Figura 6.11. Curva dinámicas de los materiales modelo 2D 102
Figura 6.12. Metodología seguida en el modelamiento bidimensional.....103
Figura 6.13. Índice de calidad de las mallas de elemento finitos 105
Figura 6.14. Condiciones nodales introducidas en el programa.....105
Figura 6.15. Espectros de respuesta nodos del Piedemonte A.....106
Figura 6.16. Relaciones espectrales nodos del Piedemonte A 107
Figura 6.17. Relaciones espectrales promedio de Cerros.....108
Figura 6.18. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte A.....109
Figura 6.19. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte B.....109
Figura 6.20. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte C.....109
Figura 6.21. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 50.....110
Figura 6.22. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 100.....110
Figura 6.23. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 200.....111
Figura 6.24. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 300.....111
Figura 6.25. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 500.....112
Figura 6.26. Relaciones espectrales promedio de Lacustre Aluvial 200 112
Figura 6.27. Relaciones espectrales promedio de Lacustre Aluvial 300 113
Figura 6.28. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 50.....113
Figura 6.29. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 100.....114
Figura 6.30. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 200.....114
Figura 6.31. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 300.....115
Figura 7.1. Mapa de zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá 118
Figura 7.2. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.22, D=5%.....120
Figura 7.3. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.15, D=5%.....121
Figura 7.4. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.13, D=5%.....122

Figura 7.5. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.06, D=5%.....123

Figura 7.6. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico 125

Figura 7.7. Espectro de diseño de la zona Cerros y Piedemontes.....126

Figura 7.8. Espectro de diseño de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m..126

Figura 7.9. Espectro de diseño de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial de más de 200 m 127

Figura 7.10. Espectro de diseño de las zonas Aluviales 127

Figura 7.11. Curva de seguridad limitada para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico 128

Figura 7.12. Espectro de seguridad limitada de la zona Cerros y Piedemontes 129

Figura 7.13. Espectro de seguridad limitada de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m 130

Figura 7.14. Espectro de seguridad limitada de las zonas Lacustre-Aluvial de más de 200 m.....130

Figura 7.15. Espectro de seguridad limitada de las zonas Aluviales.....131

Figura 7.16. Curva de umbral de daño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 2% del crítico 132

Figura 7.17. Espectro de umbral de daño de la zona Cerros y Piedemontes 133

Figura 7.18. Espectro de umbral de daño zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m 133

Figura 7.19. Espectro de umbral de daño zonas Lacustre-Aluvial de más de 200 m 134

Figura 7.20. Espectro de umbral de daño zonas Aluviales 134

Figura 7.21. Espectro de zona de cerros con la zona 1 135

Figura 7.22. Espectro zonas de piedemonte con la zona 2.....136

Figura 7.23. Espectros zonas lacustre y lacustre-aluvial con la zona 3 136

Figura 7.24. Espectros zonas lacustre y lacustre-aluvial con la zona 4 137

Figura 7.25. Espectros zonas aluviales con la zona 5 137

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Amenaza sísmica tenida en cuenta en cada convenio.....11

Tabla 2.2. Modelo geotécnico tenido en cuenta en cada convenio.....12

Tabla 2.3. Métodos de análisis de respuesta del suelo empleados en cada convenio.....12

Tabla 2.4. Métodos de cálculo de espectros de respuesta en superficie empleados en cada convenio.....13

Tabla 2.5. Propuestas de actualización del mapa de zonificación sísmica.....13

Tabla 3.1. Desagragación de la amenaza para diferentes períodos de retorno (Ingeominas & Unal, 2010).....17

Tabla 3.2. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos (Adaptado de Martínez et al., 2002).....23

Tabla 3.3. Valores de Amax de las señales de diseño, promedios y desviaciones estándar de cada escenario. 25

Tabla 3.4. Señales seleccionadas como representativas de la amenaza en Bogotá.....26

Tabla 4.1. Descripción de las zonas geotécnicas 52

Tabla 4.2. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica 60

Tabla 5.1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos (DPAE, 2008) 63

Tabla 5.2. Eventos registrados por la RAB (DPAE, 2008) 64

Tabla 5.3. Clasificación de estaciones de acuerdo con las zonas geológicas y de respuesta sísmica.....66

Tabla 5.4. Parámetros sísmicos de los registros del sismo de Quetame en Bogotá, componente SH.....73

Tabla 5.5. Valores estimados de la velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca.....77

Tabla 5.6. Valores estimados de a y b para los tipos de suelos generales.....78

Tabla 5.7. Valores estimados de Vs_{ref} y b para los tipos de suelos generales.....78

Tabla 5.8. Valores estimados de amortiguamiento mínimo estimados 79

Tabla 5.9. Expresiones empleadas para calcular las curvas dinámicas 80

Tabla 5.10. Perfil geotécnico analizado en CUAGR.....81

Tabla 6.1. Sitios modelados por UNIANDES.....86

Tabla 6.2. Sitios modelados por SCG 88

Tabla 6.3. Sitios modelados por AIS 90

Tabla 6.4. Número de modelos por zona geotécnica de respuesta sísmica.....94

Tabla 6.5. Perfiles típicos modelados 1D 95

Tabla 6.6. Perfil típico zona Lacustre 100 96

Tabla 6.7. Propiedades dinámicas típicas zona Lacustre 100 96

Tabla 6.8. Propiedades dinámicas de los materiales modelo 2D.....102

Tabla 6.9. Relación de sismos empleados en la modelación 2D 104

Tabla 6.10. Aceleraciones consideradas para cálculo de relaciones espectrales 108

Tabla 7.1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica.....117

Tabla 7.2. Parámetros Ao, Fa y Fv para espectro de diseño 125

Tabla 7.3. Parámetros Fa y Fv para espectro de seguridad limitada.....129

Tabla 7.4. Parámetros Fa y Fv para espectro de umbral de daño 132

Tabla 7.5. Coeficientes y curva de diseño.....139

Tabla 7.6. Coeficientes y curva de seguridad limitada 140

Tabla 7.7. Coeficientes y curva de umbral de daño 141

GLOSARIO

Acelerógrafo: equipo electrónico de recogida de datos en tiempo real, equipado con sensores que miden la aceleración del terreno.

Acelerograma: registro de la variación temporal de las aceleraciones en un punto y en una dirección. Se obtiene de un acelerógrafo.

Amenaza sísmica: valor esperado de futuras acciones sísmicas y se expresa en términos de sus probabilidades de excedencia

Amortiguamiento: capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía

Basamento rocoso: espacio donde se encuentra las formaciones de roca, entendiendo como roca a material de velocidad de onda cortante superior a 750 m/s.

Espectro de respuesta: representación gráfica de los valores máximos de aceleración, velocidad o desplazamiento de osciladores de un grado de libertad para diferentes periodos de vibración.

Factores de amplificación: valor en el cual se modifica la demanda sísmica a causa de los suelos o efectos topográficos, para periodos de vibración cortos (Fa) y otro para periodos de vibración largos (Fv).

Función de transferencia: representación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo como medida de la amplificación que ocasiona para diferentes frecuencias de vibración.

Microtrepidaciones: ensayo geofísico que mide la vibración natural del terreno con sensores tipo acelerógrafos, con este ensayo es posible determinar los periodos de vibración natural de los depósitos.

Microzonificación sísmica: conjunto de actividades necesarias para determinar los niveles de amenaza símica y respuesta sísmica de los terrenos de un área de interés.

Periodo fundamental: tiempo que dura un elemento en hacer una oscilación libre, es función de la rigidez y masa.

Relación espectral: representación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo como medida de la amplificación que ocasiona para diferentes periodos de vibración.

Resonancia: aumento de la amplificación por la coincidencia de los periodos de vibración del medio incidente o suelo con el periodo de vibración del elemento o edificación.

Zonificación geotécnica, representación geográfica de áreas de homogéneo comportamiento geotécnico, es decir que guarden similitud de materiales y espesores.

Zonificación respuesta sísmica: representación geográfica de áreas de homogéneo comportamiento ante las ondas sísmicas, es decir que tengan similar amplificación y respuesta espectral.

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá desde el año 1993 adelantó los estudios de microzonificación sísmica de Bogotá, MZSB, a través de un convenio interadministrativo entre la Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias, UPES, (actual Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, DPAE), el Instituto de Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y la Universidad de los Andes, UNIANDES. Los resultados de dicho estudio fueron posteriormente adoptados mediante el Decreto 074 de 2001 y el Decreto 193 de 2006, en el cual se consignaron los principales resultados del estudio de microzonificación. En este Decreto se reglamentó la microzonificación sísmica de la ciudad, es decir se establecen las zonas con comportamiento sísmico similar y se especifican en cada una de ellas los requisitos de diseño sismo resistente que deben tenerse en cuenta para generar una confiabilidad uniforme en los diseños de cualquier tipo de edificación.

Han transcurrido más de una década desde que se publicaron los resultados finales del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, tiempo en el cual el estado del conocimiento ha avanzado considerablemente en diferentes aspectos; tal es el caso de las recientes metodologías para calcular la amenaza sísmica y seleccionar señales de diseño compatibles con los escenarios sísmicos, la nueva información geotécnica producto de estudios de efectos locales facultados en el Decreto 193 de 2006 y de proyectos importantes como el metro, nueva información sísmica local que se ha logrado recopilar en la Red de Acelerógrafos de Bogotá RAB desde su implementación en el año 1999, nuevos procesos y herramientas que permiten la optimización de los tiempos de cálculo numérico, el desarrollo de aplicaciones para el cálculo de la respuesta sísmica y el uso de sistemas de información geográfica.

Por lo anterior, la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias DPAE (actual FOPAE) desde finales del año 2005 a través del Ingeniero Fernando Ramírez (Director DPAE 2003 a 2006), la Ingeniera Diana Rubiano (Directora DPAE 2007) y el Ingeniero Guillermo Escobar (Actual Director FOPAE), se emprendieron labores encaminadas a actualizar la microzonificación sísmica de Bogotá, definiendo tres instancias para el desarrollo del estudio. En la primera parte se modificó el Decreto 074 de 2001 para involucrar aspectos importantes que estaban fuera de éste, como es el caso de la delimitación de las zonas y especificaciones para los estudios particulares de respuesta, proponiendo así el Decreto 193 de 2006. La segunda instancia corresponde a la actualización de la zonificación de la respuesta sísmica de la ciudad y de los espectros de diseño, con base en la información dispone, que corresponden a los resultados del presente informe. Finalmente se tiene prevista una fase final de largo plazo, en la que se estudie la neotectónica local y regional con el fin de estimar con menor incertidumbre los escenarios posibles de amenaza sísmica para la ciudad.

Como ya se indicó, el presente documento técnico presenta los resultados obtenidos en la segunda etapa del proyecto de actualización de la microzonificación, cuyos productos principales son la actualización del mapa geotécnico y de respuesta símica de Bogotá, en los cuales se definen las zonas de comportamiento uniforme desde los puntos de vista geotécnico y sísmico. Para ello, se empleó la información geotécnica y sísmica disponible y se realizaron convenios interadministrativos con la Sociedad Colombiana de Geotecnia SGC, la Universidad de los Andes UNIANDES y la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS, con el fin de evaluar en diferentes sitios y por diferentes metodologías, la respuesta sísmica de los depósitos de la ciudad. Adicionalmente se contó con la información disponible de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, se realizaron modelos calibrados de comportamiento dinámico y se incluyeron las observaciones realizadas a la versión preliminar de discusión presentada desde enero del año 2008.

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen nuevas metodologías para el cálculo de la respuesta de sitio ante un sismo y se cuenta con nueva información sísmica y geotécnica, todo esto permite detallar mejor los análisis de respuesta, dentro de lo cual se destaca:

- Las recientes metodologías para el cálculo probabilístico de la amenaza sísmica, desagregación en escenarios sísmicos y selección de señales compatibles con la amenaza.

- Información sísmica recopilada en la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB desde su implementación en el año 1999 hasta el año 2009, donde se destaca el sismo del 24 de mayo de 2008 con epicentro en Quetame Cundinamarca, el cual fue registrado por 30 estaciones de acelerógrafos de la ciudad de Bogotá.

- Información geotécnica producto de estudios de efectos locales de acuerdo con el Decreto 074 de 2001 y 193 de 2006, pues en el año 1997 se disponía de menos de 50 sitios con exploraciones iguales o superiores a 50 m mientras hoy en día se cuenta con más de 200 sondeos profundos.

- Información geotécnica de proyectos importantes como el metro y de infraestructura de la ciudad.

- Modelos de comportamiento dinámico y métodos de análisis numéricos de la respuesta de sitio y la optimización de los tiempos de cálculo numérico y el desarrollo de nuevas aplicaciones para el análisis de la respuesta sísmica.

- Avance de los sistemas de información geográfica e información cartográfica de la ciudad.

- Nuevo disposiciones de Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, reglamentado mediante el Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.

Luego de varios años de utilización de la normativa vigente se ha identificado una serie de aspectos que merecen ser revisados con respecto a las especificaciones dadas en el Decreto 193 de 2006, dado que estas pueden generar un impacto importante en el nivel de demanda sísmica de diseño de estructuras. Tales aspectos son los siguientes:

- La zonificación sísmica adoptada simplifica de manera importante el comportamiento real de los suelos de la ciudad y lleva a la necesidad de establecer especificaciones de diseño uniformes para zonas que no necesariamente presentan un comportamiento homogéneo.

- Los espectros de diseño especificados no tienen una confiabilidad uniforme para todos los períodos estructurales, lo que se presenta en la existencia de prolongadas mesetas y la falta de control en los desplazamientos espectrales.

- Los espectros de diseño pueden someterse a una serie de correcciones y ajustes con base en los espectros respuesta. Estas correcciones pueden incluir suavizados para eliminación de picos, consideración de la incertidumbre en la determinación del período estructural y consideraciones especiales de respuesta inelástica en suelos blandos.

- Las señales sísmicas empleadas en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá ha sido revisadas exhaustivamente, concluyendo que no representan adecuadamente los posibles escenarios sísmicos.

Todos los anteriores aspectos llevan a la necesidad de adelantar una serie de trabajos y actividades tendientes a actualizar los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

El objetivo general de estudio fue actualizar las componentes de amenaza sísmica, modelo geológico – geotécnico y respuesta sísmica del “Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá” con el fin de formular recomendaciones para la reglamentación de diseño sismo resistente de la ciudad.

1.2.2 Específicos

- Revisar los estudios mas recientes de amenaza sísmica de Colombia y adoptar para Bogotá los niveles de amenaza y señales para las modelaciones consistentes con dichos estudios.

- Compilar la información geotécnica recopilada por UNIANDES, SCG y DPAE, coberturas actualizadas del modelo digital del terreno, los mapas geológicos y geotécnicos anteriores, el modelo de basamento de roca, el mapa de iso-períodos y demás coberturas de información geográfica para generar un sistema de información geográfica para fines de actualizar la zonificación geotécnica de la ciudad.

- Realizar la actualización del modelo geotécnico de la ciudad, estableciendo la estratigrafía típica, comportamiento geotécnico y distribución espacial, lo cual se resume en el mapa de zonificación geotécnica

- Analizar e incorporar los resultados del estudio de procesamiento e interpretación de señales registradas por la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB.

- Organizar y analizar mediante el cálculo de relaciones espectrales de los resultados de las modelaciones de la respuesta de sitio realizadas por la DPAE, UNIANDES, SCG y AIS. A partir de la calibración de parámetros dinámicos realizada con los registros de la RAB, modelar la respuesta sísmica unidimensional y bidimensional.

- Comparar los resultados de respuesta sísmica del terreno obtenidos a partir de las cuatro fuentes de análisis y sintetizar en un modelo común los aspectos relevantes de cada método con el fin de proponer una zonificación de respuesta sísmica.

- Generar recomendaciones para la implementación de los resultados y resumir aspectos importantes que se deben tener en cuenta en la reglamentación.

1.3 ALCANCE

El presente informe analiza los aspectos relacionados con la respuesta local de los depósitos de la ciudad ante un sismo, para lo cual se parte de la amenaza sísmica reportada en estudios nacionales y la información geotécnica disponible de la ciudad.

En esta etapa de actualización de la microzonificación sísmica no se hacen estudios detallados de geología, neotectónica y sismicidad de las fallas cercanas con alto grado de incertidumbre, puesto que está actividad demandaría de mayores recursos, tiempo y participación de INGEOMINAS quien es la entidad con mayor competencia en este tema.

1.4 MARCO LÓGICO DE ACTIVIDADES

Para concebir los objetivos propuestos se estableció el diagrama metodológico que se ilustra en la **Figura 1.1**, con el cual se definió el orden de las actividades que se realizaron y la interacción con cada frente de trabajo. A continuación se resumen las principales actividades.

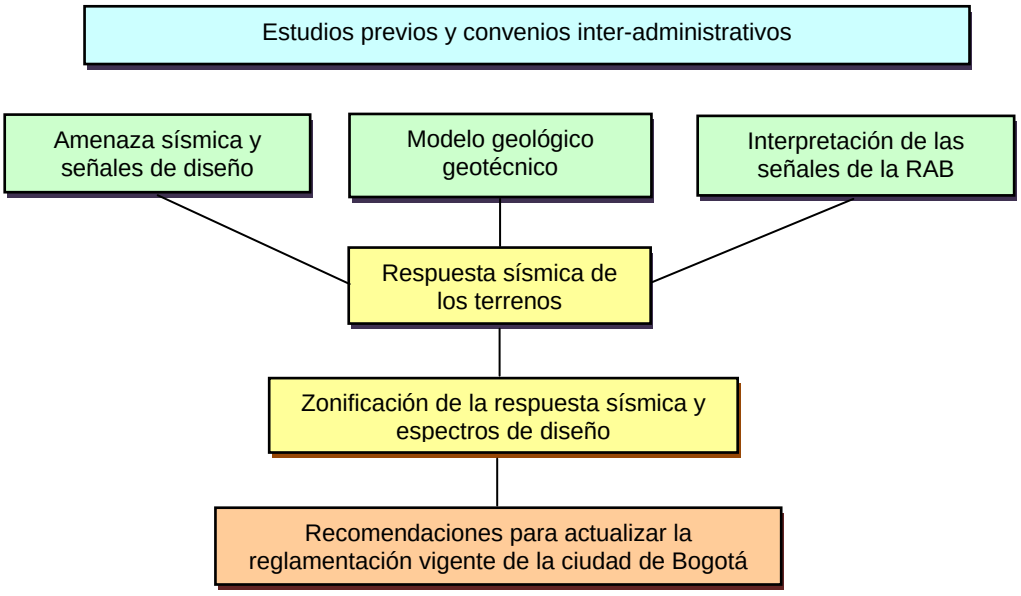


Figura 1.1. Marco lógico de actividades

1.4.1 Estudios previos y convenios inter-administrativos

Esta actividad incluyó la revisión de los aspectos generales de los estudios que se tuvieron en cuenta para la zonificación de la respuesta sísmica de la ciudad. Fundamentalmente, se revisó inicialmente el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (1997), MZSB, y los aportes más importantes realizados por Ingeominas, en los últimos años sobre este tema. Posteriormente, la DPAE realizó convenios interadministrativos con la Universidad de los Andes, la Asociación de Ingeniería Sísmica y la Sociedad Colombiana de Geotecnia con diferentes objetos particulares, buscando en conjunto complementar la información geotécnica y modelar la respuesta de sitio de acuerdo a las distintas metodologías existentes.

1.4.2 Amenaza sísmica y señales de Diseño

En esta fase se analizan y adoptan los valores de amenaza sísmica total y desagregada para el estudio, y las señales sísmicas empleadas en las modelaciones de la respuesta de sitio con base en la revisión de los estudios de amenaza previos como la microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997), selección de señales sísmicas compatibles con la amenaza (Martínez et al, 2002), el estudio de actualización de la información sísmica de Bogotá, realizado por la Universidad de los Andes (Uniandes, 2006), el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 2009) y el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (Ingeominas y Unal, 2010).

1.4.3 Modelo geológico geotécnico

En esta etapa se realizan los análisis geotécnicos para concebir un modelo geológico – geotécnico de los depósitos de la ciudad de Bogotá, para ello se emplean herramientas del sistema de información geográfica para lograr procesar la gran cantidad de información y facilitar así su interpretación. Los resultados obtenidos ofrecen un modelo que se resume en los mapas de zonificación geotécnica y zonificación geotécnica para respuesta sísmica, con los cuales se abordaran los resultados de los análisis de respuesta de sitio.

1.4.4 Interpretación de señales de la RAB

En esta actividad se muestran los resultados obtenidos de los procesamientos e interpretaciones realizadas con los registros recopilados por la RAB, particularmente se analiza: la respuesta espectral de cada una de las estaciones; la relación espectral de la propagación de la onda sísmica desde la roca hasta la superficie, a partir de los acelerógrafos instalados en el contacto con el basamento rocoso; y la variación espacial de aceleración máxima, duración de la fase intensa y período fundamental de vibración.

Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos de la calibración realizada a los modelos de respuesta unidimensionales de los sitios con acelerógrafos en profundidad; con lo cual se estimaron algunas de las propiedades dinámicas y se emplearon modelos de degradación del módulo y amortiguamiento recientemente desarrollados.

1.4.5 Respuesta dinámica de los terrenos

En esta etapa se analizan los resultados obtenidos en las modelaciones de respuesta dinámica realizadas en los convenios con la Universidad de los Andes, la Asociación de Ingeniería Sísmica y la Sociedad Colombiana de Geotecnia. Complementariamente a los

resultados de los convenios, se realizan modelaciones unidimensiones y bidimensionales para perfiles típicos que fueron calibrados a partir de la respuesta registrada por la RAB en el sismo de Quetame de 2008.

Con base en los resultados de las modelaciones realizadas por las diferentes técnicas se establece la respuesta sísmica para cada zona de respuesta sísmica por medio relaciones espectrales (Respuesta espectral en superficie dividido la respuesta espectral en roca) para diferentes niveles de amenaza (aceleración). Es importante mencionar que empleando la técnica de relaciones espectrales se obtiene en "limpio" el efecto del suelo y de este modo se descartan los posibles problemas que contengan las señales empleadas en las modelaciones (escalamiento y efectos de sitio de la estación).

1.4.6 Zonificación de la respuesta sísmica y espectros de diseño

A partir del espectro uniforme de amenaza en roca adoptado, el modelo geológico geotécnico, la respuesta sísmica de cada zona obtenida, se define el mapa de zonificación de la respuesta sísmica junto con los espectros uniformes de amenaza en superficie encontrados para cada una de las zonas propuestas.

Finalmente, se calculan los factores de amplificación requeridos para la construcción de las curvas de diseño de edificaciones conforme se define por la NSR-10 para cada una de las zonas de respuesta sísmica de la ciudad.

1.4.7 Recomendaciones para la reglamentación

De acuerdo a todo lo encontrado, se proponen una serie de aspectos que corresponden a los más importantes y que deben ser tenidos en cuenta para la actualización de la norma. Básicamente, se refiere a los siguientes puntos: Mapa de zonificación de la respuesta sísmica, reclasificaciones, estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura, espectros de diseño, diseño de edificaciones, diseño de cimentaciones, análisis de estabilidad de taludes, diseño de infraestructura.

CAPITULO 2

2 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS

Se presentan en este capítulo los aspectos generales de los estudios que se tuvieron en cuenta para la zonificación de la respuesta sísmica de la ciudad para el diseño sismo resistente de edificaciones. Fundamentalmente se revisó inicialmente el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (1997), MZSB, y los aportes más importantes realizados por Ingeominas en los últimos años sobre este tema, a partir de esta información se definió la necesidad de actualizar la respuesta sísmica del depósito de la cuidad. Posteriormente el FOPAE realizó tres convenios inter-administrativos con el propósito aunar esfuerzos para complementar la información geotécnica y modelar la respuesta de sitio de acuerdo a las distintas metodologías existentes. Para finamente desarrollar un estudio integral con la información y participación de cada convenio.

A continuación se resume la información que se tuvo en cuenta y los aspectos generales de los convenios realizados en el marco de la actualización para la zonificación de la respuesta sísmica de Bogota.

2.1 ESTUDIO BASE E INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

2.1.1 Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB

La información del proyecto de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997) fue el punto de partida de los análisis realizados, específicamente se tuvieron en cuenta los siguientes subproyectos:

- Subproyecto 2. Estudios Geológicos
- Subproyecto 6. Microtrepidaciones
- Subproyecto 7. Estudios Geofísicos
- Subproyecto 8. Información Geotécnica
- Subproyecto 9. Ejecución de sondeos
- Subproyecto 10. Ensayos de Laboratorio y de Campo – Zonificación Geotécnica
- Subproyecto 11. Microzonificación Sísmica

Es importante aclarar que dentro de los alcances de este estudio no se incluye una actualización de los estudios de tectónica, neotéctonica y sismicidad regional o local, pues estos temas son de más largo plazo y se podrán en una fase futura, con la participación de otras entidades, entre ellas necesariamente INGEOMINAS.

2.1.2 Señales sísmicas compatibles con la amenaza

Después de publicado el estudio de MZSB en el año 1997, Ingeominas ha continuado estudiando la amenaza sísmica del país. En el año 2002 se publicó en el IX Congreso y IV Seminario Colombianos de Geotecnia, el artículo "Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: casos aplicados a Colombia" (Martínez A., Alvarado C, Rubiano D., 2002), en este artículo se recomiendan las señales sísmicas compatibles con la amenaza que pueden emplearse para modelar la respuesta de sitio en varias ciudades de Colombia, incluida Bogotá.

2.1.3 Información cartográfica y catastral de la ciudad

En el centro de documentación del FOPAE se encuentra información cartográfica y catastral de la ciudad, la cual está debidamente homologada en el sistema de información geográfica. Dentro de esta información se destaca la siguiente:

- Modelo digital del terreno
- Imagen satelital spot (2005)
- Mapa geológico de Bogotá (1997)
- Mapa de geología de cerros de Bogotá (1999)
- Mapa de espesor de sedimentos (1997)
- Mapa geotécnico de Bogotá (1997)
- Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá (1997 y 2001)
- Mapa de la red de drenajes y vial
- Mapa de manzanas, upz y localidades

2.1.4 Estudios de amenaza sísmica de Colombia

Con el fin de actualizar las Normas Colombianas de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS 2010), el comité AIS-300 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica de Colombia realizó el "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009". De igual manera INGEOMINAS en convenio con la Universidad Nacional adelanto el "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia". Como producto de estos dos estudios se adopto en la NSR-10 el Mapa de Zonificación Sísmica de Colombia que se muestra en la **Figura 2.1.**

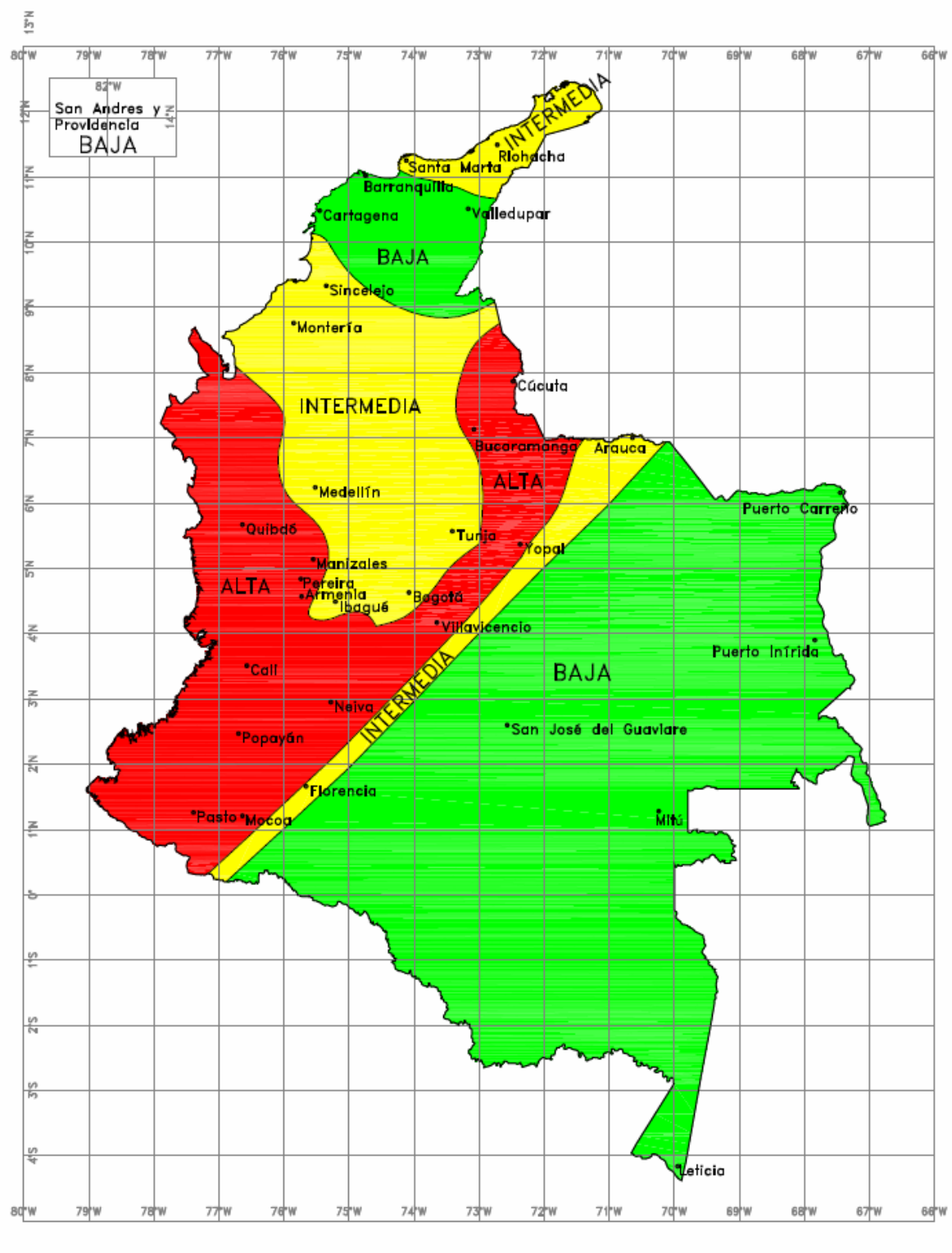


Figura 2.1. Mapa de zonificación sísmica de Colombia (AIS, 2009)

2.2 CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS

Se realizaron tres convenios inter-administrativos con el propósito aunar esfuerzos para modelar la respuesta de sitio de los depósitos de la ciudad de acuerdo con las distintas metodologías existentes, contar con la experiencia de las agregaciones reconocidas en Colombia en este tema y ver de manera integral el problema. A continuación se presentan los objetivos y los aspectos técnicos de cada uno de los convenios:

2.2.1 Convenio de cooperación 667 de 2005 FOPAE – UNIANDES.

- Realizar nuevas evaluaciones de amenaza incluyendo la respuesta dinámica del subsuelo para generar espectros de amenaza uniforme consistentes.

- Revisar la información disponible y presentar una nueva propuesta de zonificación de la ciudad.

- Implementar el sistema SISBog V1.0 el cual permitirá la visualización de todos los resultados de los análisis de amenaza realizados.

2.2.2 Convenio de cooperación 460 de 2006 FOPAE – SCG.

- Proponer un modelo geotécnico para la ciudad.

- Evaluar, mediante análisis bidimensional la respuesta sísmica del subsuelo.

- Revisar la microzonificación vigente para la ciudad y presentar propuesta de actualización.

2.2.3 Convenio de cooperación 487 de 2006 FOPAE – AIS:

- Realizar análisis unidimensionales, considerando el comportamiento no lineal del subsuelo.

- Evaluar el efecto en posibles períodos estructurales involucrados, determinando situaciones críticas que se lleguen a presentar.

- Hacer la revisión y propuesta de la zonificación sísmica de la cuidad.

2.2.4 Resumen de resultados de los convenios

Los aspectos más importantes que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de cada uno de los trabajos realizados se presentan de manera comparativa de la **Tabla 2.1** a la **Tabla 2.5**, donde se puede apreciar en general el tratamiento de los principales aspectos que contribuyen a la definición del mapa de zonificación de la respuesta sísmica y los espectros de respuesta, tales como: las consideraciones sobre la amenaza sísmica, el modelo geotécnico, el método de análisis, la forma de obtener el espectro de diseño y la zonificación sísmica. De este modo se logra identificar las bondades y limitaciones de cada uno de los trabajos, para así fortalecer los criterios de decisión a la hora de combinar o escoger la opción más acertada desde el punto de vista técnico.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Amenaza en roca	EUA – Variable para la ciudad. Recomienda los siguientes valores Total: 0.175g Cercano: 0.187g Intermedio: 0.165g Lejano: 0.038g	MZSB-97 Total: 0.20g Cercano: 0.25g Intermedio: 0.20g Lejano: 0.038g	Recalcula períodos de retorno Recomienda no escalar las señales Valores Promedio Cercano: 0.12g Intermedio: 0.08g Lejano: 0.032g
Señales	INGEOMINAS sin escalar	INGEOMINAS escaladas	INGEOMINAS sin escalar

Tabla 2.1. Amenaza sísmica tenida en cuenta en cada convenio

Como se aprecia en la tabla anterior, la metodología de UNIANDES contempló la reevaluación de la amenaza sísmica considerando los mismos parámetros sísmicos del estudio de MSZB pero empleó un método de cálculo diferente, obteniendo de este modo Espectros Uniformes de Amenaza (EUA) y valores desagregados de amenaza para cada escenario sísmico analizado (Local o cercano, Regional o intermedio y Subducción o lejano). En el caso de AIS se trabajó con los valores desagregados de amenaza reportados en el estudio MZSB y con las señales recomendadas por INGEOMINAS. Finalmente, el grupo de la SCG recomendó trabajar con las señales de INGEOMINAS sin escalar, sustentando esta decisión principalmente en los problemas numéricos que se ocasionan en las modelaciones bidimensionales al escalar las señales.

Con estos tres enfoques, se logró considerar las diferentes maneras como se puede abordar las modelaciones con las señales de diseño recomendadas, dado que el efecto del escalamiento o no escalamiento de las señales de diseño ha sido controvertido.

Sin embargo, es pertinente aclarar, que las señales seleccionadas por Ingeominas son el resultado de aplicar la metodología propuesta por Bommer (2000), en la cual la selección de señales sísmicas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos deben ser escaladas a los niveles de amenaza de diseño, siempre y cuando se cumpla con ciertas condiciones. La recomendación de Bommer está basada en que las señales compatibles con la amenaza son representativas en magnitud y distancia, logrando así un contenido frecuencial, duración y magnitud acordes con la fuentes estudiada, por lo cual el escalamiento en amplitud de este tipo de señales es razonable (Martínez et al., 2002 y Bommer J., 2000).

En cuanto a los perfiles estratigráficos y propiedades dinámicas del depósito, cada grupo en general empleó un modelo geotécnico similar, las diferencias encontradas están principalmente en los criterios que cada cual desarrolló para extrapolar información y en las curvas de degradación de materiales particulares como suelos residuales, gravas y turbas.

Para involucrar los diferentes métodos de análisis que se emplean comúnmente en la evaluación de la respuesta de sitio, cada grupo realizó las modelaciones como se indica en la **Tabla 2.3**. De esta manera se buscó que cada método fuese complementario de los otros, por ejemplo, los modelos basados en el espectro uniforme de amenaza tienen la bondad que no dependen de las señales de diseño, por lo cual estos espectros no presentan formas espectrales con picos marcados que son propios de la señal escogida y no necesariamente representan la condición de amenaza estudiada. Por otro lado, los modelos unidimensionales que consideran la variación de los parámetros geotécnicos y la señal de diseño pueden ser más representativos de las condiciones in situ, puesto que se

maneja estadísticamente la incertidumbre producida por la variación de estos dos aspectos.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Perfil estratigráfico	MSZB-97, Estudios de Efectos Locales, Proyecto Metro y otros	Estudios de efectos locales y algunos de MSZB-97	Estudios de efectos locales, algunos de MSZB-97
Método de extrapolación del perfil	Perfiles profundos de acuerdo con la zona hasta la roca	Perfiles profundos de acuerdo con la zona y arenas de la formación Subachoque hasta la roca	Perfiles profundos de acuerdo con la zona y arenas de la formación Subachoque hasta la roca
Velocidad de onda	Mediciones in situ y ecuaciones empíricas de acuerdo con el tipo de material	Mediciones in situ y correlaciones con la profundidad a partir de análisis estadísticos de las mediciones de Down Hole	Correlación con la profundidad para zonas lacustre y ecuaciones empíricas para las demás zonas
Curvas dinámicas	Arcillas: Adaptadas de las modificadas de Ishibashi por SCG Arenas: Seed e Idriss Dmin: 3 y 1.5%	Arcillas: Modificadas de Ishibashi Arenas: Seed e Idriss Residual: Leog Dmin: 1.5%	Arcillas: Modificadas de Ishibashi y MZB-97 Arenas: Seed e Idriss Gravas: Rollins Coluvión: Ingeniería y Georiesgos Turba: Moreno Dmin: 1.5 – 5%

Tabla 2.2. Modelo geotécnico tenido en cuenta en cada convenio

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Software	Tipo Shake unidimensional	Tipo Shake unidimensional	Quad4m y Quake bidimensional
Modelo constitutivo	Lineal equivalente con amortiguamiento histerético	Lineal equivalente con amortiguamiento histerético	Lineal equivalente con esquema de amortiguamiento de Rayleigh e histerético
Tratamiento de la incertidumbre de los parámetros	Ninguna	Análisis estadístico con 30 modelos de un mismo perfil variando propiedades y señales	Ninguna
Representación de la respuesta del suelo	Funciones de Transferencia (FT) promedio por cada nivel de amenaza	Relaciones Espectrales (ER)	Funciones de Transferencia (FT) y Relaciones Espectrales (ER) por fuente sísmica con diferentes Amax

Tabla 2.3. Métodos de análisis de respuesta del suelo empleados en cada convenio

Finalmente, los modelos bidimensionales consideran, además de las propiedades geotécnicas, la geometría del depósito y su interrelación con la roca, en ellos se puede apreciar las amplificaciones producidas por los efectos topográficos y el efecto de las ondas superficiales, aspectos que no se logran evaluar en los modelos unidimensionales.

En resumen cada uno de los métodos de análisis realizados son complementarios, por lo cual la zonificación y espectros de diseño será una de las más completas de acuerdo con el estado del arte en este tema.

En el cuadro siguiente (**Tabla 2.4**) se aprecia que para determinar los espectros de diseño se consideraron básicamente los espectros de respuesta de cada sitio modelado, teniendo en cuenta que si se trabajó con los valores de amenaza desagregada de la MZSB el espectro propuesto se define a partir del valor promedio de las respuestas y en

el caso de que las señales no se escalaron se define a partir del promedio y la desviación estándar.

Además, es bueno aclarar que en el estudio de UNIANDES, el espectro uniforme de Amenaza EUA, no considera la fuente cercana por la falta de parámetros sismológicos y tectónicos, por ello lo involucra esta fuente de manera determinística.

Las propuestas de espectros de diseño están dadas en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral, logrando así coherencia de los resultados.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Espectro de Respuesta en superficie (ERs)	ERs= EUA x FT Para aceleración, velocidad y desplazamiento	ERs = Señal escalada x Modelos 1D Para aceleraciones	ERs = Señal sin escalar x Modelo 2D Para aceleraciones Análisis de señales RAB
Espectro de Diseño (ED)	ED = ERs suavizado + efecto fuente cercana	Promedios de las respuestas en superficie.	Promedio mas desviación ponderada de las respuestas en superficie de cada fuente
Limitaciones	Valido hasta T<2.5 segundos.	Valido hasta T<3 segundos	Valido hasta T<3 segundos

Nota: EUA: Espectro Uniforme de Amenaza, FT: Función de Transferencia, T: Período

Tabla 2.4. Métodos de cálculo de espectros de respuesta en superficie empleados en cada convenio

El estudio realizado por UNIANDES realizó una propuesta de zonificación sísmica para Bogotá (**Tabla 2.5**), debido a que era el único grupo que cubría este objetivo. Esta propuesta se elaboró por medio de cruces de información del proyecto MZSB y los modelos de respuesta que realizaron, por lo que obtuvieron polígonos o zonas de respuesta sísmica homogénea. Sin embargo, esta propuesta no contempló la información de la SCG, AIS y DPAE; por lo cual, fue necesaria la actualización de la zonificación sísmica teniendo en cuenta toda la información disponible.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Metodología para obtener las zonas	Cruce temático de: Geología, Geotecnia, Espesores, Isoperíodos y Respuestas espectrales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales
Tipo de Zonas	Interpolación espacial de parámetros espectrales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales.
Modo de consulta	Módulo de consulta SisBog V1.0	Fuera de alcance del estudio	Fuera de alcance del estudio

Tabla 2.5. Propuestas de actualización del mapa de zonificación sísmica

Los convenios con AIS y SCG consideraron las zonas actuales del estudio MZSB para agrupar los resultados de las modelaciones, logrando así detectar que la variación de las respuestas espectrales es apreciable en cada zona, por ello cuando se definieron espectros de diseño a partir de la envolvente de los resultados de las zonas actuales resulta ser una condición demasiado conservadora, lo que lleva a que se sobreestimen las demandas. Lo anterior es una razón más por la cual era necesaria la actualización de las zonas de respuesta sísmica homogénea.

CAPITULO 3

3 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO

En el presente capítulo se resumen los valores de amenaza sísmica total y desagregada adoptados en este estudio, junto con las señales sísmicas que se emplearon en las modelaciones de la respuesta de sitio. Los estudios que se tuvieron en cuenta para tal fin son el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997), selección de señales sísmicas compatibles con la amenaza (Martínez et al, 2002), el estudio de actualización de la información sísmica de Bogotá, realizado por la Universidad de los Andes (Uniandes, 2006), el estudio general de amenaza sísmica de Colombia realizado por AIS (2009) e igualmente elaborado por Ingeominas y Unal (2010). Para información más detallada, se remite al lector a dichos documentos.

Los estudios de Ingeominas-Unal y la AIS realizaron la evaluación de la amenaza con la información y herramientas de cálculo mas actuales, se empleó el programa CRISIS2007, el cual calcula la amenaza usando un modelo probabilístico que considera las tasas de ocurrencia, características de atenuación y distribución geográfica de sismos. Adicionalmente, este programa permite modelar las fuentes como áreas, líneas o puntos ya que asume que dentro de una fuente, la sismicidad es distribuida por unidad de área, por unidad de longitud o en puntos específicos. A continuación se describen los principales aspectos de cada uno de los estudios citados.

3.1 ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA (INGEOMINAS & UNAL, 2010)

Con el fin de elaborar un mapa de amenaza sísmica de Colombia, que proporcionará información básica en cuanto al movimiento probable en roca, el Ingeominas en convenio con la Universidad Nacional de Colombia desarrolló el “Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia”, insumo fundamental para el reglamento de colombiano de construcciones sismo resistentes – NSR10 y los estudios de microzonificación sísmica que se deben adelantar en las ciudades de más de 100.000 habitantes.

Para la realización de este trabajo, se utilizaron los resultados de los estudios de microzonificación sísmica previos de Bogotá, Medellín, Cali y Villavicencio, así como también la información adquirida por las nuevas redes instrumentales entre 1993 – 2008, información geofísica, información de estructuras tectónicas con actividad reciente y datos de velocidad de movimientos tectónicos, entre otros.

Es importante mencionar que los resultados del estudio de Ingeominas-Unal tienen como punto de referencia la plaza de Bolívar.

3.1.1 Amenaza sísmica total y desagregada

Para calcular la amenaza sísmica se utilizaron varias ecuaciones de atenuación de acuerdo con los tipos de fuentes sísmicas. De acuerdo a este estudio, para Colombia se identificaron un total de 48 fuentes sísmicas que contribuyen a la amenaza, 39 de ellas son de tipo cortical, 3 son de tipo subducción, 4 son profundas y se consideraron 2 fuentes de tipo área. De esas 48 fuentes se identificaron 5 fuentes que se constituyen como las de mayor contribución a la amenaza total en la ciudad de Bogotá, y corresponden a: Guaicaramo Servitá, Quetame Santa María Soápaga, Honda Suarez, Algeciras Altamira y Benioff, de las cuales la amenaza está prácticamente controlada por la actividad de Quetame Santa María Soápaga. En la **Figura 3.1**, se observan las curvas de amenaza correspondientes a cada una de estas fuentes y la amenaza total. Estas curvas presentan la tasa de excedencia anual con la que se excede un nivel de aceleración determinado.

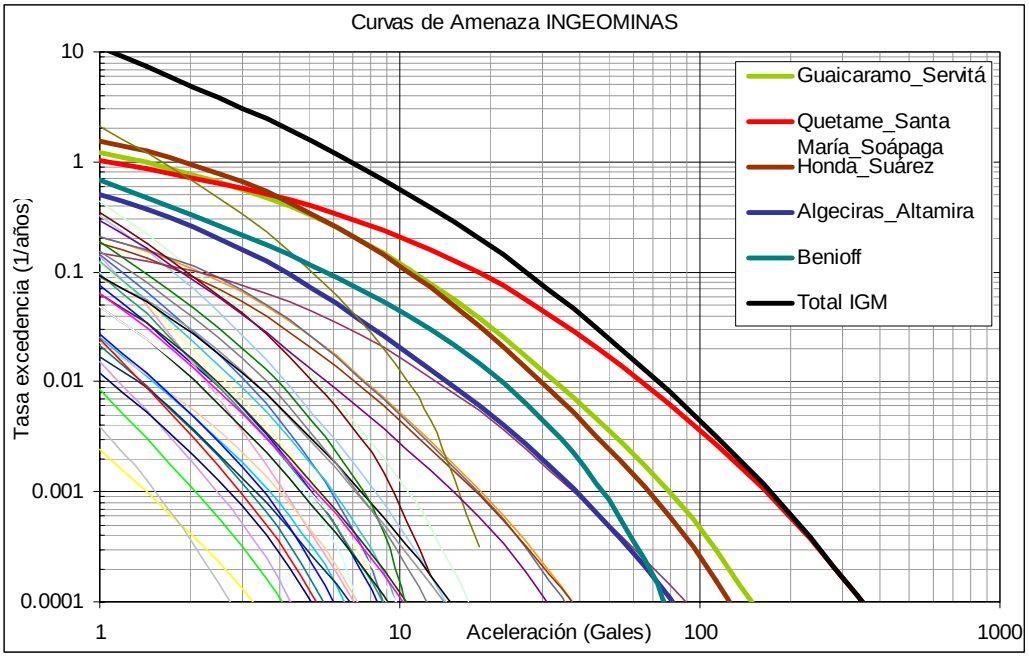


Figura 3.1. Curvas de amenaza de distintas fuentes para Bogotá. (Ingeominas & Unal, 2010)

Como parte de las actividades desarrolladas en este estudio se calculó la amenaza en términos de un Espectro Uniforme de Amenaza, EUA, que define para diferentes períodos de vibración el valor de amenaza en términos de aceleración espectral. Se denomina uniforme porque cada ordenada o valor de amenaza del espectro tiene el mismo período de retorno. En la **Figura 3.2** se ilustran los EUA para la Cuidad de Bogotá para varios períodos de retorno.

Para efectos de diseño de edificaciones convencionales, se suele utilizar un nivel de amenaza correspondiente a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, lo cual representa un período de retorno de 475 años. Por tal razón, en la **Figura 3.3**, se presentan los espectros de amenaza uniformes correspondientes a las fuentes de mayor contribución a la amenaza en la ciudad y el espectro de amenaza uniforme total. Se puede notar que el EUA total es muy similar al producido por la fuente Quetame Santa

María Soápaga. De igual manera, se observa que el valor para la aceleración máxima del terreno es del orden de 130 gales.

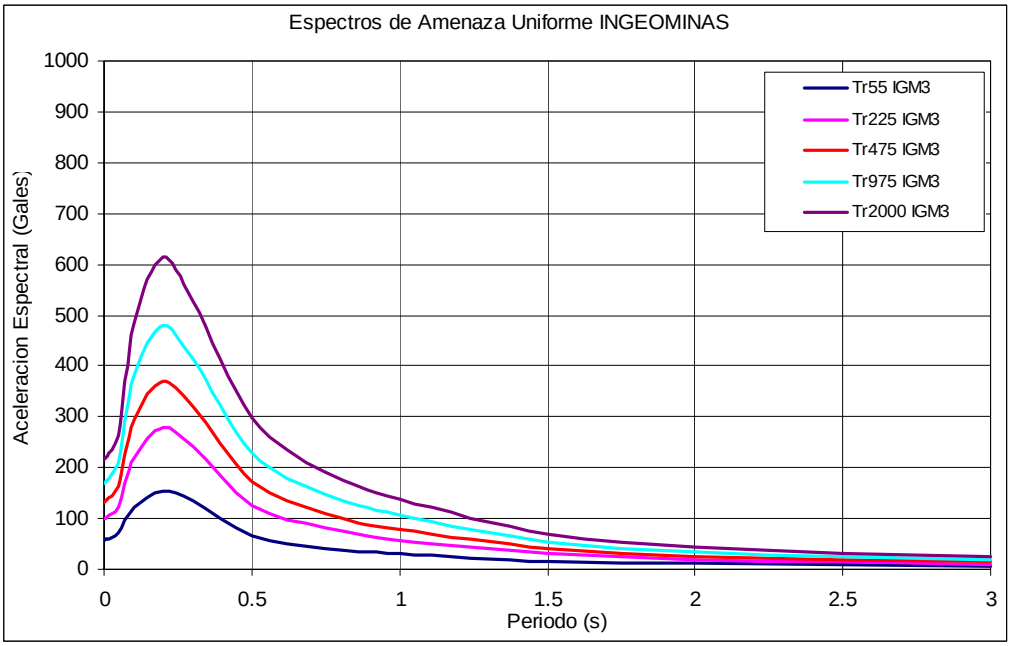


Figura 3.2. Espectros de Amenaza Uniforme por tasa de retorno (Ingeominas & Unal, 2010)

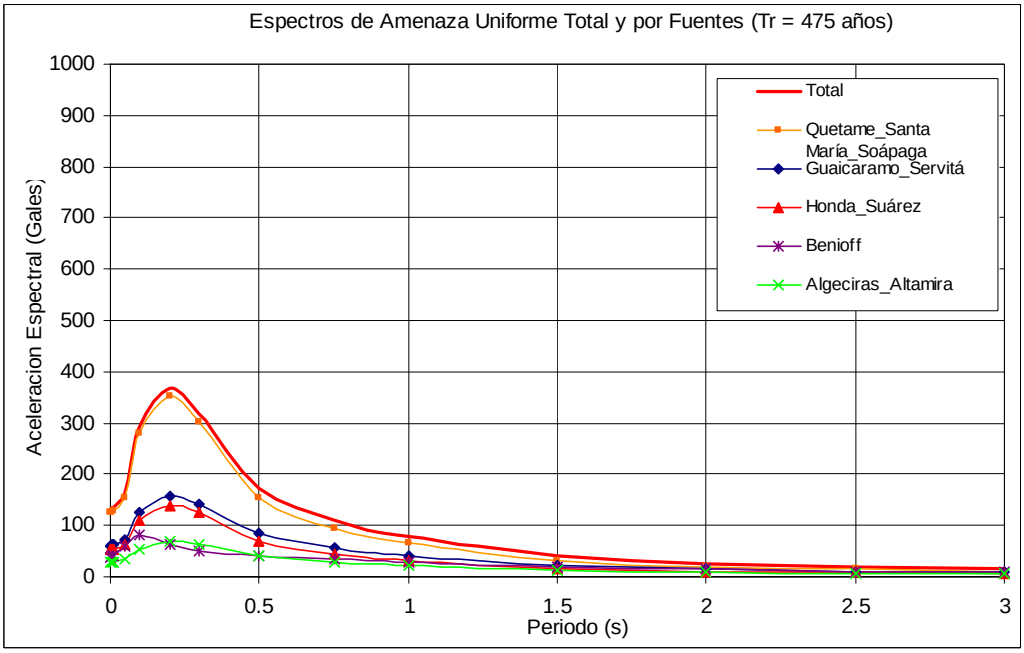


Figura 3.3. Espectro de amenaza uniforme por fuentes (Ingeominas & Unal, 2010)

3.1.2 Desagregación

Para identificar los eventos que controlan la amenaza en un análisis probabilístico, es necesario llevar a cabo un procedimiento de desagregación. Por medio de este, se puede

saber cual es/son el/los evento/s que más contribuyen a la amenaza, para varios períodos estructurales. Para el caso de Bogotá se obtuvieron los resultados mostrados en **Tabla 3.1**. En estas tablas se resalta que las mayores contribuciones en las parejas de magnitud, distancia.

Desagregacion IGM

Periodo de retorno											
225											
Periodo estructural											
0.001		0.2		0.5		0.75		1		2	
M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)
6,5-7	27-33	6,5-7	24-36	5-6,8	24-42	5,2-6,8	24-42	5,2-6,8	24-42	5,5-6,8	24-42
				5,7-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	6,0-6,8	45-51
				6-6,8	57-63	6-6,8	57-63	6-6,8	57-63	6-6,8	57-63
										6-6,8	63-69
										7,3-7,5	225-233

Periodo de retorno											
475											
Periodo estructural											
0.001		0.2		0.5		0.75		1		2	
M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)
6,5-6,8	21-27	6,5-7	24-33	5-6,8	24-42	5,2-6,8	24-42	5,5-6,8	24-42	5,7-6,8	24-42
				5,7-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	6,0-6,8	45-51
				6-6,8	57-63	6,0-7,0	57-63	6-6,8	57-63	6-6,8	57-63
										6-6,8	63-69
										7,3-7,5	210-216

Periodo de retorno											
975											
Periodo estructural											
0.001		0.2		0.5		0.75		1		2	
M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)	M (Mw)	R(km)
5,2-6,8	24-42	6,5-6,8	21-24	5,0-6,8	24-42	5,2-6,8	24-42	5,5-6,8	24-42	5,7-6,8	24-42
				6,3-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	5,7-6,8	45-51	6,0-6,8	45-51
				6,3-7,0	57-63	6,0-7,0	57-63	6,0-7,0	57-63	6-7,0	57-63
										6-7,0	63-69

Tabla 3.1. Desagragación de la amenaza para diferentes períodos de retorno (Ingeominas & Unal, 2010)

3.2 ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA (AIS, 2009)

La Asociación de Ingeniería Sísmica – Comité AIS-300 realizó una serie de nuevas evaluaciones de amenaza sísmica del país incluidos en el documento Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Este informe, corresponde a la nueva versión del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, realizado con fines de diseño y construcción sismo resistente. El Comité AIS-300 contó con la participación de un amplio número de profesionales de la AIS y el decidido apoyo técnico de la Universidad de los Andes, de varias sedes de la Universidad Nacional de Colombia y de la Universidad EAFIT. Este documento actualiza la versión de 1996 (AIS 1996) que en su momento sirvió de base para las Normas NSR-98, adicionalmente emplea una nueva metodología de cálculo de la amenaza sísmica y nueva información acerca de la tectónica y de los eventos sísmicos ocurridos en el territorio nacional en los últimos años.

Es importante mencionar que los resultados del estudio de AIS tienen como punto de referencia el centroide del área del distrito, el cual está localizado al sur oriente de la zona urbana. Este punto de análisis se encuentra mas cerca de la Falla Frontal, por lo cual los valores de amenaza que se muestran a continuación son superiores a los de Ingominas-Unal.

3.2.1 Amenaza sísmica total y desagregada

Para calcular la amenaza sísmica se modificaron las ecuaciones de Campbell (strike) y Campbell (reverse), para ajustar los datos al caso colombiano, y emplearlas para fallas de tipo cortical, subducción y Benioff. De la misma manera se emplearon las ecuaciones propuestas por Gallego, las cuales fueron obtenidas específicamente para el caso colombiano. Para el país se identificaron un total de 35 fuentes sísmicas que contribuyen a la amenaza, cuyas curvas de amenaza se muestran en la **Figura 3.4**.

De esas 35 fuentes se identificaron 5 fuentes que se constituyen como las de mayor contribución a la amenaza total en la ciudad; Frontal de la Cordillera Oriental Centro, Benioff Intermedia II, Salinas, Benioff Profunda y Subducción Centro, en donde se puede observar que la amenaza en Bogotá está prácticamente controlada por la actividad de la Falla Frontal.

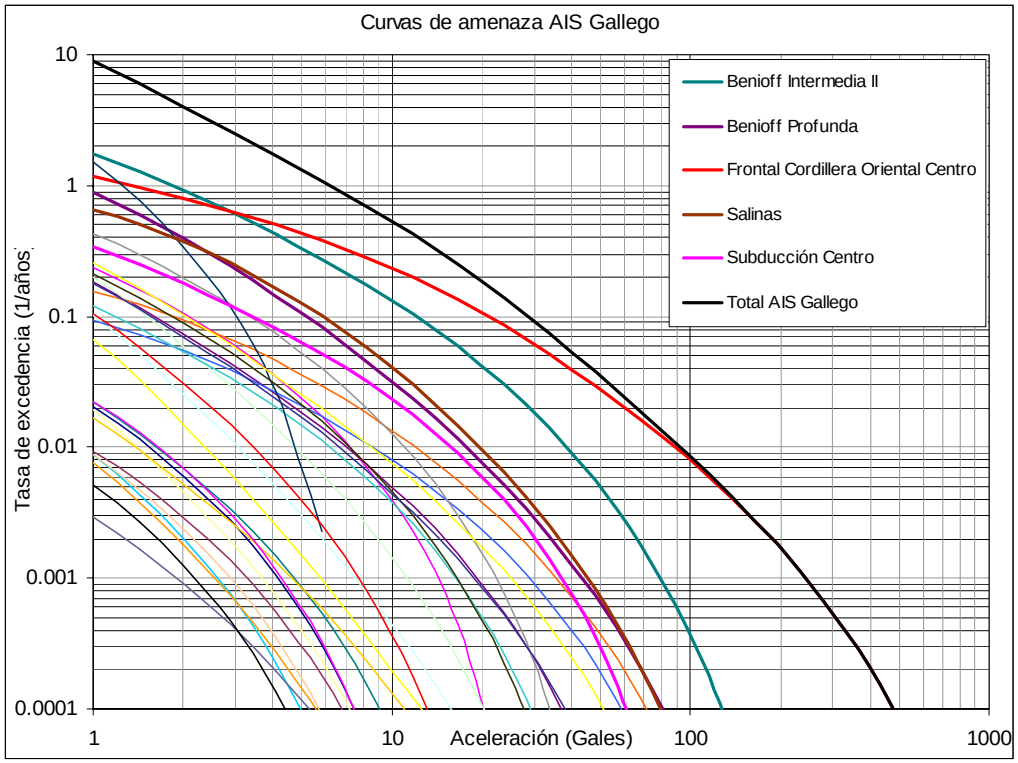


Figura 3.4. Curvas de amenaza para Bogotá curvas de Gallego. (AIS, 2009)

Se calculó la amenaza en términos de un Espectro Uniforme de Amenaza, EUA, que define para diferentes períodos de vibración el valor de amenaza en términos de aceleración espectral. En las **Figura 3.5** y **Figura 3.6** se ilustran los espectros uniformes de amenaza para la Cuidad de Bogotá considerando varios períodos de retorno y las diferentes ecuaciones de atenuación utilizadas.

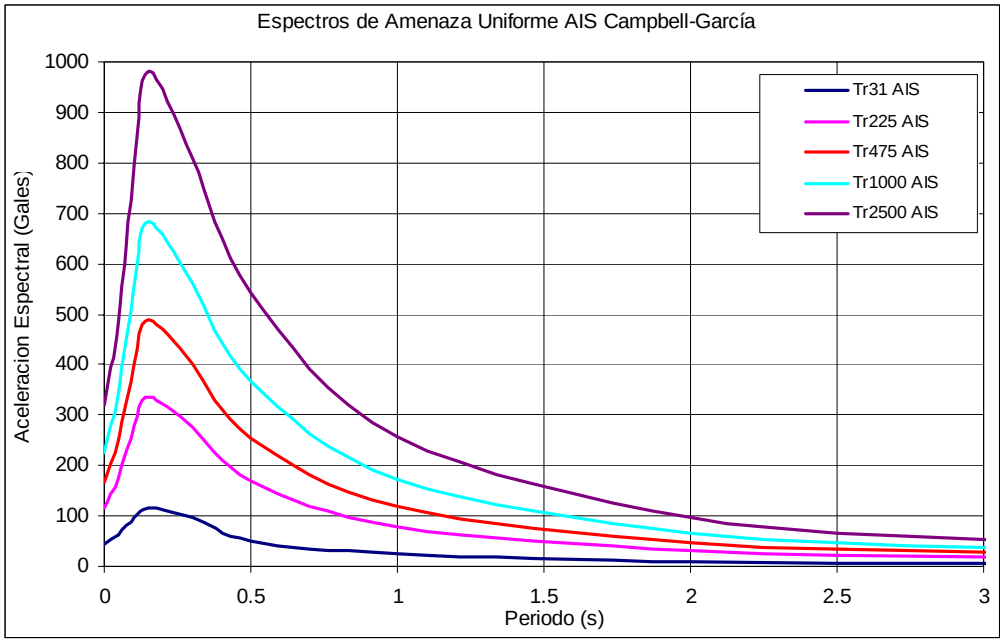


Figura 3.5. Espectros de Amenaza Uniforme para Bogotá. Curvas de atenuación de Campbell-García

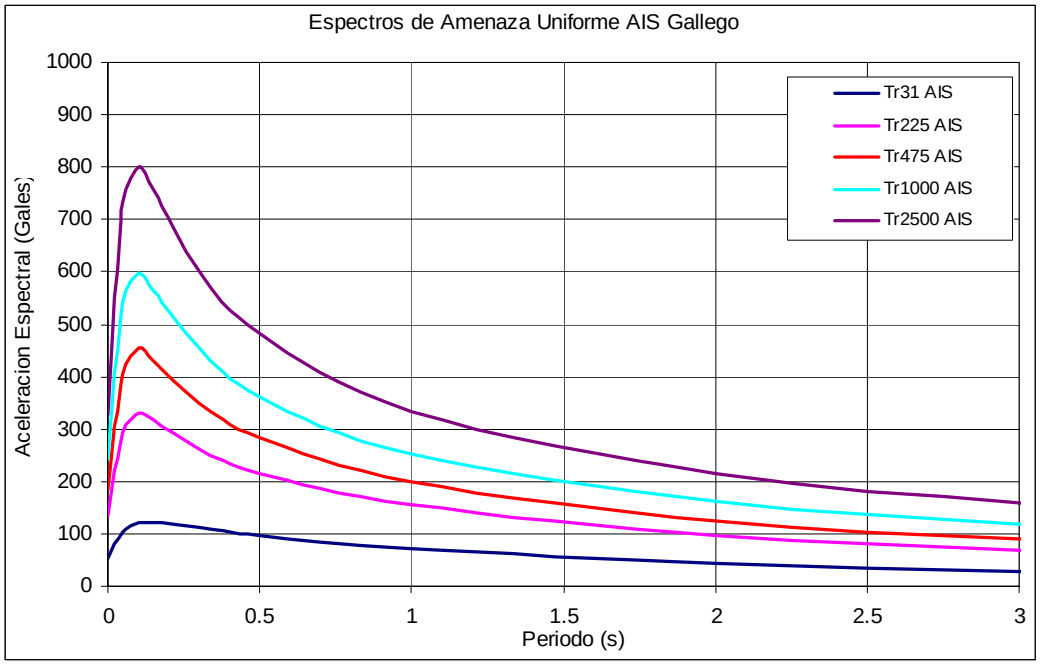


Figura 3.6. Espectros de Amenaza Uniforme para Bogotá. Curvas de atenuación de Gallego

3.2.2 Desagregación

Se obtuvieron los valores correspondientes a la desagregación de la amenaza, en términos de PGA, y sus resultados son mostrados en las **Figura 3.7** y **Figura 3.8**. Estos resultados fueron obtenidos para un período de retorno de 475 años.

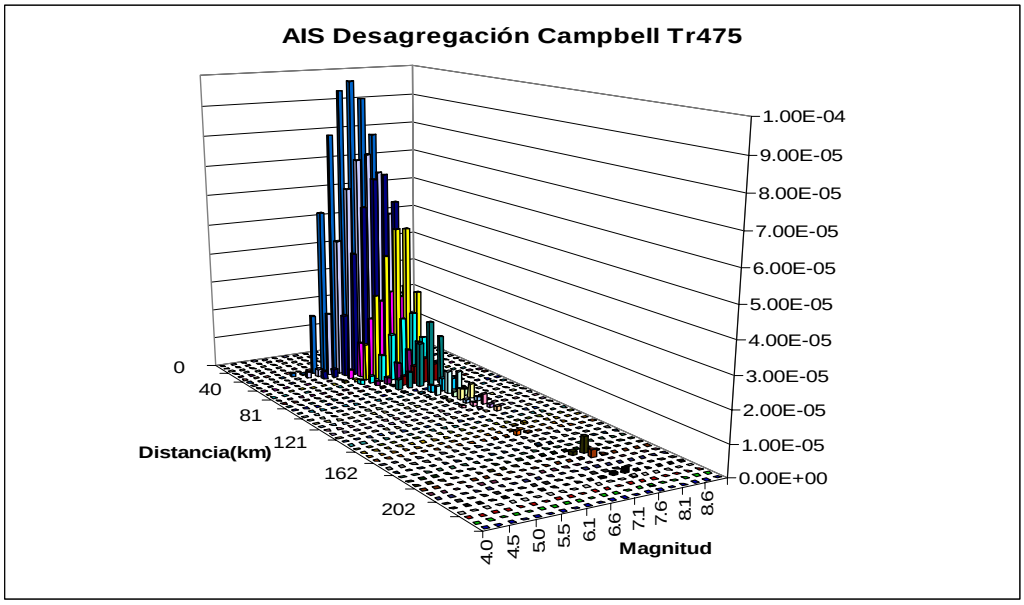


Figura 3.7. Desagregación de PGA para un período de retorno de 475 años. Ecuaciones de atenuación de Campbell-Garcia

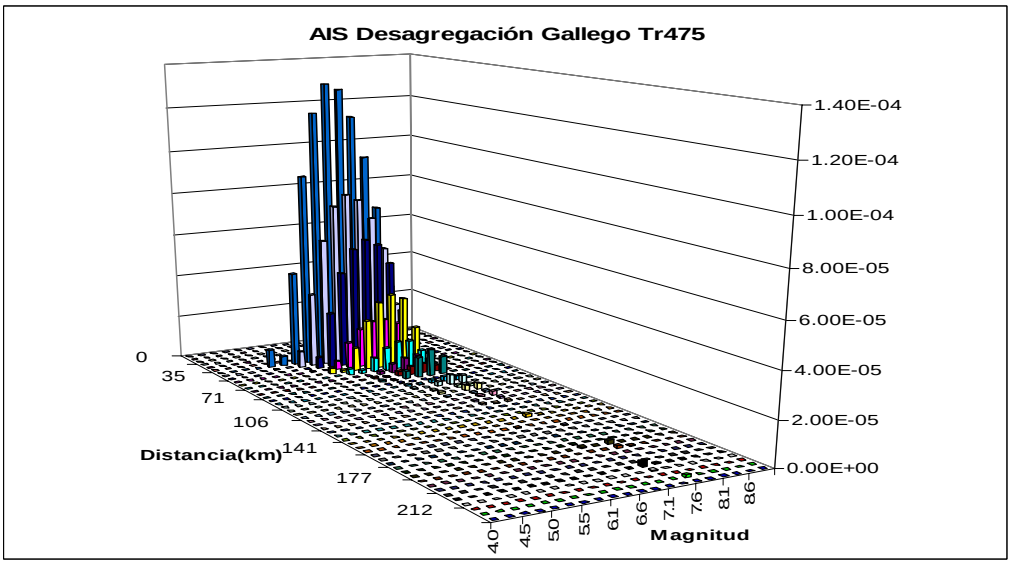


Figura 3.8. Desagregación de PGA para un período de retorno de 475 años. Ecuaciones de atenuación de Gallego

3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para comparar los resultados de los estudios realizados por el Ingeominas-Unal y la AIS se calcularon los Espectros de Amenaza Uniforme para un mismo punto de referencia, que en este caso se adoptó la Plaza de Bolívar.

La **Figura 3.9** presenta los espectros obtenidos por Ingeominas-Unal IGM3, AIS Campbell_García y AIS Gallego. Los resultados de los modelos IGM3 y AIS Campbell-García son muy similares. Por otro lado, el espectro obtenido mediante AIS, Gallego, tiene como principal característica, el hecho de genera aceleraciones espectrales mas altas para períodos mayores.

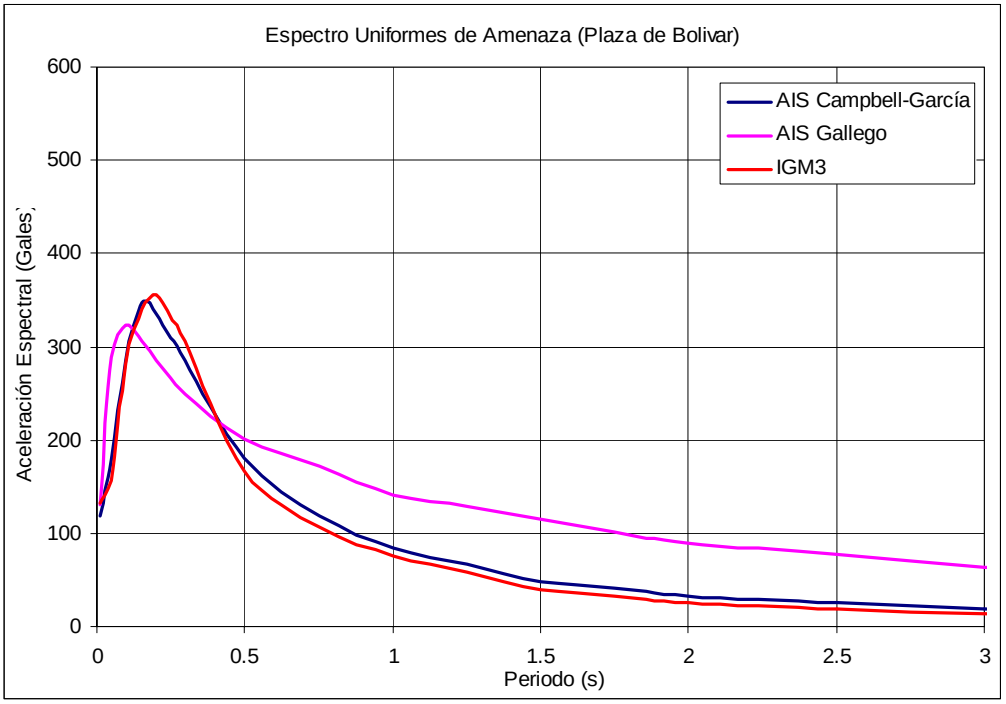


Figura 3.9. Comparación de Espectros de Amenaza Uniforme obtenidos por AIS e Ingeominas -IGM

La **Figura 3.10** muestra el mapa de aceleración máxima del terreno (PGA), obtenido por ambos estudios. Tal y como fue mencionado anteriormente, ambos estudios emplearon puntos de referencia diferentes; sin embargo, comparativamente los resultados son muy similares.

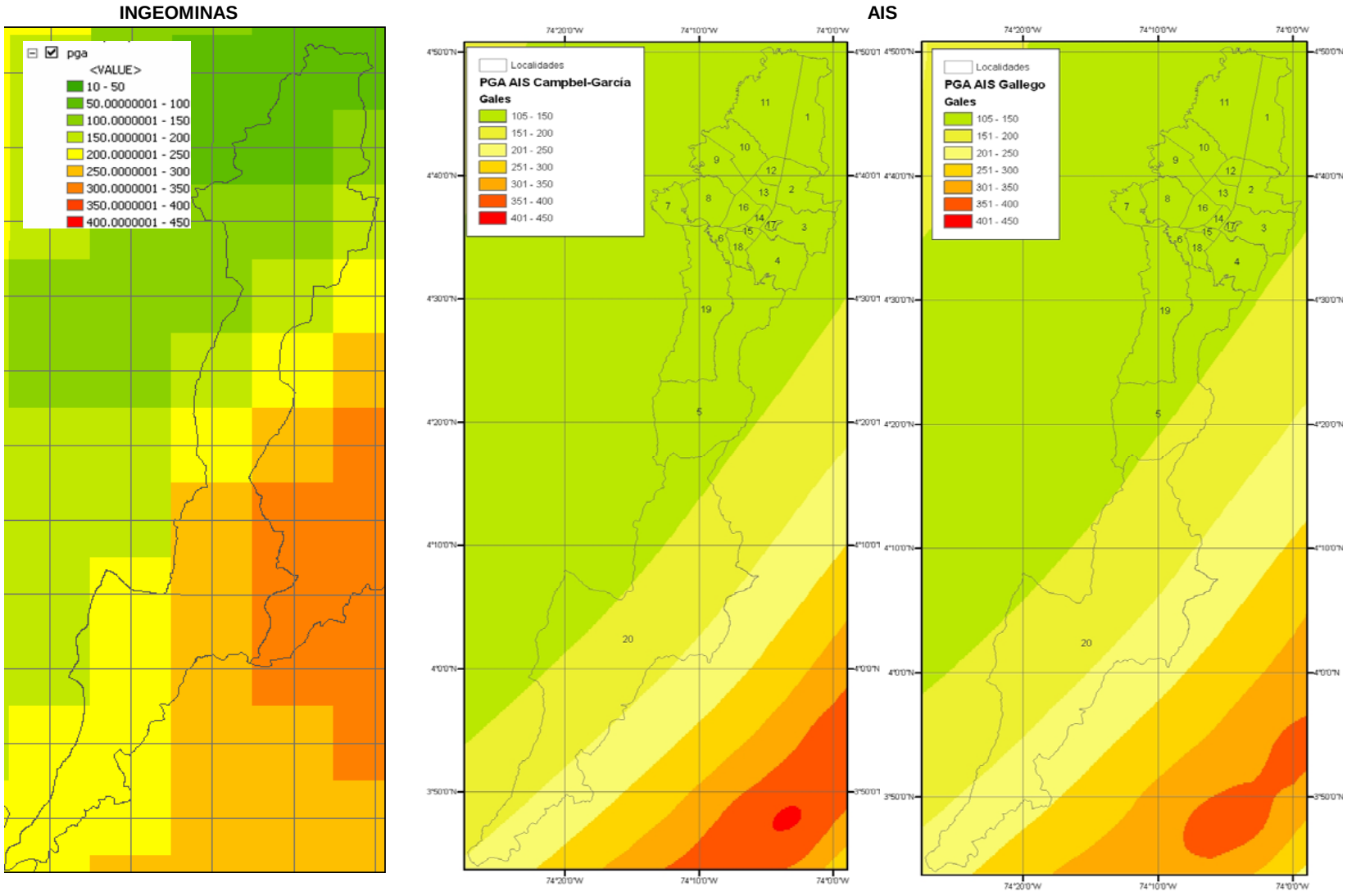


Figura 3.10. Aceleraciones máximas del terreno PGA. Resultados de INGEOMINAS-UNAL y AIS

3.4 SEÑALES DE DISEÑO

La selección de las señales o acelerogramas apropiados se hace a partir de una base de datos reales de movimientos sísmicos registrados. Para esto es indispensable definir escenarios sísmicos, compatibles con la amenaza como función de las magnitudes de las fuentes y sus distancias al sitio de estudio. Los escenarios sísmicos deben ser consistentes con las fuentes sísmicas que han sido determinadas en el estudio de amenaza, y de acuerdo con los parámetros de diseño del movimiento del terreno.

Es importante mencionar que por tratarse de las señales reales, siempre presentarán efectos de sitio en alguna medida, por lo que optó por emplear la técnica de relaciones espectrales que permite eliminar los efectos propios de las señales y dejar en "limpio" la respuesta del perfil modelado.

3.4.1 Empleadas por los convenios

Las señales empleadas por los convenios mencionados anteriormente, se relacionan a continuación en la **Tabla 3.2.** Adicionalmente, en la **Figura 3.11** se presentan los acelerogramas de campo cercano, intermedio y lejano de dichas señales.

Fuente	Fecha	Nombre Sismo	Estación	Ms	Amáx (g)
Local	1975/08/01	OROVILLE	OROV.SS	5.6	0.098
	1979/08/06	COYOTE LAKE	GILROY-1	5.7	0.119
	1980/05/25b	MAMMOTH LAKES AFTERSHOCK	LONG VAL.U	5.7	0.101
	1983/07/22	COALINGA AFTERSHOCK	SULPHUR.BH	5.8	0.134
	1984/04/29	UMBRIA	PIETRALUNG	5.4	0.188
	1995/19/01	LA URIBE	SANTA		0.091
Regional	1989/10/18	LOMA PRIETA	YERBABUENA	7.1	0.079
	1994/01/17	NORTHRIDGE	MT.BALDY	6.8	0.073
	1994/01/17	NORTHRIDGE	DEER CANYON	6.8	0.071
	1994/01/17	NORTHRIDGE	NEWPORT	6.8	0.107
	1995/01/16	HYOGO-KEN NANBU (KOBE)	OKAYAMA	6.8	0.081
Subducción	1985/09/19	MEXICO	CERRO DEPI	8.1	0.025
	1985/09/19	MEXICO	CU01	8.1	0.034
	1985/09/19	MEXICO	CUIP	8.1	0.035
	1985/09/19	MEXICO	CUMV	8.1	0.036
	1985/09/19	MEXICO	XALTINGUIS	8.1	0.029

Tabla 3.2. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos (Adaptado de Martínez et al., 2002)

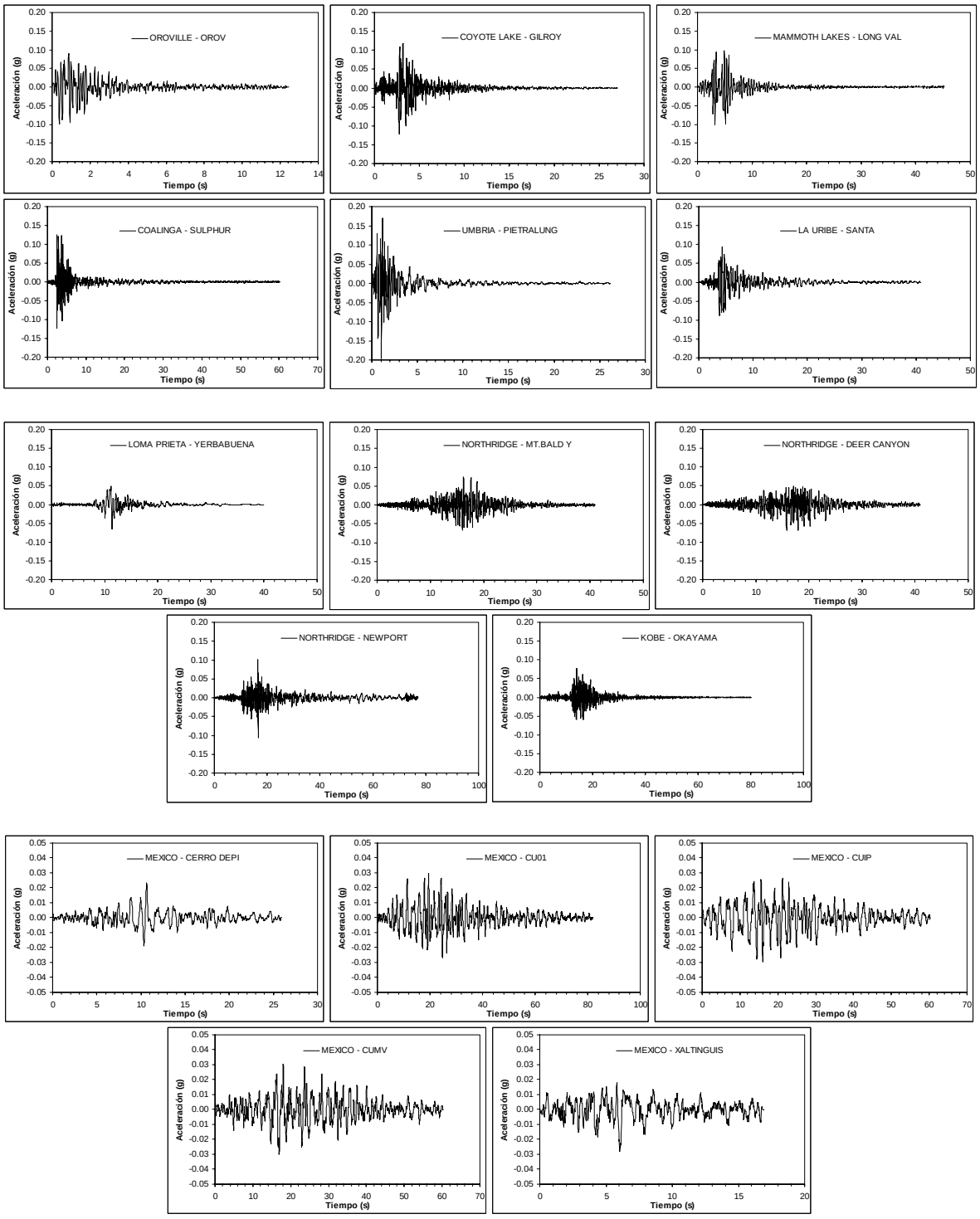


Figura 3.11. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos

En la **Tabla 3.3** se observan para cada escenario los promedios y desviación estándar de las señales de diseño, donde se aprecia que los promedios son similares a los valores de amenaza para todas las fuentes.

Fuente Cercana		Fuente Intermedia		Fuente Lejana	
Sismo	Amax (g)	Sismo	Amax (g)	Sismo	Amax (g)
Oroville	0.098	Loma Prieta - Yerbabuena	0.079	México - Cerro Depi	0.025
Coyote Lake	0.119	Northridge - Mt. Baldy	0.073	México CU01	0.034
Mammoth	0.101	Northridge - Deer Canyon	0.071	México CUIP	0.035
Coalinga	0.134	Northridge - Newport	0.107	México CUMV	0.036
Umbria	0.188	Kobe Okayama	0.081	México - Xaltinguis	0.029
La Uribe	0.091				
Promedio	**0.1218**	**Promedio**	**0.0822**	**Promedio**	**0.0318**
Desviación estándar	**0.0360**	**Desviación estándar**	**0.0145**	**Desviación estándar**	**0.0047**

Tabla 3.3. Valores de Amax de las señales de diseño, promedios y desviaciones estándar de cada escenario.

En la **Figura 3.12** ilustran los espectros de respuesta de las señales de diseño de cada escenario sísmico junto los espectros uniformes de amenaza recomendados por Ingeominas-Unal y AIS, allí se observa que los EUA de AIS Campbell e IGM3 cubren bien los periodos cortos y AIS Gallego representa bien los periodos intermedios y altos.

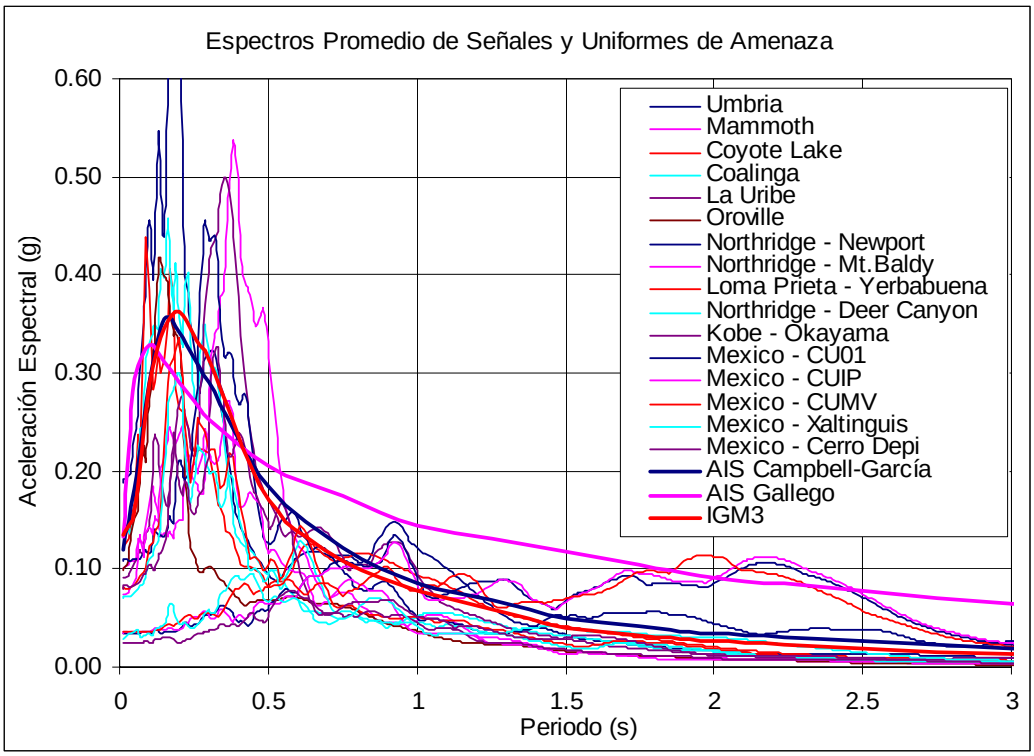


Figura 3.12. Espectros promedio de señales y uniformes de amenaza

Este grupo de señales se emplearon en las diferentes modelaciones realizadas por los convenios, concluyendo que algunas de estas señales tienen problemas de efectos de sitio, como es el caso de Northridge-Yerbabuena y Newport o las Mexico CU. Sin embargo, como se vera posteriormente, la técnica empleada para análisis todos los resultados de los modelos de respuesta fue mediante el uso de relaciones espectrales, por lo que la influencia de la señal se elimina y por lo tanto los resultados que se obtuvieron con estas señales se tuvieron en cuenta. Sin embargo, para futuros análisis se recomienda que no se empleen estas dos señales.

3.4.2 Empleadas por FOPAE

Para complementar la selección de señales anterior y con el fin de tener en cuenta los resultados de los estudios de Ingeominas – Unal y AIS, se seleccionaron las 12 señales listadas en la **Tabla 3.4** y presentadas en la **Figura 3.13**, las cuales fueron empleadas para las modelaciones unidimensionales y bidimensionales realizados por la DPAE.

Fecha	Nombre	Estación	Mw	PGA(g)
1970/09/12	MAMMOTH LAKES-USA	LONG VAL.U	5.7	0.127
1979/08/06	COYOTE LAKE-USA	GILROY-1	5.7	0.100
1980/05/26	LYTLE CREEK-USA	DEVILS CAN	5.3	0.081
2005/03/20	KYUSHU-JAPÓN	FKO001	6.6	0.251
2002/06/22	WESTERN IRAN-IRAN	RAZAN	6.5	0.164
1994/01/17	NORTHRIDGE YORB-USA	YORB.LIND.DIEM.B	6.7	0.073
	NORTHRIDGE DEER-USA	DEER CANYON	6.7	0.118
1985/09/19	HONSHU-JAPÓN	MYG005	7	0.175
2003/05/26	COSTA PERU-PERÚ	ZAR	6.5	0.149
2003/08/21	TARAPACA-CHILE	IQUIQUE	7.9	0.222
1974/01/05	FIORDLAND-NUEVA ZELANDA	JACS	7.2	0.113
2005/06/13	MICHOACÁN-MEXICO	XALTIANGUIS	6.7	0.032

Tabla 3.4. Señales seleccionadas como representativas de la amenaza en Bogotá

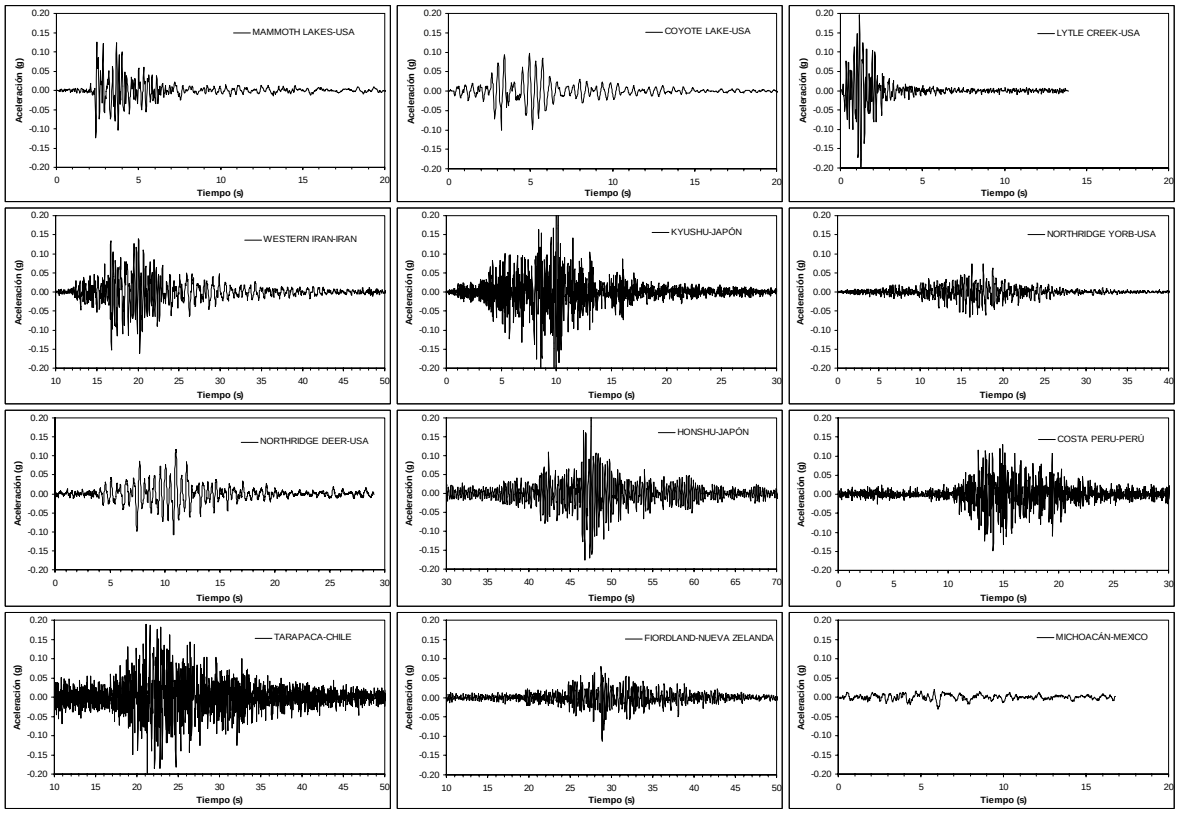


Figura 3.13. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos

Las señales seleccionadas cubren un amplio intervalo de aceleraciones con lo cual se logra establecer la variación de las relaciones espectrales con la amplitud de la señal, para tener en cuenta el comportamiento no lineal de los depósitos. Adicionalmente se

busco que el promedio del grupo de señales fuese cercano al espectro uniforme de amenaza, así como las magnitudes y distancias consistentes con los escenarios.

Es importante mencionar que las señales de Chile, Perú, Japón y Nueva Zelanda no son totalmente representativas del ambiente sismotectónico de la región pero sus niveles de intensidad satisfacen las necesidades que se pretende con las modelaciones realizadas por la FOPAE y se reitera que los análisis de resultados se realizará mediante relaciones espectrales.

En la **Figura 3.14** se muestran los espectros de todas las señales seleccionadas y el promedio junto con los espectros de amenaza uniforme obtenidos en los estudios de Ingeominas-Unal y AIS.

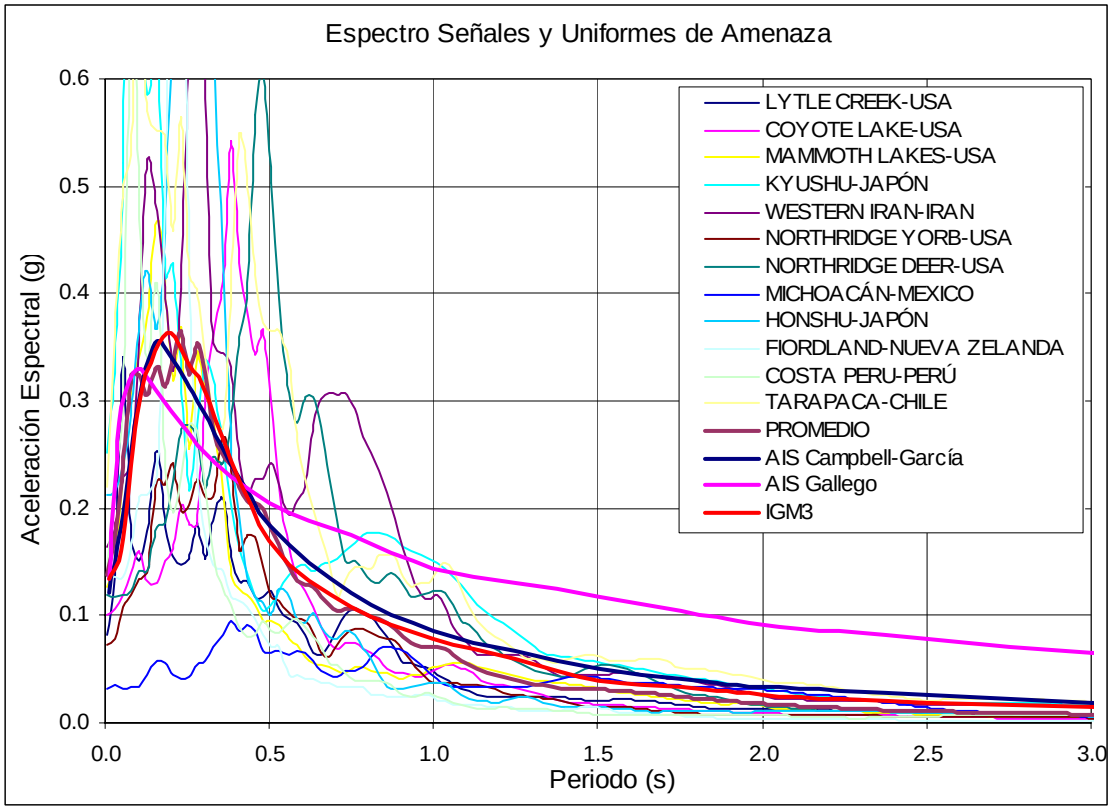


Figura 3.14. Espectros de señales seleccionadas como representativas para la amenaza en la ciudad

CAPITULO 4

4 MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD

En el presente capítulo se resumen los análisis geotécnicos realizados para concebir un modelo geológico – geotécnico de los depósitos de la ciudad de Bogotá. Para ello se articuló en el sistema de información geográfica una gran cantidad de información con el fin de facilitar la interpretación de los datos, logrando así un modelo que se resume en los mapas de zonificación geotécnica y zonificación geotécnica para respuesta sísmica, con los cuales se abordaran los resultados de los análisis de respuesta de sitio presentados en el siguiente capítulo.

Con base en la resolución de las diferentes coberturas de información se adoptó como escala de trabajo para los análisis de información 1:20.000 y para la presentación de los mapas finales se empleó una escala de 1:50.000.

4.1 METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN

La metodología general para la elaboración de la zonificación por efectos locales se explicó en el Capítulo 1, pero conforme con los requerimientos específicos que se dieron a lo largo del desarrollo de las investigaciones, ésta fue objeto de ajustes se considero conveniente plantear una zonificación para los niveles mas superficiales (0 a 50 m) que se denomina propiamente *"Zonificación Geotécnica"* y otra que considera el depósito completo hasta la roca y se tienen en cuenta variables que afectan su comportamiento dinámico se llama *"Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica"*. En la **Figura 4.1** se presenta el diagrama de flujo e información empleada para zonificar la ciudad.

En general, la metodología consiste en realizar de una forma sistemática la integración de la información multidisciplinaria, tal como la geológica, la geofísica y la geotécnica. Para ello, se partió de las diferentes temáticas trabajadas, de las cuales se han generado coberturas de información. Paso seguido se analizan las coberturas bajo dos enfoques: uno a nivel superficial y otro a nivel de todo el depósito o en profundidad; para obtener finalmente la zonificación geotécnica a partir de los análisis superficiales y la zonificación geotécnica para respuesta sísmica al combinar los análisis superficiales y profundos.

En los análisis superficiales se utilizaron técnicas geo-estadísticas y con base en los resultados de elaboraron mapas de la variación de algunos parámetros geotécnicos, or otro lado se realizaron cruces temáticos con el modelo digital del terreno, las unidades geológicas, zonas geotécnicos anteriores e isoperidos por microtrepidaciones. El fin de estos análisis es diferenciar dentro de una misma unidad geológica la presencia de zonas geotécnicas.

En el análisis en profundidad o de todo el depósito se tienen en cuenta los perfiles geológicos, el mapa de profundidad del basamento rocoso y el mapa de isoperíodos fundamentales del depósito, con ellos se puede concebir el modelo tridimensional de los

sedimentos de la cuenca y lograr diferenciar así, para efectos de la respuesta de sitio, zonas de comportamiento sísmico homogéneo.

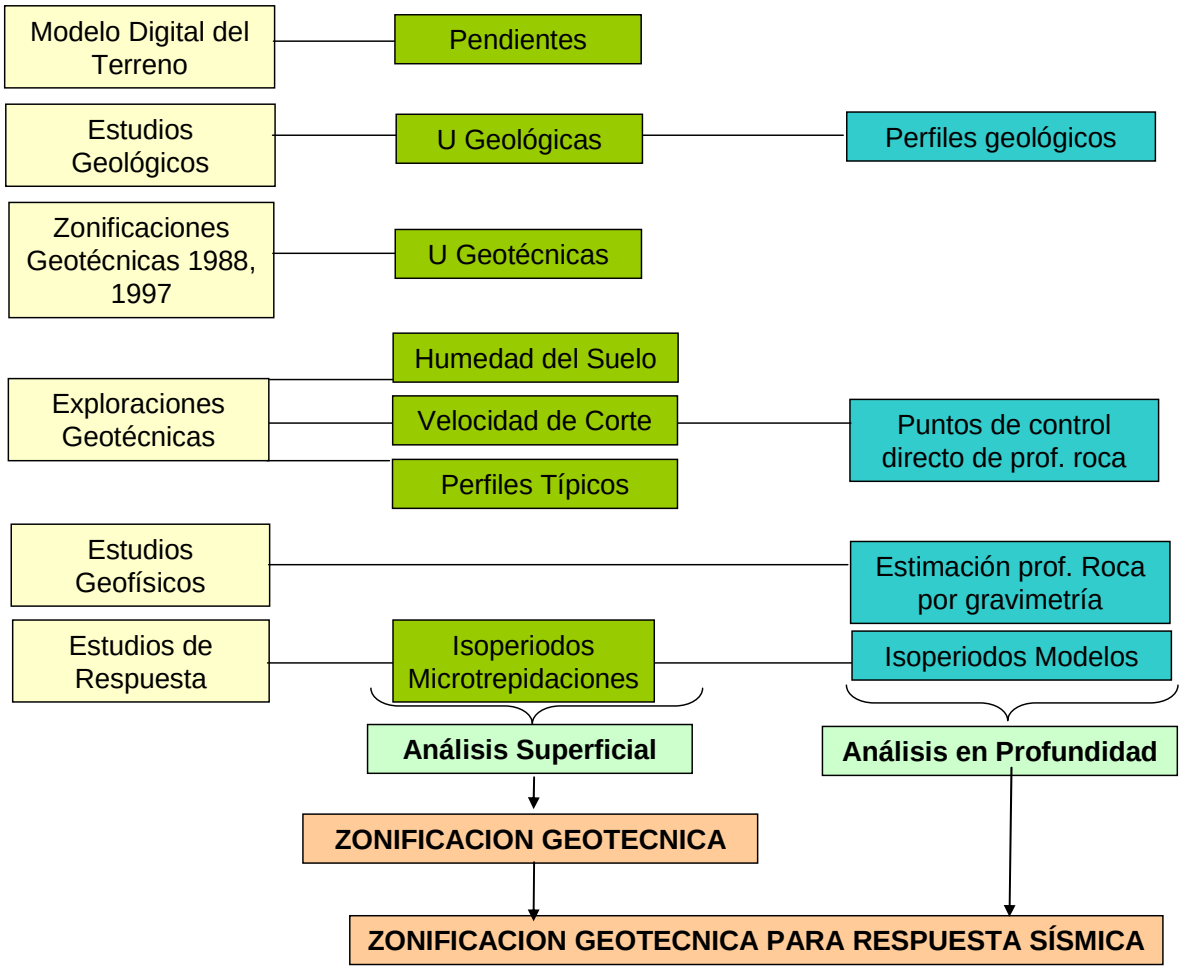


Figura 4.1. Esquema metodológico de zonificación

Finalmente, al integrar los análisis superficiales y profundos se obtienen las zonas geotécnicas para respuesta sísmica, que presentaran un comportamiento sísmico homogéneo por tener en cuenta tanto la composición y caracterización geomecánica de los materiales presentes superficialmente, como las características generales de todo el depósito.

Dado que el proceso de análisis incorpora varios tipos de información, es necesario estructurar cada temática involucrada en coberturas de información. Para ello, la información se articuló en un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGis by ESRI) con el fin de poder realizar los análisis de interpolación y observar la variación espacial de algunos de los parámetros geotécnicos.

Cabe anotar, que a pesar de que se cuenta con información en varios puntos y que se hizo una evaluación geo-estadística, buena parte del ajuste y refinamiento de los mapas han sido de carácter eurístico, es decir, con base en el buen criterio y juicio del conocimiento del modelo geológico – geotécnico y de la mecánica de suelos aplicada, combinado con herramientas de los Sistemas de Información Geográfica, SIG.

4.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

A continuación se resumen las características generales de la información que se tuvo en cuenta para realizar la actualización de la zonificación geotécnica de Bogotá y se presenta una síntesis del tratamiento que se le dio a cada una para tal fin.

4.2.1 Modelo digital del terreno

A partir del modelo digital del terreno que dispone el centro de documentación de la DPAE, que tiene una resolución de píxel de 30 por 30 m, lo que equivale a una escala de trabajo aproximada de 1:30.000, se elaboraron los modelos digitales de elevación del terreno (**Figura 4.2**) y de pendientes (**Figura 4.3**). El fin de estos mapas fue identificar los rasgos geomorfológicos del terreno y diferenciar aproximadamente en unidades básicas como cerros, piedemonte, cono aluvial, planicie y llanuras de inundación.

Por otro lado, con el modelo digital del terreno e posible tener la imagen tridimensional de las formas geológicas presentes en la ciudad, lo cual permite tener una orientación más completa que la dispuesta en los mapas convencionales.

En general, a partir de estos mapas se puede ver que la cuidad de Bogotá está bordeada en el extremo oriental por los Cerros Orientales, que poseen una altura superior a los 3400 msnm, al costado sur se encuentran los Cerros del Sur, con una altura que oscila entre los 3100 y 3200 msnm, y por el lado norte y occidental de la ciudad se limita con el río Bogotá.

La zona de planicie, donde se desarrolla la mayor parte de la ciudad, tiene una altitud de los 2600 a los 2550 msnm que desciende en sentido oriente occidente. En la zona norte de la ciudad, en medio de la planicie, aflora el cerro de Suba con una altura aproximada de 2700 msnm.

En cuanto a las pendientes del terreno, se encuentran los valores más altos en la zona de los Cerros Orientales y en los Cerros del Sur, con valores que varían entre 15 y 30% aproximadamente. En las zonas de piedemonte las pendientes son medianas, variando entre 5 y 15% aproximadamente, y en la planicie, como tal son muy bajas, inferiores al 5%.

4.2.2 Geología local escala 1:25.000

Para los análisis de zonificación se empleó el mapa geológico del estudio de MZSB, el cual fue realizado por Ingeominas en el año 1995. Este mapa fue trabajado a escala 1:25.000, dicho mapa se ilustra en la **Figura 4.4**.

En general, geológicamente la ciudad de Bogotá se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá y está rodeada por cerros constituidos por rocas de tipo areniscas, arcillolitas y conglomerados (Ingeominas, 1995).

A continuación se presenta la descripción resumida de las unidades geológicas, cuyos detalles se puede consultar en el Subproyecto 2 del estudio de MZSB (Ingeominas, 1995).

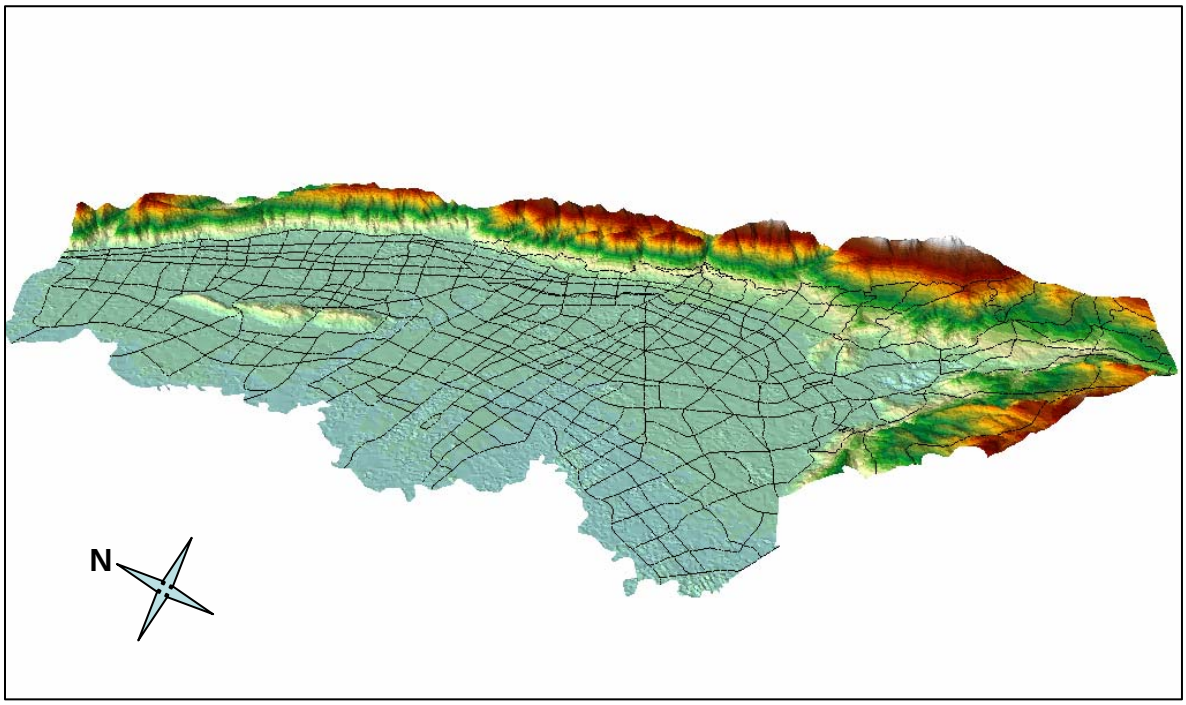


Figura 4.2. Modelo tridimensional del terreno de la ciudad

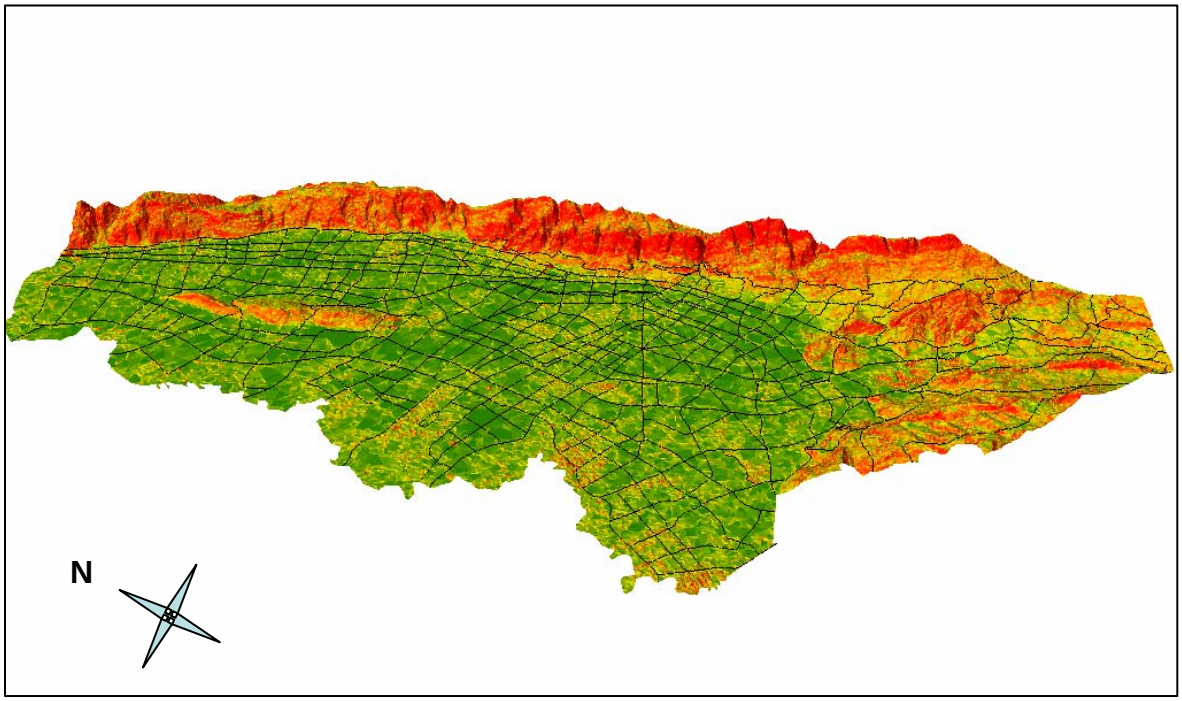


Figura 4.3. Modelo tridimensional de pendientes del terreno de la ciudad

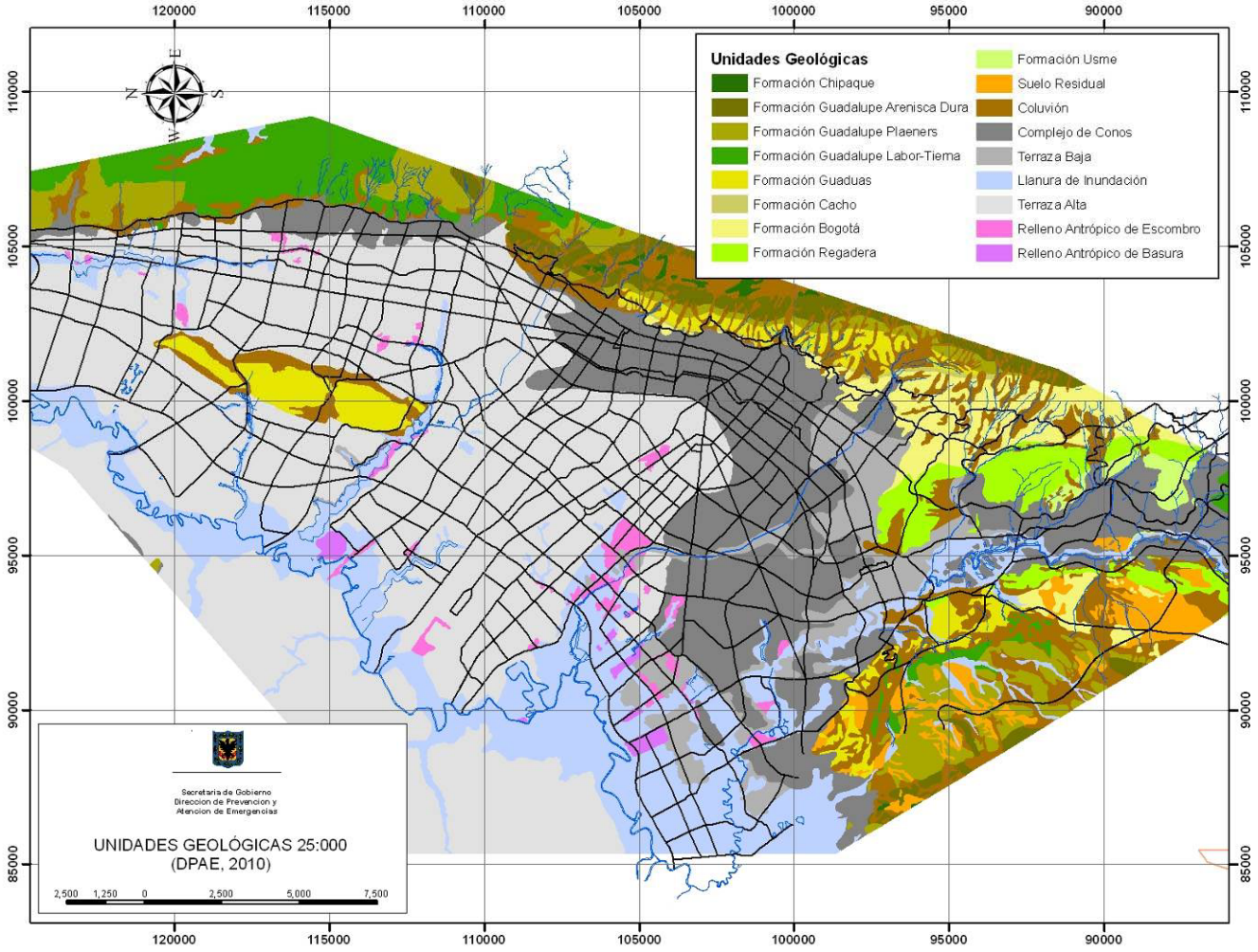


Figura 4.4. Mapa Geológico Ingeominas 1995

Unidades Geológicas:

Formaciones Rocosas: En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, dentro de estas formaciones se encuentran de la más antigua a la mas joven las siguientes: Chipaque (Ksch), Guadalupe (Ksg), Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp), Labor-Tierra (Ksglt), Guaduas (KTg), Cacho (Tpc), Bogotá (Tpb), Arenisca La Regadera (Ter) y Usme (Tu).

Suelo Residual (Qrs): Es el material producto de la meteorización de las rocas y son importantes por su espesor, hasta de 10m, presentes en la parte sur oriental de la ciudad. Por tratarse de suelos predominantemente arcillosos, su permeabilidad es baja y su comportamiento geomecánico pobre. Las unidades que han permitido un amplio desarrollo de estos suelos son las formaciones de composición arcillosa, tales como: Chipaque, Plaeners, Guaduas, Bogotá, Usme y La Regadera.

Derrubios de Pendiente (Qdp): Son los depósitos productos de la fracturación, meteorización y erosión de rocas preexistentes, que han sido transportados por acción de la gravedad y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Sus mejores afloramientos se presentan en los piedemontes orientales, sur oriental y sur occidental. Dentro del área de estudio de presentan dos tipos de depósitos de esta clase: coluviones, donde existe predominio de matriz fina sobre el material grueso y talus donde predomina el material grueso.

Complejo de Conos o Abanicos (Qcc): Dentro de esta unidad se agrupan el Cono del Río Tunjuelo, el Cono de Terreros, Depósitos de Flujos Torrenciales y los Conos del piedemonte oriental de Bogotá, como el de San Cristóbal y Claret, entre otros. La composición, textura, espesor y la edad son variables y se difieren para cada depósito de acuerdo a las fuentes de aporte, distancia y tipo de transporte. En general esta unidad se componen de bancos de bloques, guijarros y guijos dentro de una matriz areno arcillosa en las zonas apicales y hacia las partes distales se encuentran materiales predominantemente arenosos y limo arcillosos.

Depósitos Fluvio – Lacustre (Terraza Alta, Qta): Llamada también Formación Sabana por Hubach (1957) y Helmens (1990) este depósito esta constituido por arcillas plásticas con lentes de arena suelta e intercalaciones de cenizas volcánicas, en algunos sectores se presentan varios niveles de turbas hasta de 1 m de espesor. Esta unidad constituye el relleno más importante de la Sabana, siendo su origen lacustre.

Depósitos Fluvio – Lacustre (Terraza Baja, Qtb): Llamada también Formación Chía por Helmens (1990) esta unida corresponde a depósitos originados por los ríos Bogotá, Tunjuelo, Juan amarillo y Fucha. Presenta geoformas planas a ligeramente onduladas, muy poco disectadas, las cuales se elevan unos 5m en promedio sobre las llanuras aluviales. Su composición es predominantemente limo arcilloso y el ambiente de depositación se considera fluvial.

Llanura de inundación (Qlla): Llamada también Formación Chía por Helmens (1990) en esta unidad están los depósitos más jóvenes de los ríos Bogotá, Tunjuelo y algunos de sus afluentes. Estos depósitos constan de arcillas y limos, con un espesor promedio de 5m y son materiales de un ambiente fluvial y localmente lacustre.

Rellenos de Basuras (Qb): Están conformados por desechos sólidos que produce la ciudad y se han concentrado en los rellenos sanitarios de: El Cortijo, Gibraltar, Santa Cecilia y Doña Juana.

Rellenos de Excavación (Qr): Son los depósitos que han resultado de acciones antrópicas para la adecuación de terrenos principalmente en las zonas de humedales deprimidas, estos abundan en varias partes de la ciudad, alrededores de Guaymaral, Aeropuerto el Dorado, Autopista Norte y norte de Bosa.

Evolución geológica:

De manera complementaría, en el estudio del Subproyecto 2 – Estudios Geológicos, se presenta la evolución geológica de los depósitos que conforman la ciudad, de donde se destacan los siguientes aspectos acerca de la acumulación de los depósitos en la cuenca de la Sabana:

- Los movimientos tectónicos – orogénicos originan el desarrollo de la cuenca sedimentaria de la actual Sabana de Bogotá, la cual se inicia alrededor de hace 3.5 millones de años.

- Las condiciones de sedimentación de las partes marginales de la cuenca fueron gradualmente trasladadas a la parte central y dentro de un ambiente lacustre fluvial se depositaron en el Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior los sedimentos de la Formación Tilatá Superior.

- Durante el Pleistoceno Inferior hubo un desarrollo gradual de la cuenca que da como resultado la configuración actual de la misma y dentro del mismo ambiente o complejo lacustre fluvial, se depositan los sedimentos de la Formación Subachoque.

- Como consecuencia de las glaciaciones que tuvieron lugar hace 2.7 a 2.4 millones de años, una importante fase de reajuste tectónico de la cuenca de la Sabana resultó en un ambiente lacustre de mayor profundidad (transición Formaciones Subachoque y Sabana), que tuvo lugar alrededor de hace 1 millón de años.

- Durante el Pleistoceno Medio y Superior el área corresponde a lo que hoy es la parte central de la Sabana, fue por mucho tiempo ocupada por un gran lago, el cual originó la depositación de los sedimentos de las terrazas altas (Formación Sabana).

- Posteriormente, con la influencia de las condiciones de alternancia glacial e interglacial en los alrededores montañosos (Páramo de Sumapaz) se depositaron localmente en la región sureste (parte media e inferir de la cuenca del río Tunjuelo), los sedimentos fluvio-glaciales que conforman el Cono de Tunjuelo.

- Durante la parte superior de la última glaciación hubo un marcado descenso del nivel de las aguas de la gran laguna de la Sabana, que finalmente llevo a su desaparición que fue datada alrededor de hace 40.000 a 28.000 años.

- Durante los últimos 10.000 años de tiempo geológico se llego a la colmatación final de los lagos de la sabana y al proceso de desecación de los mismos, en el cual los ríos que la cruzaron depositaron arcillas de inundación (Llanura Aluvial).

- Finalmente, desde aproximadamente 3.000 años, localmente fueron depositados sedimentos limosos correspondientes a las Llanura Aluviales (Formación Chía).

4.2.3 Geología semi-detallada de los Cerros Orientales y de Suba de la Ciudad de Bogotá.

La DPAE entre los años 1997 y 1999 contrato con tres firmas consultoras la ejecución de estudios geológicos semi-detallados de los cerros orientales y cerros de suba de la ciudad de Bogotá, con el fin de realizar posteriormente la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

El primero de estos estudios fue desarrollado por la firma Investigaciones Geotécnicas Ltda. (IGL), y se nombra Zonificación de Riesgo por Movimientos de Remoción en Masa de 101 Barrios de la Localidad de Usme; este estudio maneja un nivel de detalle de 1:10.000 y fue desarrollado para la DPAE en el año de 1997.

El segundo estudio fue ejecutado por la firma INGEOCIM Ltda. en el año 1998 para la DPAE, este estudio se nombro como Zonificación por Inestabilidad del Terreno para Diferentes Localidades de la Ciudad de Santa fe de Bogotá, el área de estudio incluyo las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe, San Cristóbal, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba; la escala de trabajo usada fue de 1:10.000.

El tercero y último informe consultado fue el desarrollado por la Firma Geoingeniería Ltda. del año de 1998, denominado Zonificación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa para Tres Sectores de Santa Fe de Bogotá, el estudio comprendió la localidad de Usaquén, San Cristóbal y Usme, la escala de trabajo fue 1:10.000.

En la **Figura 4.5** se resume la localización de las áreas de estudio por las diferentes firmas consultoras.

Dado que los tres estudios se realizaron por diferentes firmas consultoras presentan diferencias en la denominación de las unidades geológicas, por lo cual fue necesario desarrollar un procedimiento para homologar dichas denominaciones y así poder unir las diferentes zonas estudiadas. Para ello, se emplearon los nombres de las unidades geológicas recomendadas en el estudio “Zonificación Geomecánica de la Sabana de Bogotá”, elaborado por INGEOMINAS en el año 2004.

Finalmente, se logro homologar los estudios de IGL e INGEOCIM dado que la escala de trabajo, cartografía base, metodología de cartografía geológica, entre otros aspectos, eran compatibles, a diferencia del estudio de GEOINGENIERÍA que no era compatible para este fin. En la **Figura 4.6** se ilustra los resultados obtenidos.

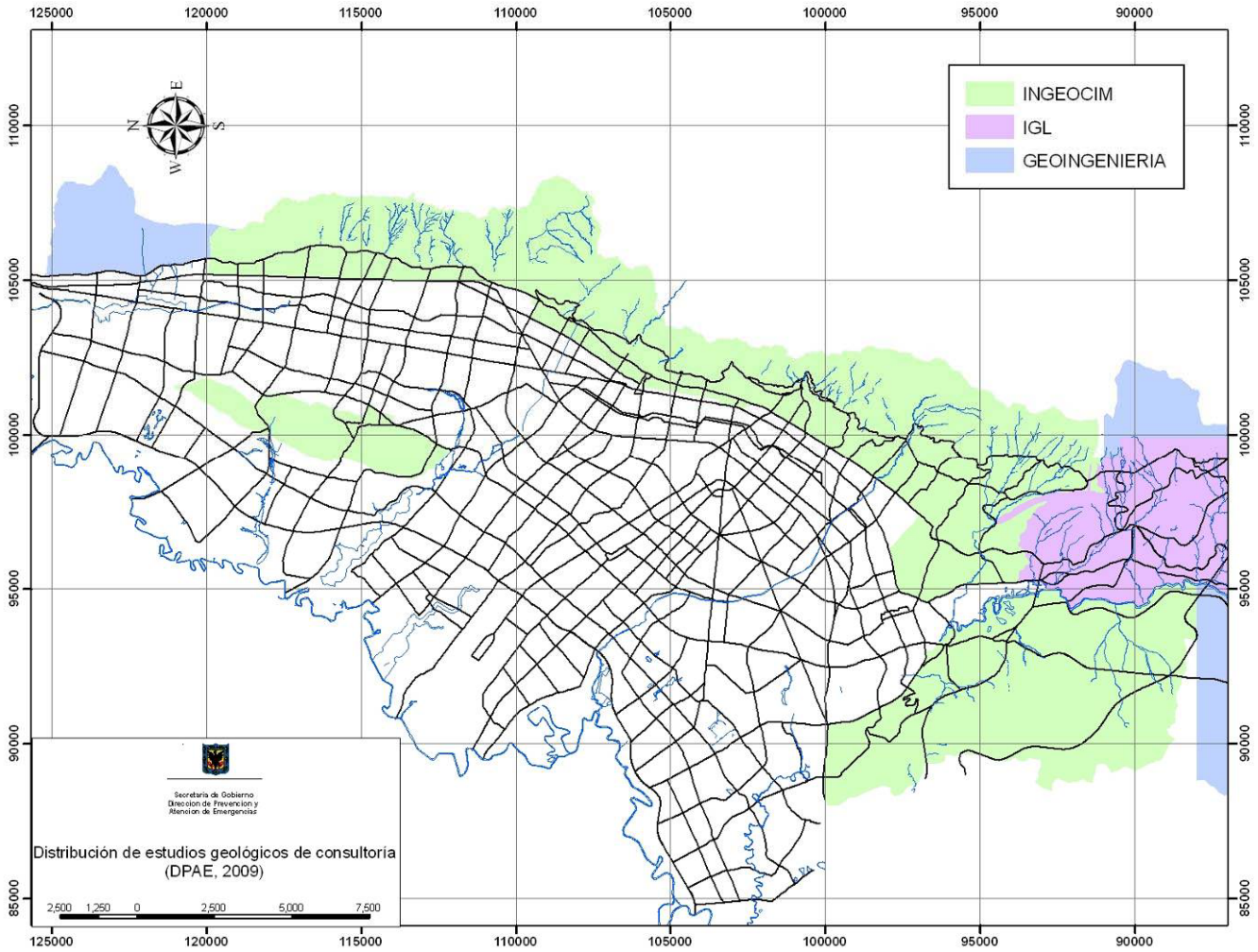


Figura 4.5. Localización de estudios geológicos de los cerros semi-detallados.

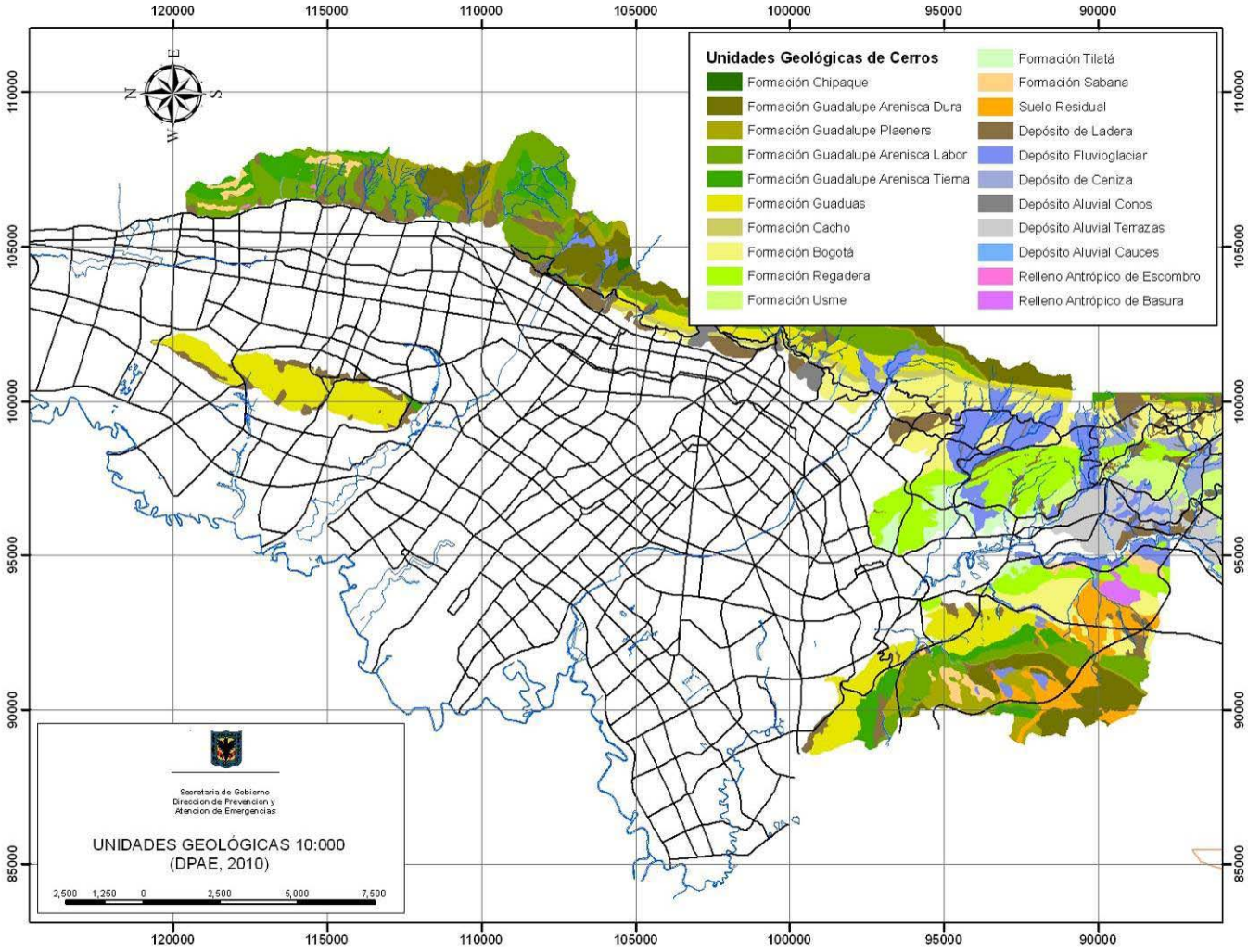


Figura 4.6. Mapa de Unidades Geotécnicas de Cerros Propuesto

Unidades Geológicas de Cerros:

Formación Chipaque (Ksch): consta de una sucesión monótona de lutitas físiles de color gris oscuro a negro con intercalaciones calcáreo arenosas y pequeños niveles arenosos, muy frecuentes en la parte alta y baja de la formación.

Formación Guadalupe Arenisca Dura (Ksgd): está compuesta por una gruesa sucesión de areniscas en bancos muy gruesos con intercalaciones de limolitas, lodolitas, porcelanitas (chert), y arcillolitas de colores claros y en capas finas. Las areniscas están compuestas por ortocuarcitas de grano muy fino.

Formación Guadalupe Plaeners (Ksgp): está conformada por una sucesión de limolitas silíceas, porcelanitas (chert), liditas y arenisca de grano fino. El conjunto presenta estratificación media y los colores predominantes son el blanco y el gris.

Formación Guadalupe Arenisca Labor (Ksgl): se compone por areniscas de granos finos a medio grueso, arcillosos, grisáceos a blancas, e intercalaciones de arcillolitas y lodolitas, su densidad se modifica de base a tope siendo más densos los segmentos inferiores.

Formación Guadalupe Arenisca Tierna (Ksgt): predominantemente compuesta por areniscas de grano grueso a muy grueso incluso conglomerático que se muestran en bancos potentes con intercalaciones delgadas de arcillolitas, limolitas y lodolitas, las areniscas presentan estratificación cruzada, compactación variable y color pardo amarillento a blanco, en general son ortocuarcitas en matriz caolinítica bien friables.

Formación Guaduas (KTg): en esta formación se distinguen tres segmentos diferentes, Inferior (KTgi) constituido principalmente por arcillolitas gris oscuras con una capa delgada de carbón en el tope, Medio (KTgm) se distinguen dos niveles en la base la arenisca la guía y en la parte superior la arenisca lajosa, son primordialmente ortocuarcitas, con presencia de mantos de carbón y Superior (KTgs) consta de arcillolitas abigarradas (rojizas, azuladas, verdes y moradas), con mantos locales de carbón y bancos de areniscas poco compactas de grano medio a grueso.

Formación Cacho (Tpc): Arenisca friable, de color pardo a blanco, con tamaño de grano grueso a la base y fino hacia el techo, que se presentan en estratos de hasta de 2m, presenta una marcada estratificación cruzada e intercalaciones menores de lutitas amarillentas a blancuzcas.

Formación Bogotá (Tpb): constituida por una sucesión monótona de lodolitas limolitas y arcillolitas abigarradas (de colores grises, rojos, violáceos y morados), separados por bancos de areniscas arcillosas blandas.

Formación La Regadera (Ter): consta de areniscas cuarzosas feldespáticas, poco consolidadas de color gris claro a blanco, de grano frecuentemente grueso, con algunas capas lenticulares de conglomerados finos en matriz arcillosa.

Formación Usme (Tmu): Intercalación fina de lutitas grises claras en bancos delgados de entre 5 a 10cm intercaladas con areniscas blancas, cuarcíticas de grano muy fino bien cementadas, en bancos del mismo espesor. Sobre la anterior secuencia descansan bancos gruesos de areniscas muy blancas de grano fino, cuarcíticas bien cementadas, el

segmento superior de la formación se caracteriza por la presencia de areniscas de grano medio a fino, localmente conglomerática.

Formación Tilata (TQt): de carácter lacustre constituida por arcillas, arenas y gravas en matriz arcillosa de color blanco, turbas y niveles de guijarros.

Formación Sabana (Qsb): está constituida de base a techo de limos rojos, limos marrones y complejo de suelos negros.

Suelo Residual (Qsr): producto de la meteorización y alteración del material parental, básicamente son materiales fino granulares predominantemente arcillosos, presentan su mayor de desarrollo hacia las partes altas y preferencialmente sobre formaciones blandas (Plaeners y Bogotá).

Depósito de Ladera (Qdl): resultantes de la fracturación y transporte de las unidades geológicas circundantes, pueden ser del tipo coluviones o talus, los primeros son matriz-soportados y los segundos son clasto-soportados.

Depósito Fluvioglaciar (Qfg): consta de bloques y cantos de arenisca de formas subredondeadas a subangulares y algo planares, provenientes de rocas del grupo Guadalupe, embebidos en una matriz limo arcillosa, el tamaño de los bloques es muy variado, alcanzando tamaños relativos de hasta 5m y su proporción con respecto a la matriz varia entre 40 y 60%.

Depósito de Ceniza (Qce): presencia de Alófana que sugiere la existencia de materiales de origen volcánico, se encuentran sobre puestas en formaciones de arcillolitas y depósitos de ladera.

Depósito Aluvial Conos (Qcc): se trata de depósitos detríticos compuestos por gravas, cantos y bloques redondeados a subredondeados, que pueden alcanzar más de 1m de diámetro, incluidos dentro de una matriz areno arcillosa.

Depósito Aluvial Terrazas (Qal): materiales transportados y depositados en la zona de transición entre las formaciones rocosas y la zona plana.

Depósito Aluvial Cauces (Qca): composición heterogénea de arenas, limos, arcillas, gravas y bloques redondeados, dispuestos en el lecho de ríos.

Relleno Antrópico de Escombros (Rae): depósitos de escombros de excavación conformados técnicamente o dispuestos en los lechos de las quebradas.

Relleno Antrópico de Basuras (Rab): depósitos de basuras conformados técnicamente o dispuestos en los lechos de las quebradas.

4.2.4 Zonificaciones geotécnicas anteriores

Fueron tenidas en cuenta las zonificaciones geotécnicas realizada en el año 1988 y 1995 por ingeominas, esta última hace parte del estudio de MSZB. Estas zonificaciones se basaron principalmente en el mapa geológico de Bogotá y en alrededor de 40 exploraciones profundas, cientos de sondeos someros y descripciones estratigráficas de

pozos de agua. En la **Figura 4.7** y en la **Figura 4.8** se presentan estas zonificaciones geotécnicas.

En general, a partir de estos trabajos en la ciudad de Bogotá se identifican cinco zonas con características geomecánicas homogéneas, que de acuerdo al estudio de MZSB se describen a grandes rasgos de la siguiente manera:

Roca o zona montañosa: caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillositas cuya resistencia y deformabilidad depende de su humedad.

Piedemonte o conos de deyección: conformado por materiales que bajo el efecto de la gravedad se han transportado y depositado en forma de cono o abanico, donde predominan los materiales granulares gruesos con matriz arcillosa.

Suelos duros: predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosas de origen aluvial.

Suelos blandos: caracterizados por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad y de origen lacustre.

Ronda de ríos y humedales: pertenecen a esta zona los cuerpos de agua de la ciudad, tales como: humedades, antiguos lagos y zonas de inundación.

4.2.5 Exploraciones geotécnicas

En la actualidad la DPAE cuenta con una recopilación importante de exploraciones geotécnicas realizadas en toda la ciudad, dentro de esta información esta:

- Exploraciones del estudio de MZSB.
- Exploraciones para la línea del Metro suministradas por UNIANDES.
- Exploraciones suministradas por la SCG de infraestructura y edificios.
- Exploraciones realizadas en los estudios de efectos locales.

Esta información fue compilada por la SCG, UNIANDES y DPAE, logrando consolidar las características y propiedades geotécnicas de cada exploración, para posteriormente identificar variaciones espaciales de algunos parámetros geomecánicos. La distribución de la información se puede apreciar en la **Figura 4.9**, donde se destaca el buen cubrimiento en el piedemonte, en la zona lacustre y conos aluviales. Se identifica igualmente un menor número de exploraciones en la zona sur de la ciudad y hacia la llanura de inundación del río Bogotá.

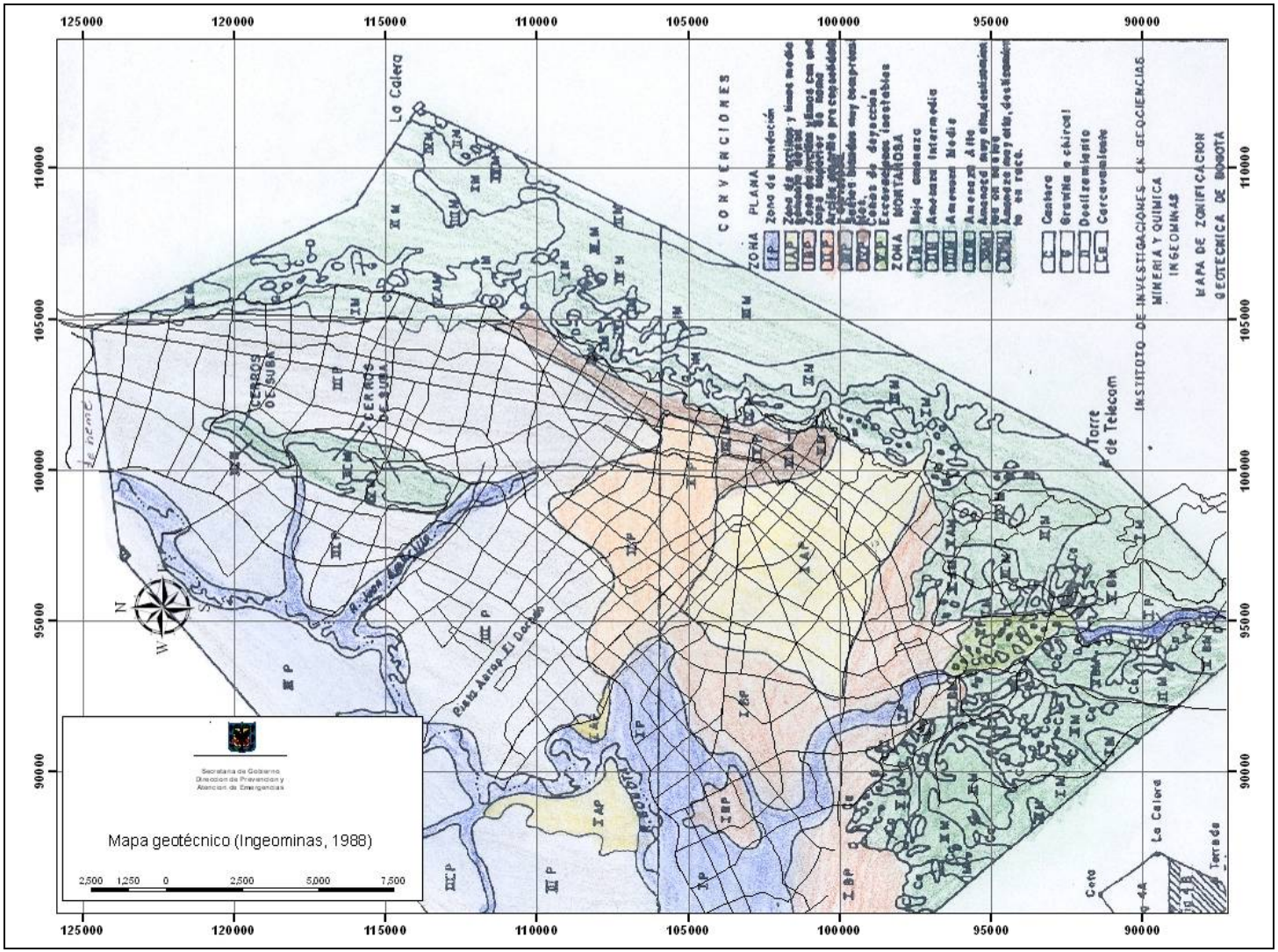


Figura 4.7. Mapa Geotécnico Ingeominas 1988

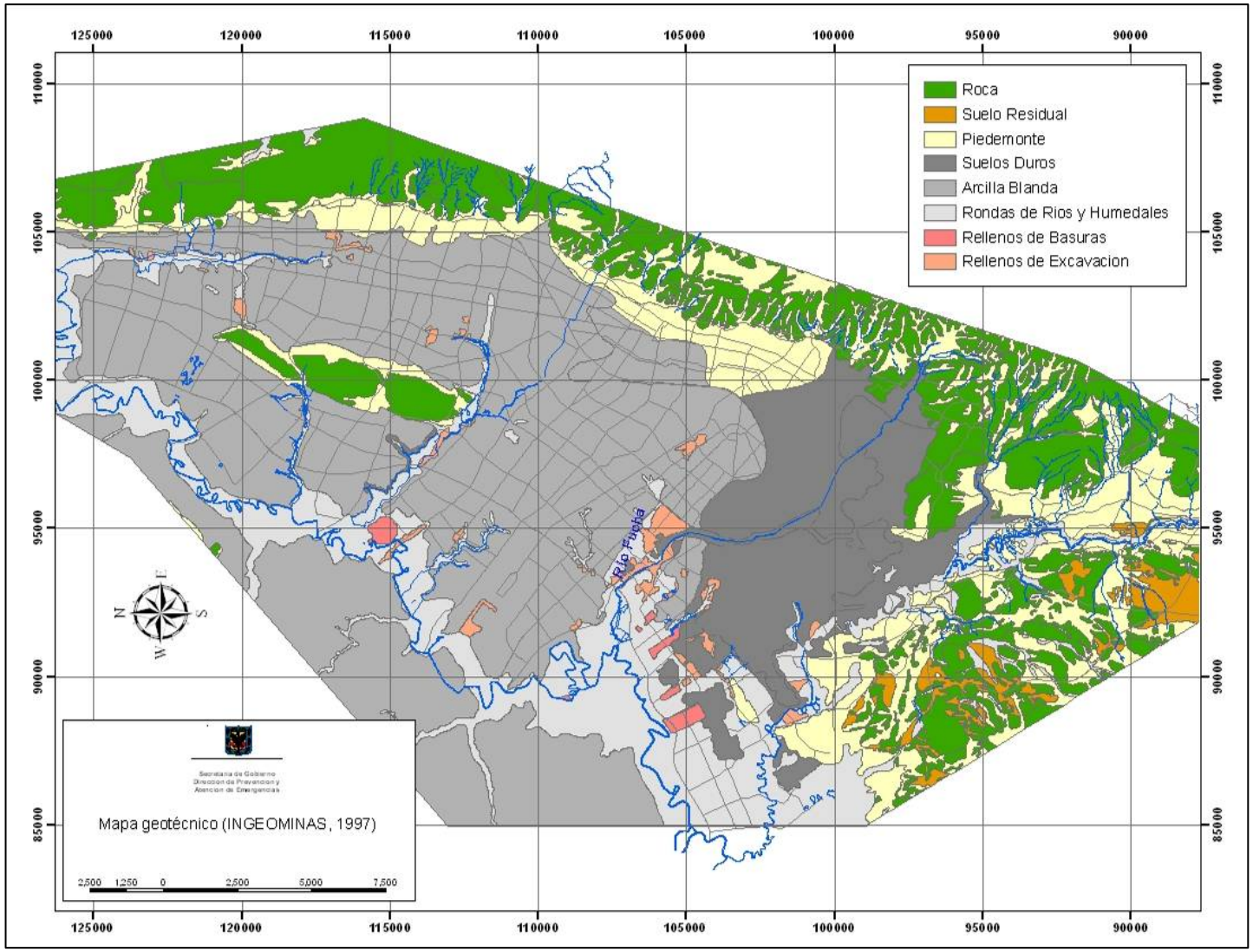


Figura 4.8. Mapa Geotécnico Ingeominas 1997

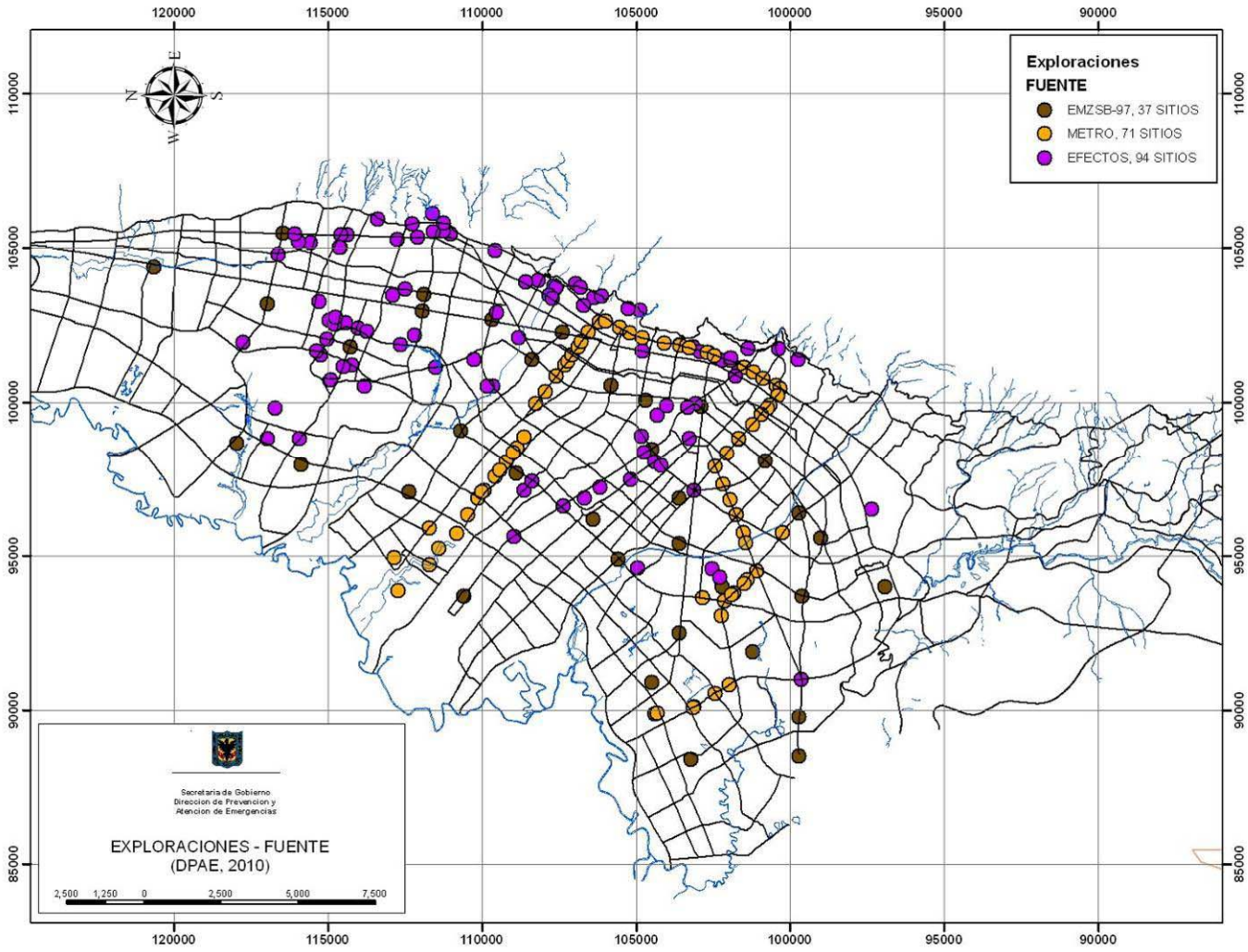


Figura 4.9. Localización de exploraciones geotécnicas

4.2.6 Variación espacial de la humedad natural y velocidad de onda cortante

Los análisis geo-estadísticos se emplearon para obtener la variación espacial de las propiedades geotécnicas usando procesos de interpolación que no tiene dependencia de la variable analizada, sino únicamente de la distancia que separa a cada una de las determinaciones de la variable. De este modo se puede apreciar un marco generalizado de la variación de las propiedades geotécnicas de cada una de las zonas.

El resultado de la variación de la humedad natural promedio de los 50 m superficiales se presenta en la **Figura 4.10**, donde se puede distinguir claramente que los valores más altos corresponden a la zona lacustre al norte de la ciudad, oscilando entre 110 y 170%, los valores más bajos se encuentran en las zonas de piedemonte y complejo de conos al sur de la ciudad, variando entre un 10 y 50%. Finalmente, se identifica una zona intermedia entre las dos anteriores con valores de humedad natural entre 50 y 110%, lo que se puede considerar para definir una zona de transición entre el material lacustre y el material aluvial.

Similar al análisis de la humedad natural, se presenta en la **Figura 4.11** la variación de la velocidad de onda cortante promedio de los 50 m superficiales, donde se obtiene para la zona lacustre, valores entre 110 y 130 m/s, en la zona aluvial valores entre 200 y 300 m/s, en el piedemonte entre 250 y 350 m/s y en la zona de transición lacustre - aluvial variaciones entre 130 y 170 m/s.

Es importante anotar que los intervalos de variación presentados son aproximados, así mismo la distribución espacial de los mismos, puesto que el proceso de interpolación y análisis no se tiene un control total en las condiciones de frontera y la precisión dependerá de la cantidad y calidad de los puntos de control, por lo tanto esta información no debe tomarse como valores absolutos, sino únicamente definen como tendencias generales muy útiles para zonificar.

4.2.7 Perfiles típicos

Una manera de sintetizar la información del subsuelo para visualizarla en planta es por medio de la identificación de perfiles típicos, lo que consiste en resumir en una secuencia simplificada de clasificaciones de suelos la estratigrafía de una exploración, por ejemplo un perfil conformado por la intercalación de arcillas arenosas que suprayacen a arcillas blandas de alta plasticidad, se podría representar como CL, CH. Para efectos de zonificar es conveniente emplear una simbología adecuada para los perfiles típicos, este caso consistió en seleccionar un color para el tipo de material predominante en la exploración y dibujar la dimensión del símbolo acorde con el tamaño de la partícula del suelo, símbolos pequeños para suelos finos como arcillosos y grandes para suelos gruesos como gravas. El resultado de este análisis se ilustra en la **Figura 4.12**.

A partir de los perfiles típicos se identifica que en la zona de piedemonte predominan los materiales granulares gruesos, hacia la parte plana se identifican tres perfiles, el de la zona lacustre con suelos arcillosos de alta plasticidad, el de la zona aluvial con suelos arenosos de baja plasticidad y los de la zona de transición entre las dos anteriores con intercalaciones de suelos arcillosos y arenosos. Esto se correlaciona adecuadamente con los mapas de humedad natural y velocidad de onda de corte promedio.

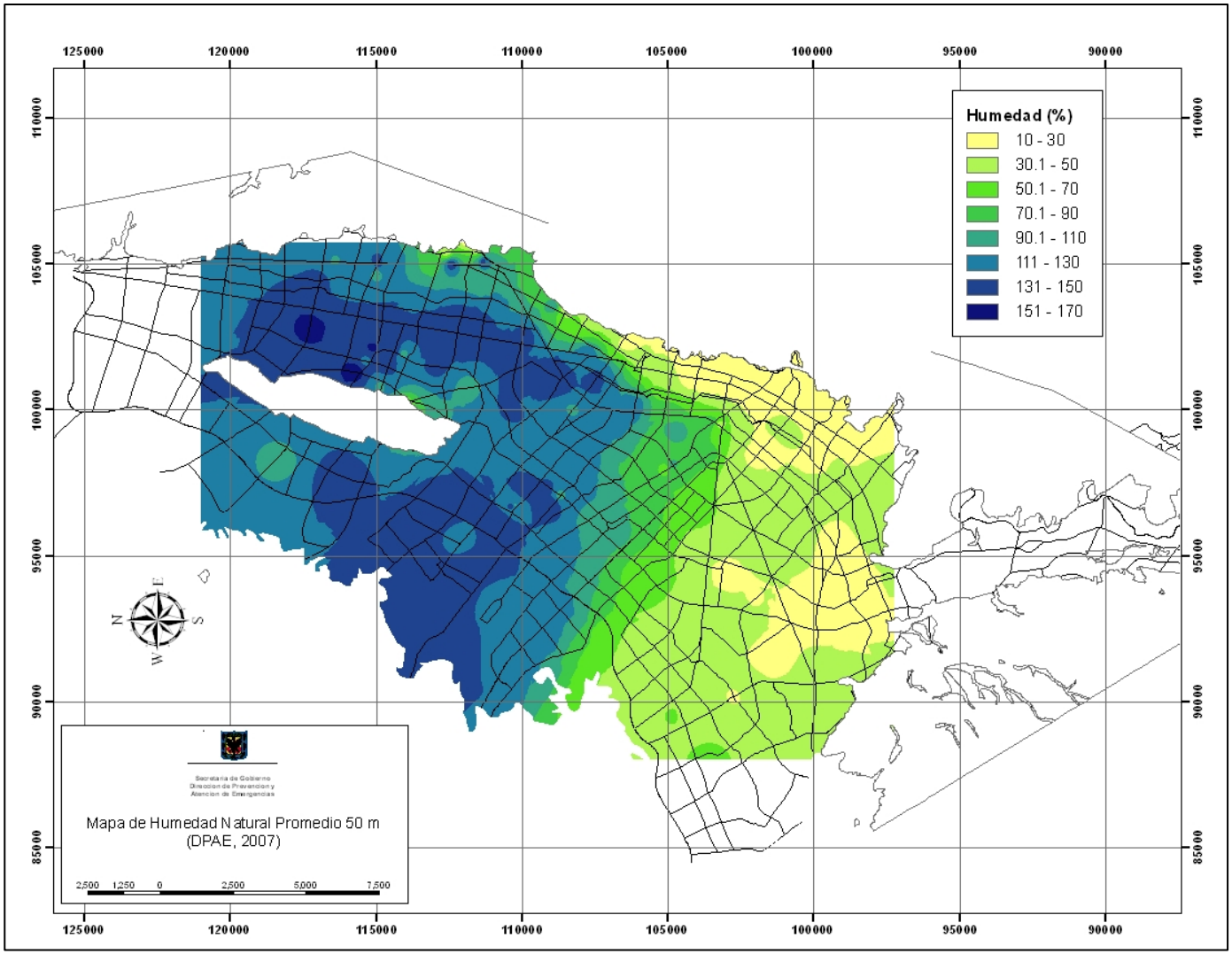


Figura 4.10. Variación de la humedad natural promedio hasta 50 m de profundidad

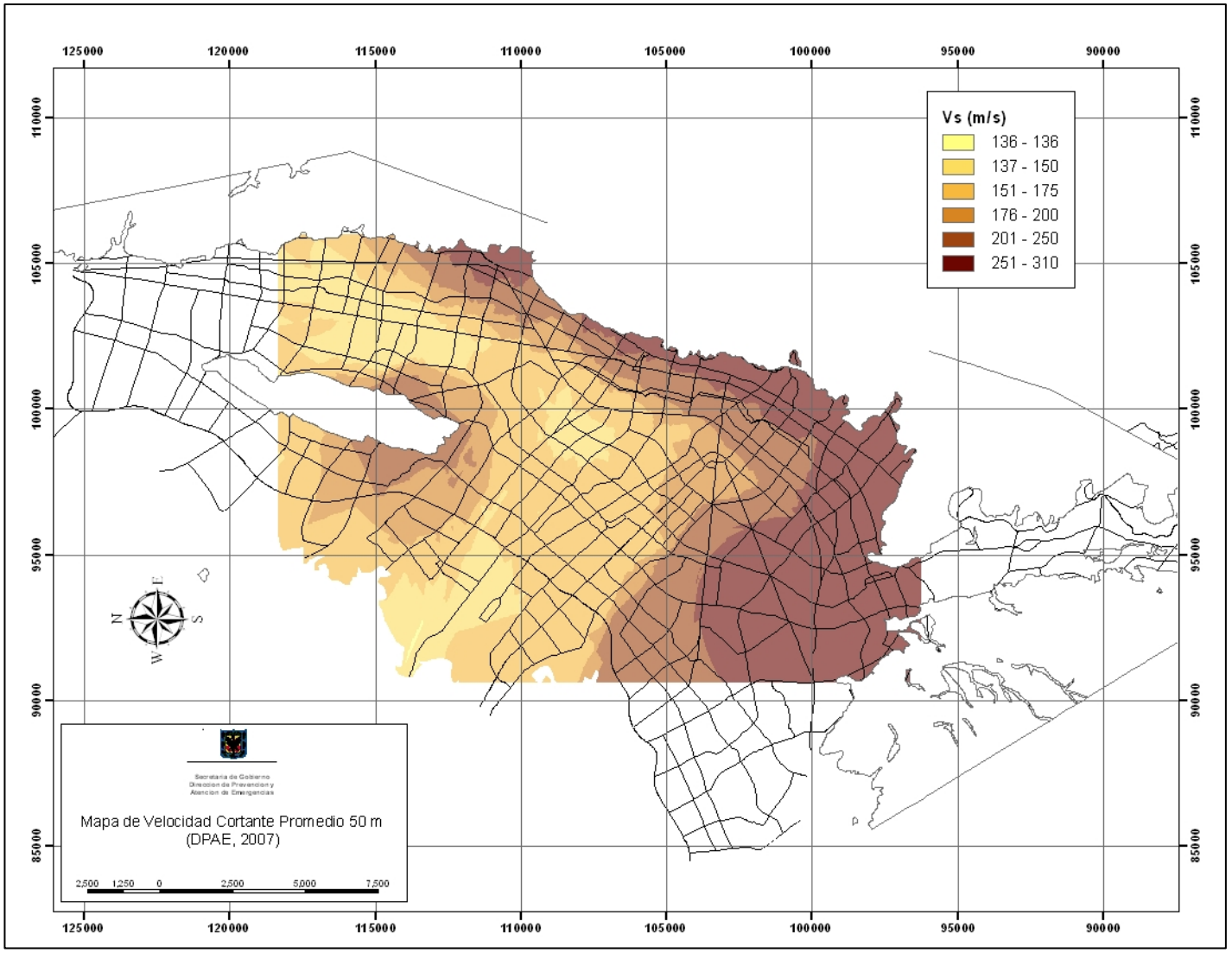


Figura 4.11. Variación de la velocidad de onda de corte promedio hasta 50 m de profundidad

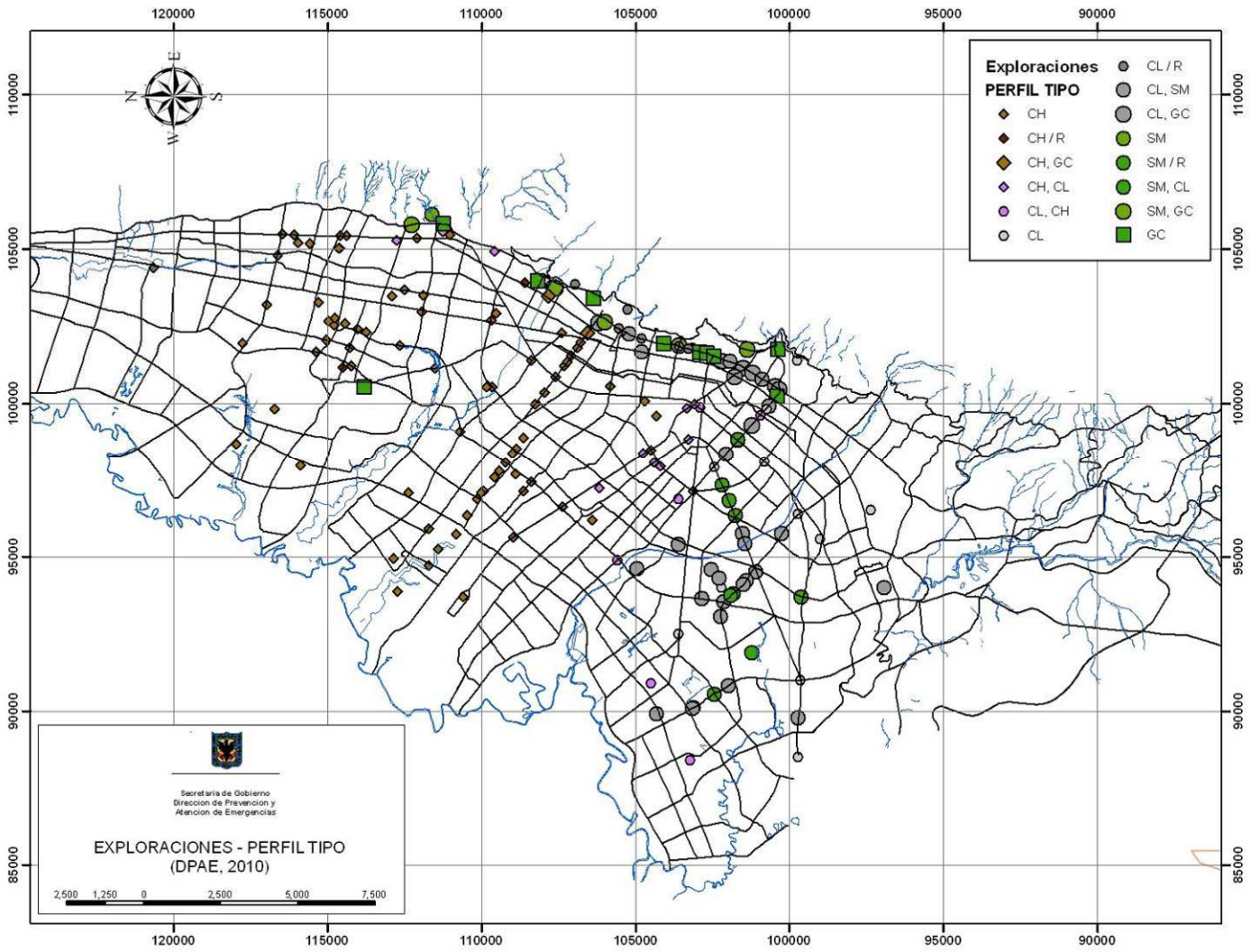


Figura 4.12. Mapa de perfiles típicos superficiales

4.2.8 Información sísmica

Como parte de los análisis de información sísmica se catalogaron los registros de vibración ambiental o microtrepidaciones que fueron realizados en el estudio de MZSB. Teniendo en cuenta las limitaciones de estas pruebas en depósitos de gran espesor y suelos duros, son útiles estos datos para correlacionar y caracterizar las zonas de comportamiento geotécnico a nivel superficial. Como se observa en la **Figura 4.13** los períodos de vibración oscilan entre 0.2 y 0.6 segundos, es decir, que son bajos para este tipo de depósito, puesto que corresponden posiblemente a un modo secundario de vibración del suelo, y por lo tanto probablemente se identifica el período de vibración de los metros mas superficiales, con ello se pueden fortalecer de manera importante la identificación de zonas. Se puede destacar de esta gráfica la correlación presente entre la zona lacustre con períodos entre 0.4 y 0.6 s y la zona aluvial y piedemonte con los períodos entre 0.2 a 0.3 s.

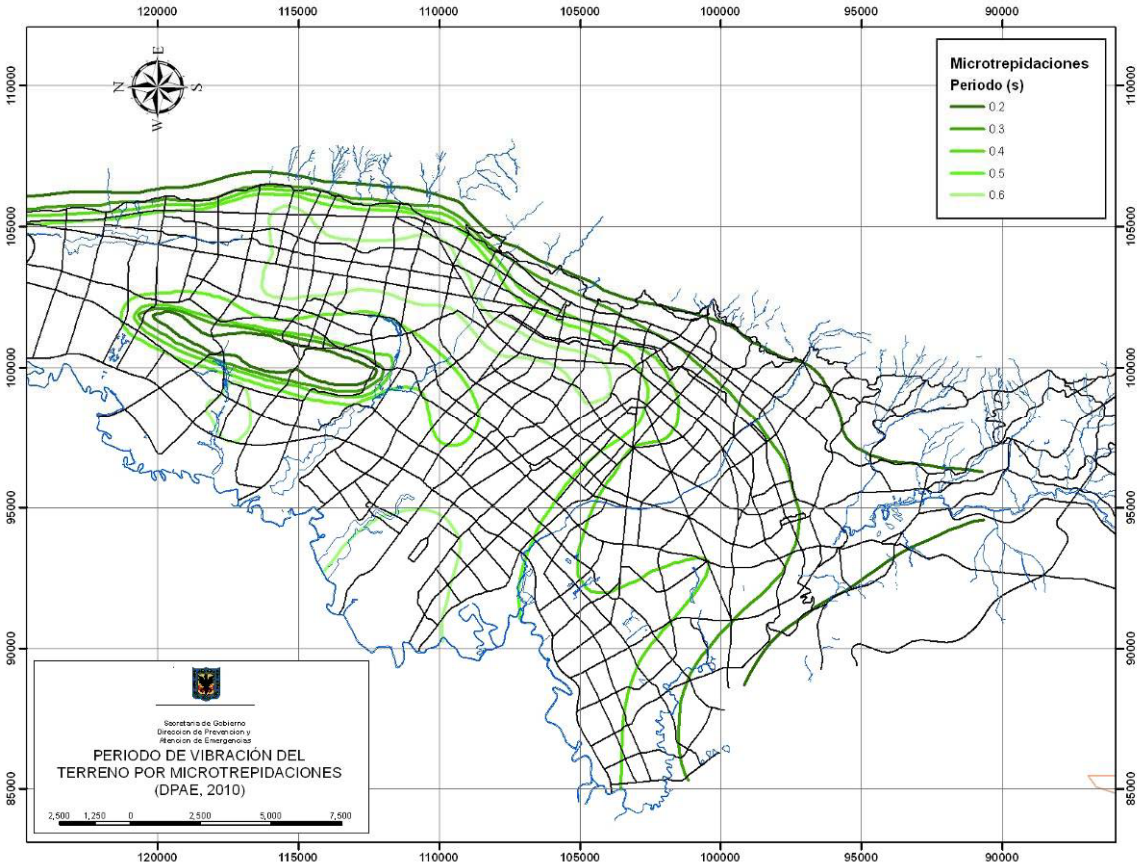


Figura 4.13. Mapa de isoperíodos por microtrepidaciones

Los resultados de la figura anterior fueron calculados teniendo en cuenta los datos medidos en el estudio de MZSB y en las estaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, RAB.

4.2.9 Cruces temáticos y análisis superficial

Para definir las zonas geotécnicas se tuvieron en cuenta las coberturas de información descritas anteriormente. Mediante herramientas del sistema de información geográfica se fueron definiendo las zonas geotécnicas de tal manera que fuesen consistentes con la información disponible.

Algunos de los criterios que se tuvieron en cuenta para la definición de las zonas se resumen a continuación:

- Las formaciones rocosas se agruparon de acuerdo con su tipo y competencia geomecánica, de modo tal que se dividieron en rocas de arenisca y rocas de arcillolita, donde son de mejor competencia las areniscas y con posibles problemas de estabilidad y menor competencia las arcillolitas.

- En las zonas de piedemonte, se agruparon parte de los complejos de conos y parte de los coluviones que se encontraban en las zonas próximas de los cerros, cuya geoforma y pendiente fuesen típicas de los depósitos de piedemonte, además se tuvo en cuenta los perfiles típicos con predominio de materiales granulares gruesos, lo cual ayudó considerablemente a afinar los límites de esta unidad. La manera final como se interpretaron las unidades geológicas de abanicos aluviales desde el punto de vista geotécnico se presenta en la **Figura 4.14**, donde se ilustran las partes que componen el abanico, el tipo de suelos que predomina, la geoforma típica y la zona geotécnica.

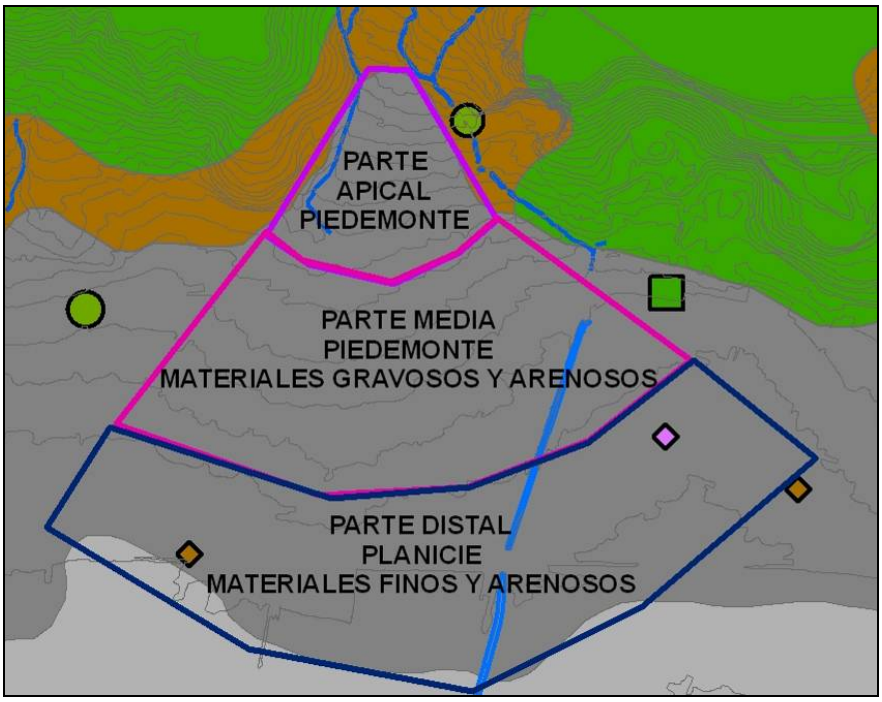


Figura 4.14. Interpretación geotécnica de unidades de abanicos aluviales

- A partir de las secciones bidimensionales modeladas por la SCG se analizó la variación superficial de la aceleración máxima, con lo que se pudo determinar los corredores de piedemonte e inferir hasta donde se presentan efectos topográficos debidos a la posición, profundidad y forma del basamento rocoso.

- La zona lacustre, aluvial y la de llanura de inundación, se definieron a partir de la geología, los mapas de variación de la humedad natural, la velocidad de onda y los perfiles típicos superficiales.

- En la zona lacustre (suelos blandos) se identificaron tres perfiles, de modo que se subdividió para tener en cuenta los sectores de transición e interdigitación con la zona aluvial (suelos duros).

- La zona aluvial (suelos duros) se dividió en dos partes con el fin de separar en los complejos de conos la parte apical y media de la distal, de manera tal que se asoció la parte apical y media a depósitos de piedemonte predominantemente gravoarenosos y la parte distal a suelos limosos y arcillo arenosos (ver **Figura 4.14**).

- La llanura de inundación se dividió en dos sectores para diferenciar la parte que se interdigita con la zona lacustre, donde predominan las arcillas blandas, de la que hace contacto con la zona aluvial, con predominio de materiales limosos y arcillo arenosos.

4.2.10 Mapa de zonificación geotécnica

Con base en la información disponible y los criterios anteriormente mencionados se presenta el Mapa de Zonificación Geotécnica de Bogotá (**MAPA No 1**) que se ilustra en la **Figura 4.15** y cuya síntesis se presenta en la **Tabla 4.1**.

Como se puede apreciar se conservaron las mismas cinco unidades geotécnicas identificadas en las anteriores zonificaciones, sin embargo, los principales aportes de este mapa están en la delimitación más precisa y subdivisión de las zonas de piedemonte y en la subdivisión de las unidades de planicie (lacustre, lacustre-aluvial y llanura de inundación) de acuerdo con la nueva información disponible y manteniendo una definición más de carácter geotécnico que geológico.

4.2.11 Secciones esquemáticas de los depósitos de la ciudad

Para complementar el modelo geotécnico es necesario visualizar, aunque sea de manera esquemática, cómo se relacionan las unidades geotécnicas entre sí y en general qué forma tiene la cuenca de sedimentación de la Sabana de Bogotá. Para esto, de la **Figura 4.16** a la **Figura 4.19** se presentan secciones esquemáticas del modelo tridimensional del depósito de Bogotá.

Para fines de ilustrar en los esquemas geotécnicos típicos, se interpretó desde el punto de vista geotécnico la Formación Sabana como arcillas de origen lacustre de consistencia blanda a muy blanda y la Formación Subachoque como arcillas arenosos de origen aluvial de consistencia firme a rígida, esta interpretación puede diferir un poco de la que se encuentra en los estudios geológicos, donde se definen las formaciones de acuerdo con su edad de formación sin tener en cuenta totalmente su composición geotécnica.

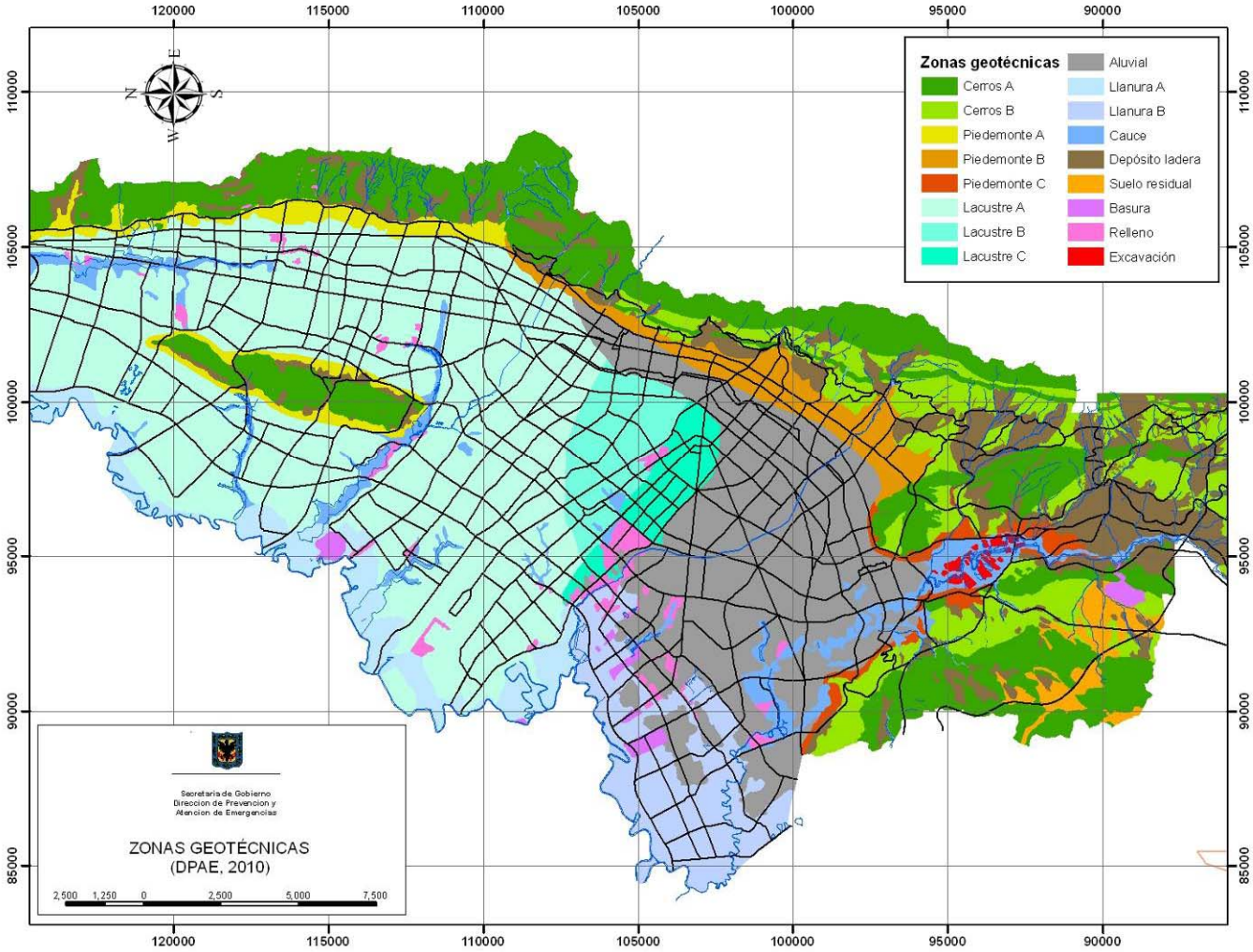


Figura 4.15. Mapa actualizado de zonificación geotécnica

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Espesor
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta pendiente	Areniscas duras	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas	
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de Arcillolitas	Cerros de moderada a alta pendiente	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte	Gravas arcillo arenosas compactas	Suelos de alta capacidad portante pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas	< 50 m
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro			Gravas areno arcillosas compactas		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur			Gravas areno arcillosas compactas		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles	20 - 500 m
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial			Arcillas arenosas firmes		
Aluvial	Suelo aluvial grueso a medio	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	Planicie	Arenas arcillosas sueltas a compactas	Suelos de mediana a alta capacidad portante poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto	50 - 250 m
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Llanura de Inundación	Llanura	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Suelos de moderada capacidad portante y compresibles, susceptibles a licuación	200 - 500 m
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial			Arenas sueltas y arcillas arenosas duras		
Cauce	Cauce activo o antiguo	Cauces Activos	Piedemonte y Planicie	Gravas arenosas sueltas a compactas	Suelos de baja a mediana capacidad portante, susceptibles a licuación y problemas de estabilidad de taludes	
Depósitos	Suelo de ladera	Depósitos de Ladera	Cerros	Gravas areno arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	5 - 15 m
Residual	Suelo residual	Suelo Residual	Cerros	Arcillas gravo arenosas firmes	Suelos de mediana a alta capacidad portante con posibles problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente	5 - 10 m
Basura	Relleno de basura	Rellenos de Basuras	Piedemonte y Planicie	Basuras	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos de Excavación	Piedemonte y Planicie	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Excavación	Excavación especial	Excavaciones Especiales	Piedemonte	Gravas arenosas sueltas a compactas	Zonas de explotación de agregados en el Río Tunjuelo, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	

Tabla 4.1. Descripción de las zonas geotécnicas

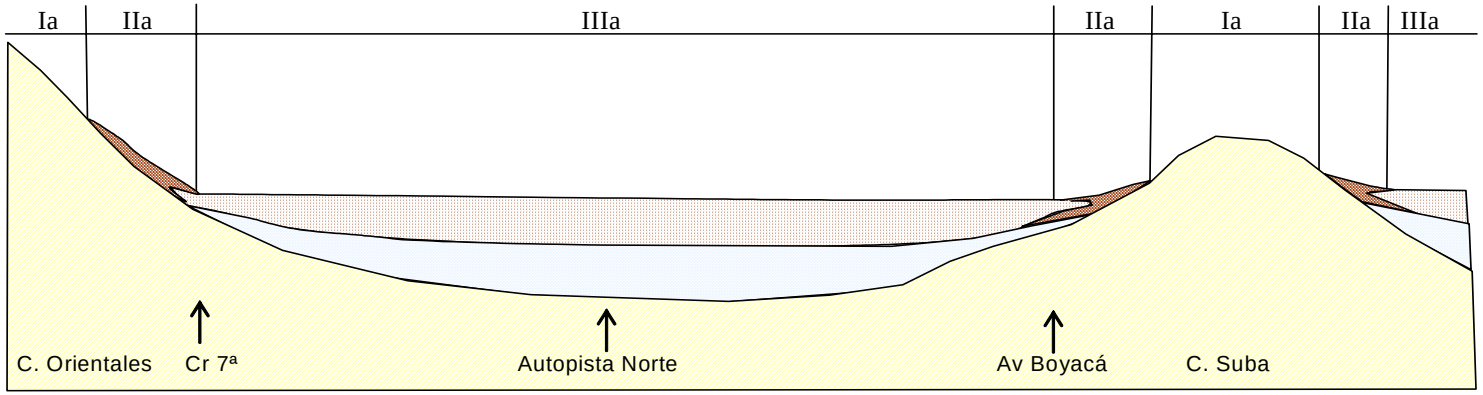


Figura 4.16. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 127 a Cl 200 aprox.

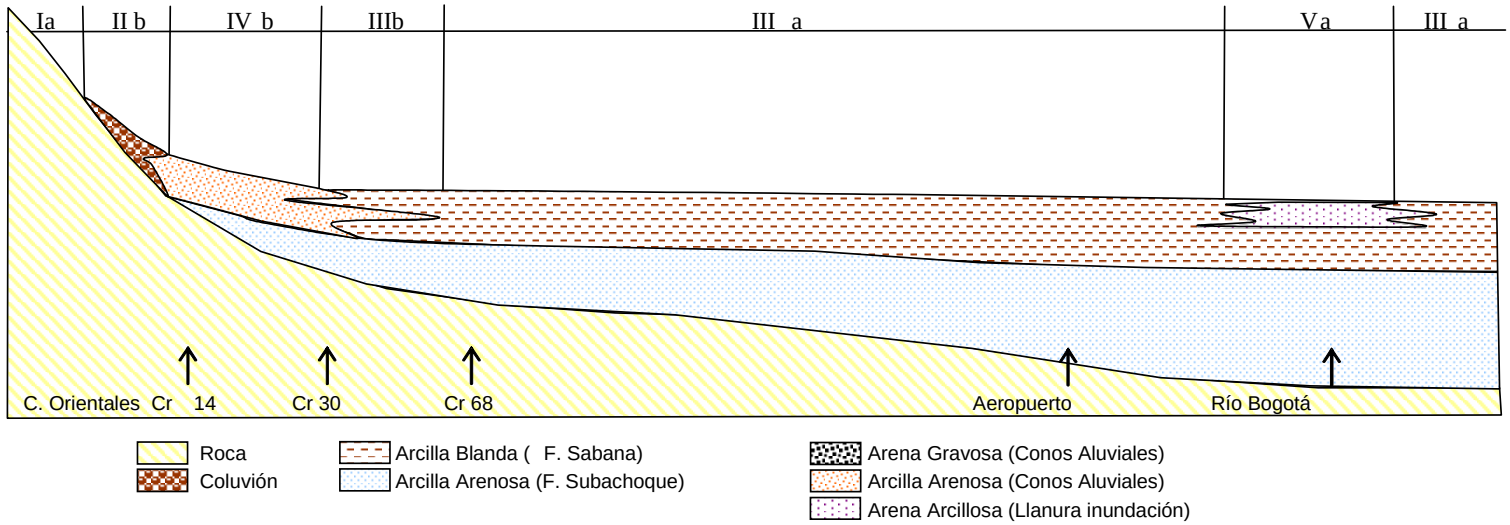


Figura 4.17. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 13 a Cl 127 aprox.

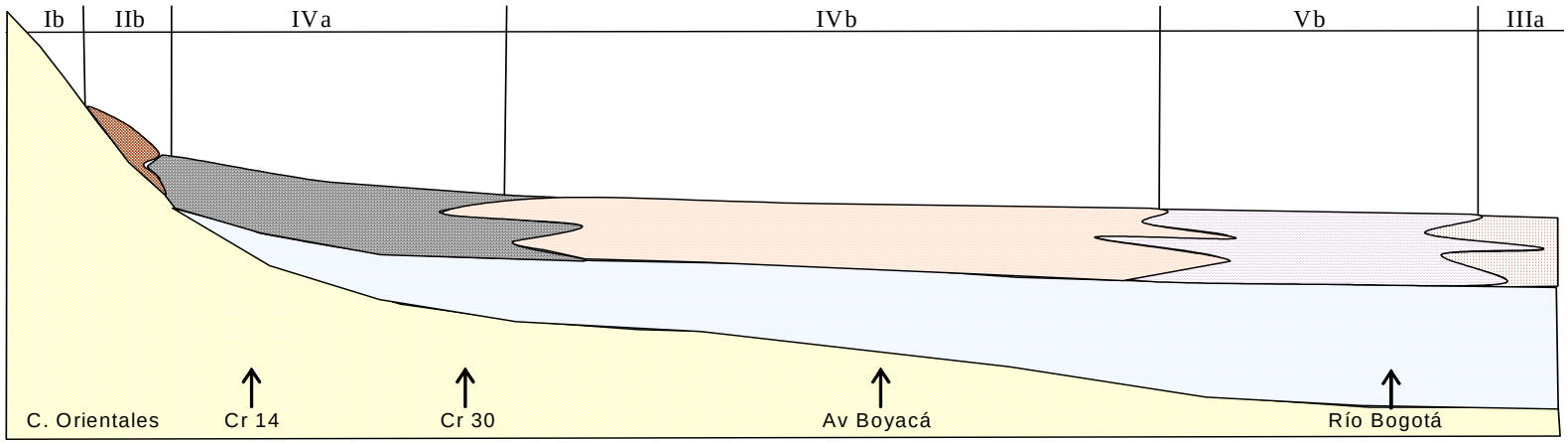


Figura 4.18. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 36 sur a Cl 13 aprox.

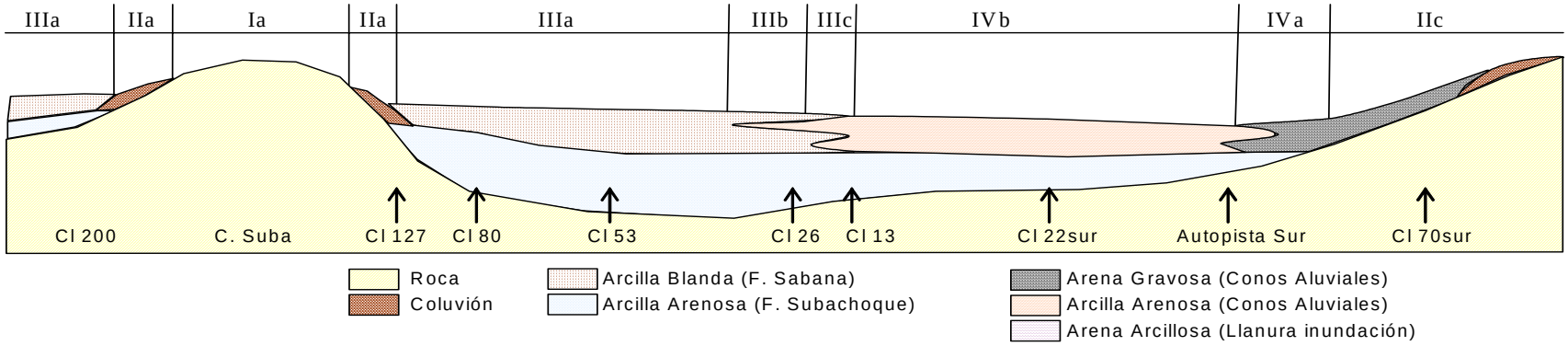


Figura 4.19. Esquema geotécnico típico de una sección norte – sur entre Cr 72 a Cl 86 aprox.

4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA RESPUESTA SÍSMICA

Es necesario para fines de evaluar la respuesta sísmica, contemplar además de las zonas geotécnicas anteriormente actualizadas la variación de la profundidad del depósito, dado que el espesor del sedimento modifica la respuesta dinámica cuando éste varia considerablemente, como es el caso de la Sabana de Bogotá, que va desde unos pocos metros en la zonas de piedemonte hasta 500 metros aproximadamente en las zonas más profundas de la cuenca.

Para tener en cuenta este aspecto se revisaron varias coberturas de información que fuesen útiles para definir la posición del basamento rocoso, de este modo se subdividieron las zonas geotecnias según su espesor de sedimento. Los intervalos de espesores de suelo se definieron a partir de análisis preliminares realizados de las respuestas sísmicas de los depósitos, y se llego a la propuesta que se presenta al final de este capítulo.

A continuación se resumen las características generales de la información que se tuvo en cuenta para realizar la actualización de la zonificación geotécnica para respuesta sísmica de Bogotá y el tratamiento que se le dio para tal fin.

4.3.1 Profundidad del basamento rocoso

En el estudio de MZSB – Subproyecto 7 (Ingeominas & Uniandes, 1997), se realizaron un buen número de pruebas geofísicas, como geo-eléctrica, pruebas de gravimetría y análisis de líneas de refracción sísmica, que junto con la información geológica y geotécnica de ese entonces, sirvieron para realizar el modelo de profundidad de basamento rocoso, donde se pudo conocer la forma de la cuenca de sedimentación se profundiza en sentido oriente occidente, llegando hasta 500 m de espesor los depósitos hacia el sector del Aeropuerto.

Sin embargo, en este mapa que se ha detectado que los contactos con los afloramientos de las formaciones de roca y la profundidad del basamento en las zonas de menos de 50 m en varios sectores no es muy preciso, debido principalmente a la escala de detalle del mismo, por lo cual se le ha asociado una precisión de +/- 25 m.

Por lo anterior, se le dedicaron grandes esfuerzos a mejorar el mapa de basamento rocoso, trabajo desarrollado junto con la SCG, que realizó los análisis geo-estadísticos de nueva información disponible, en la que se tuvo en cuenta información de pozos profundos de agua, suministrados en los estudios del Geólogo Lobo Guerrero y las exploraciones geotécnicas que lograron detectar el contacto con las formaciones rocosas, principalmente en las zonas de piedemonte. Los resultados presentados por la SCG se calibraron y ajustaron para llegar al resultado que se ilustra en la **Figura 4.20**.

4.3.2 Período fundamental del suelo

A partir de los modelos de respuesta unidimensionales se pueden calcular sus respectivos períodos fundamentales de vibración, obteniendo así el mapa de iso-períodos fundamentales, este trabajo se basó en la propuesta de UNIANDES (2006) y los modelos DPAE (2010) ajustando las condiciones de frontera por la presencia de los cerros tal como se ilustra en la **Figura 4.21**.

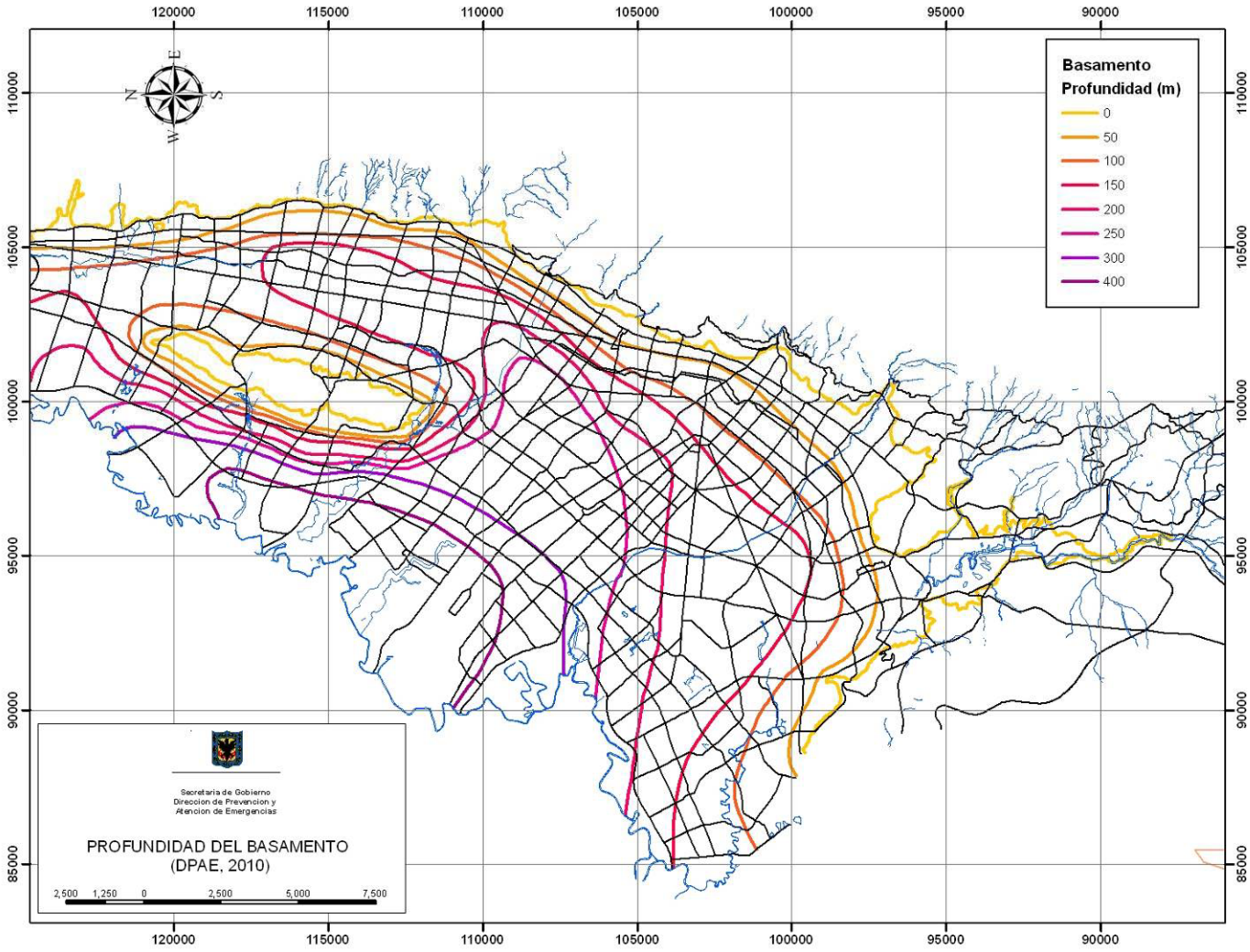


Figura 4.20. Modelo de basamento rocoso actualizado por SCG y FOPAE

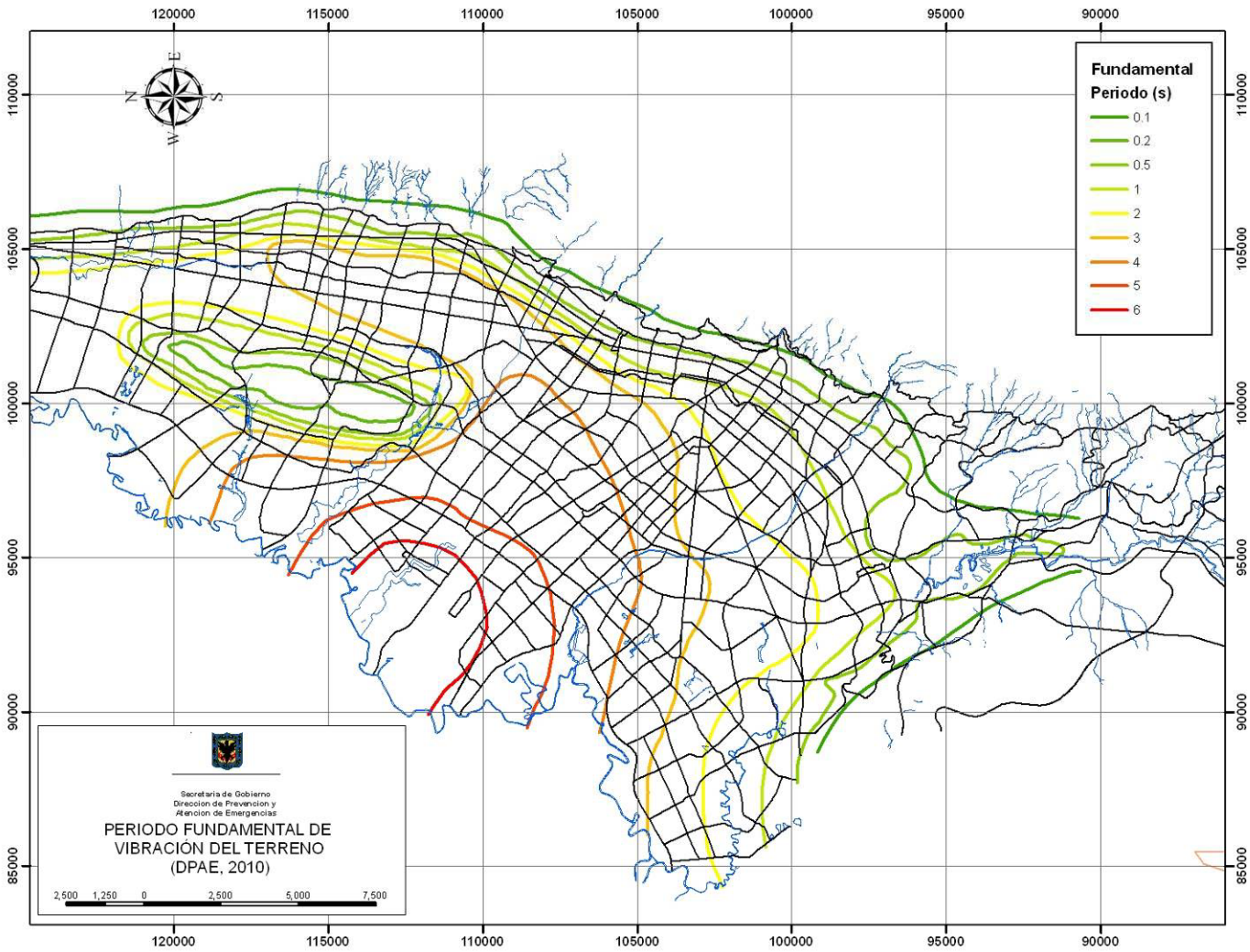


Figura 4.21. Isoperíodos de los modelos de respuesta actualizado con datos de UNIANDES y FOPAE

En el mapa de isoperíodos fundamentales se observa que los períodos varían entre 0.2 a 6 s, lo que corresponde al período de vibración de toda la columna de suelo, presentándose los valores más altos en la zona lacustre profunda, los valores intermedios en la zona aluvial profunda y los períodos más bajos se encuentran en el piedemonte. Sin embargo, se aprecia que no hay un control total con los afloramientos de roca, por ejemplo en el sector del cerro de suba, por lo que se recomienda que sea actualizado y calibrado este mapa, dado que este sirve para identificar la posible resonancia entre el período de vibración de las estructuras con el período fundamental del suelo cuando llegan a coincidir.

4.3.3 Cruces temáticos y análisis en profundidad

Con la cobertura del modelo actualizado de basamento rocoso y el mapa de período fundamentales del depósito se logró refinar el modelo de profundidad. Como criterios adicionales que se consideraron para realizar la subdivisión de las unidades geotécnicas se tiene:

- Debido a la resolución de la información, se consideró que lo más conveniente era marcar cada 50 m la profundidad del basamento. La zona de piedemonte se conservó igual al del mapa geotécnico dado que el espesor de estos depósitos es predominantemente menor a 50 m.

- Con base en el análisis preliminar de las respuestas dinámicas de los modelos y teniendo en cuenta el efecto del confinamiento en las propiedades dinámicas, se establecieron los intervalos de variación para subdividir las unidades geotécnicas.

- La zona de llanura aluvial para efectos de la respuesta sísmica se une a la zona lacustre o aluvial próxima debido que la diferencia está en los últimos metros, por lo cual se espera que en términos generales su respuesta dinámica sea controlada por la zona subyacente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en esta zona puede haber terrenos potencialmente licuables.

- Las unidades de tratamiento especial como rellenos, excavaciones y basuras se unieron a la unidad que la subyace, dado que la respuesta de estas unidades es particular y no es posible definirles un comportamiento típico.

4.3.4 Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica

El mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica es un resultado parcial antes de obtener el nuevo mapa de efectos locales, puesto que aún no se le ha asociado a cada zona su comportamiento sísmico o efectos de sitio (amplificación, licuación y efecto topográfico), temas que se abordaran en el próximo capítulo.

En la **Figura 4.22** se presenta el Mapa de Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica y en la **Tabla 4.2** se resume la leyenda de éste con las características de cada zona. Se plantean cuatro grandes zonas: cerros, piedemonte, lacustre y aluvial, que al subdividirse de acuerdo con la subzona geotécnica y el espesor del depósito se obtienen en total 31 zonas de respuesta sísmica homogénea, lo que garantiza la gradual variación espacial en la respuesta de sitio y de esté modo se evitan cambios bruscos entre una unidad y la contigua, que se tienen en la zonificación actual.

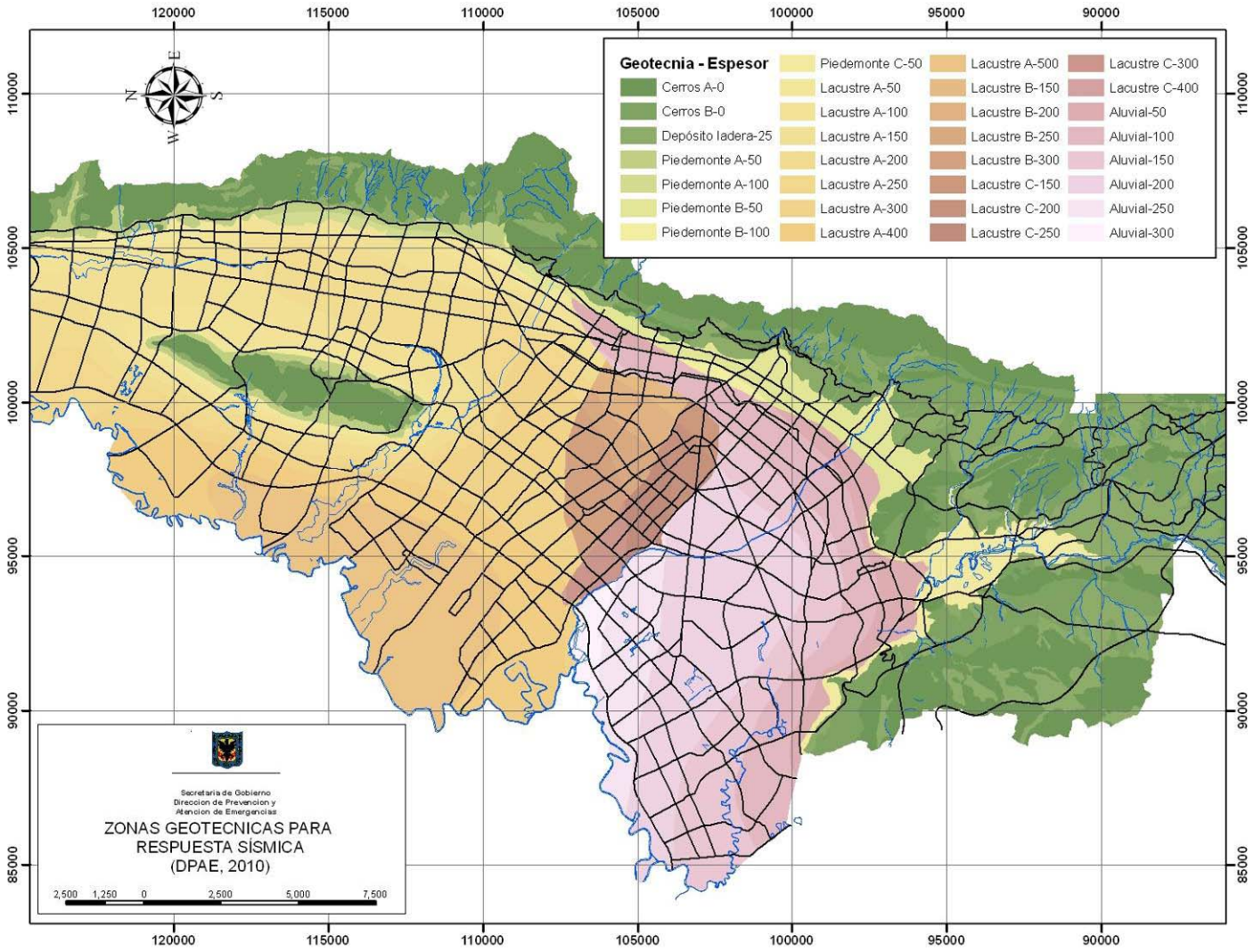


Figura 4.22. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica

Nombre	Geotecnia	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Geología	Geomorfología
Cerros A	Rocas	< 6	< 0.3	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta y moderada pendiente
Cerros B				Formaciones de Arcillolita	
Depósito ladera	Suelos de ladera	< 25	< 0.4	Depósitos de ladera	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	< 50	0.3-0.4	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte
		50-100	0.4-0.6		
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro	< 50	0.3-0.4		
		50-100	0.4-0.6		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur	< 50	0.3-0.6		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	< 50	1.0-1.5	Terraza Alta - Lacustre	Planicie
		50-100	1.5-2.5		
		100-150	2.5-3.0		
		150-200	3.0-3.5		
		200-250	3.5-4.0		
		250-300	4.0-4.5		
		300-400	4.5-5.5		
		400-500	5.5-6.5		
Lacustre B	Suelo lacustre blando	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
		300-400	4.3-5.3		
Aluvial	Suelo aluvial arenoso y fino	< 50	0.4-0.8	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	
		50-100	0.8-1.2		
		100-150	1.2-1.8		
		150-200	1.8-2.5		
		200-250	2.5-3.2		
		250-300	3.2-4.0		

Tabla 4.2. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica

CAPITULO 5

5 INTERPRETACIÓN DE SEÑALES REGISTRADAS POR LA RAB

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – DPAE realiza la operación y mantenimiento de la Red de Acelerógrafos de Bogotá – RAB, dicha red desde su puesta en funcionamiento en el año 1999 ha logrado registrar hasta el año 2008, 33 eventos sísmicos donde se destaca el sismo del pasado 24 de mayo de 2008 de magnitud 5.7 con epicentro en el municipio de Quetame Departamento de Cundinamarca, a tan solo 40 Km de la ciudad de Bogotá.

El presente capítulo resume los resultados obtenidos de los procesamientos e interpretaciones realizadas a los registros recopilados por la RAB, particularmente se analizó: la respuesta espectral de cada una de las estaciones; la relación espectral de la propagación de la onda sísmica desde la roca hasta la superficie, a partir de los acelerógrafos instalados en el contacto con el basamento rocoso; y la variación espacial de aceleración máxima, duración de la fase intensa y período fundamental de vibración.

Adicionalmente, se resumen los resultados obtenidos de la calibración realizada a los modelos de respuesta unidimensionales de los sitios con acelerógrafos en profundidad; para ello se estimaron algunas de las propiedades dinámicas con base en los registros de la RAB y se emplearon modelos de degradación del módulo y amortiguamiento recientemente desarrollados.

Aunque hasta el momento solo se cuenta con registros de poca intensidad y posiblemente los depósitos han respondido ante estos eventos en su intervalo elástico lineal, los análisis mostrados brindan un marco de referencia adicional para la evaluación detallada de la respuesta de sitio para el proyecto de la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá.

Este capítulo se basa en el informe “Procesamiento e Interpretación de señales de la Red de Acelerógrafos de Bogotá-RAB”, de Noviembre de 2008, por la Subdirección de Investigación, de la Coordinación de Estudios Técnicos de DPAE.

5.1 RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ

La Red de Acelerógrafos de Bogotá – RAB fue instalada a partir de un Convenio Interadministrativo suscrito en 1997 entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE y el Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS. Dentro del convenio, se adquirieron e instalaron un total de 30 acelerógrafos digitales marca KINEMETRICS, los cuales fueron distribuidos en toda el área urbana de la ciudad de Bogotá para conformar así la Red de Acelerógrafos de Bogotá.

5.1.1 Descripción de la red

Los 30 acelerógrafos digitales que conforman la RAB fueron distribuidos en toda el área urbana de la ciudad de Bogotá; de estos aparatos, 28 son modelo ETNA y 2 son modelo K2, siendo la principal diferencia entre estos equipos que los K2 tienen dos sensores, uno en superficie y otro a la profundidad de la roca (Down Hole) en cambio el tipo ETNA únicamente tiene un sensor en superficie. Estos equipos fueron instalados entre julio de 1998 y junio de 2000, La distribución de las estaciones puede verse en la **Figura 5.1**.

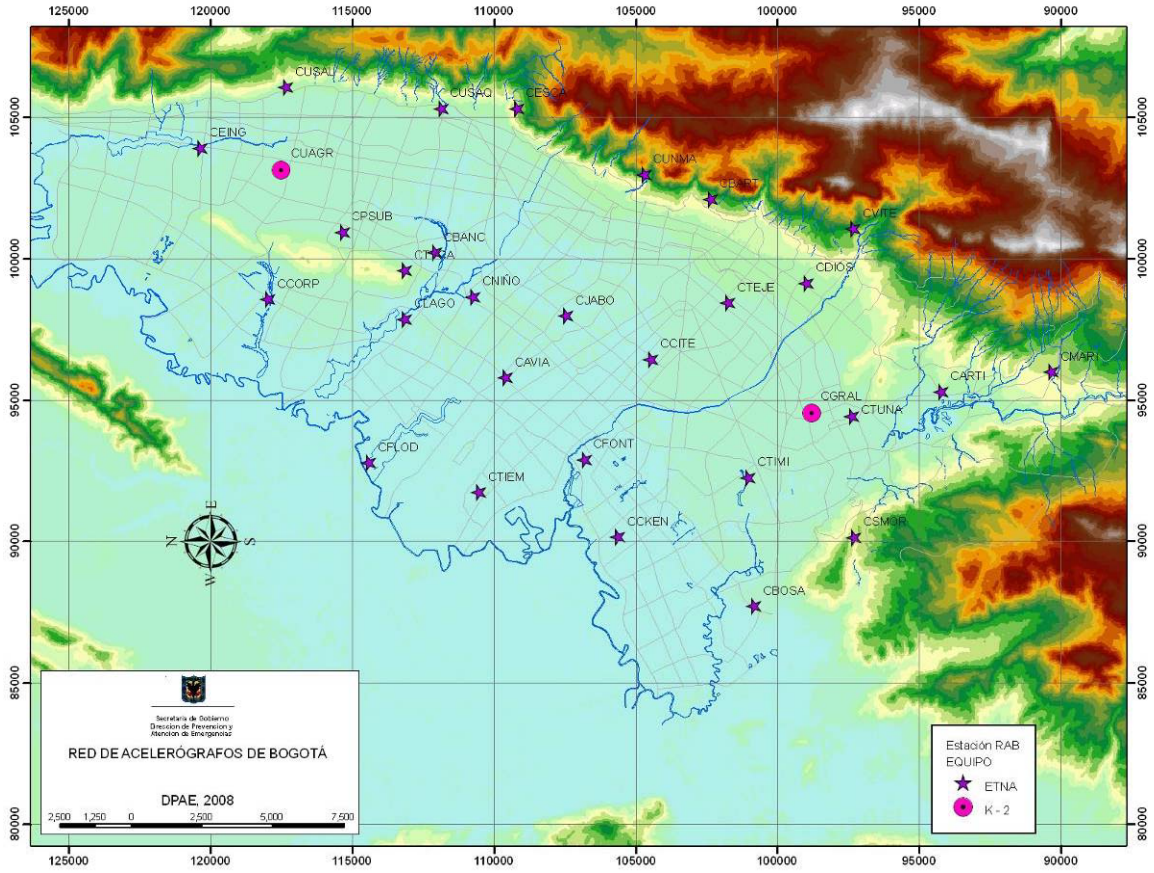


Figura 5.1. Localización de estaciones de la RAB (DPAE, 2008)

La RAB cuenta con acelerógrafos de la marca KINEMETRICS tipo ETNA y K-2 que tienen cada uno dos puertos de salida que pueden ser habilitados para comunicaciones remotas: Una interfase RS-232 la cual permite utilizar telemetría en tiempo real (recuperación remota) y el establecimiento de parámetros de respuesta del equipo (set-up), y un modem PCMCIA para acceso remoto que cumple con las mismas funciones mencionadas para el puerto RS-232. En la **Tabla 5.1** se resumen la localización de cada estación y sus características principales.

No.	CODIGO	NOMBRE	DIRECCION	LATITUD	LONGITUD	EQUIPO	GEOLOGIA	TOPOGRAFIA
1	CEING	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA	Av 13 No. 205 - 59	4.7833	-74.0458	ETNA	SUELO	PLANA
2	CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	Cr 7 No. 172 - 85	4.7559	-74.0264	ETNA	SUELO	PLANA
3	CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	Cl 68A Sur No. 87D - 09	4.6066	-74.1920	ETNA	SUELO	PLANA
4	CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	Av Corpas, Km. 3, Vía Suba	4.7617	-74.0940	ETNA	SUELO	PLANA
5	CUAGR	UNIAGRARIA	Cl 170 No. 50 - 90	4.7542	-74.0527	K - 2	SUELO/ROCA	PLANA
6	CPSUB	ACADEMIA DE POLICIA	Tr 66 No. 138 - 50	4.7379	-74.0726	ETNA	ROCA	ONDULADA
7	CUSAQ	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	Cl 127 No. 12A - 20	4.7064	-74.0332	ETNA	SUELO	PLANA
8	CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	Cr 7 con Cl 106	4.6822	-74.0332	ETNA	SUELO	ONDULADA
9	CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	Cr 57 No. 120 - 01	4.7085	-74.0791	ETNA	SUELO	ONDULADA
10	CTVCA	T.V. CABLE	Dg 120 No. 86 - 75	4.7181	-74.0848	ETNA	ROCA	ONDULADA
11	CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	Km. 3, vía Engativa- Cota	4.7295	-74.1464	ETNA	SUELO	PLANA
12	CAVIA	AVIANCA	Av El Dorado No. 92 - 30	4.6858	-74.1190	ETNA	SUELO	PLANA
13	CFONT	PLANTA DE BOMBEO FONTIBON	Cl 13 con Cr 96	4.6607	-74.1454	ETNA	SUELO	PLANA
14	CNIÑO	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO	Cl 71 No. 73A - 44	4.6962	-74.0932	ETNA	SUELO	PLANA
15	CJABO	JARDÍN BOTANICO	Cl 57 No. 61 - 13	4.6665	-74.0993	ETNA	SUELO	PLANA
16	CBART	COLEGIO SAN BARTOLOME	Cr 5 No. 34 - 00	4.6205	-74.0620	ETNA	ROCA	ONDULADA
17	CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	Cr 3 Este No. 60 - 50	4.6415	-74.0543	ETNA	SUELO	ONDULADA
18	CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Av 1 de Mayo No.10 - 01	4.5899	-74.0888	ETNA	SUELO	PLANA
19	CCITE	CITEC	Cr 65B No 17A - 11	4.6395	-74.1131	ETNA	SUELO	PLANA
20	CTIEM	CLUB EL TIEMPO	Cl 32 No. 125 - 01	4.6943	-74.1558	ETNA	SUELO	PLANA
21	CTIMI	PARQUE TIMIZA	Dg 42 Sur No. 62 - 67	4.6084	-74.1511	ETNA	SUELO	PLANA
22	CTUNA	PARQUE TUNAL	Cl 48 con Av El Tunal	4.5753	-74.1313	ETNA	SUELO	PLANA
23	CARTI	ESCUELA DE ARTILLERIA	Km. 4, vía Usme	4.5468	-74.1234	ETNA	SUELO	PLANA
24	CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	Cr 1A con cl 76A Bis sur	4.5117	-74.1171	ETNA	SUELO	PLANA
25	CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	Cl 77A Sur No. 65 - 15	4.5746	-74.1701	ETNA	ROCA	ONDULADA
26	CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	Cr 32 No. 12 - 55	4.6149	-74.0951	ETNA	SUELO	PLANA
27	CVITE	TANQUES DE VITELMA	Cl 9 sur con Cr 9 Este	4.5750	-74.0716	ETNA	SUELO	ONDULADA
28	CLAGO	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	Cl 90A No. 97 - 40	4.7180	-74.1003	ETNA	SUELO	PLANA
29	CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	Cl 44 Sur No. 45A - 15	4.5881	-74.1301	K - 2	SUELO/ROCA	PLANA
30	CCKEN	COL-KENNEDY	Cl 38 Sur No 107C - 29	4.6459	-74.1715	ETNA	SUELO	PLANA

Tabla 5.1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos (DPAE, 2008)

Posteriormente, en el año 2003 se suscribió un convenio especial de cooperación entre el FOPAE y el INGEOMINAS, con el fin de implementar la transmisión de datos por telemetría entre las estaciones remotas y las estaciones maestras localizadas en las instalaciones de INGEOMINAS y el FOPAE. Con la implementación de este sistema se logró contar con la información registrada en los acelerógrafos, verificar la condición de funcionamiento de los aparatos, tal como carencia de fluido eléctrico, configuración del equipo y calibración de los parámetros de respuesta de las estaciones, todo de manera remota. Por otra parte, se desarrolló en este mismo convenio un software que permite comunicarse con las estaciones y realiza un procesamiento de la señal para obtener algunos parámetros básicos.

5.1.2 Eventos registrados

Una vez recibida la información en la estación maestra se procede a verificar si el registro corresponde efectivamente a un sismo o se trata de ruido, para lo cual se acude al catálogo de eventos sísmicos que está publicado en la página web de INGEOMINAS, de donde se obtienen los datos del evento y se asigna a cada señal. En la **Tabla 5.2** se presentan los eventos registrados por las estaciones de la RAB hasta el año 2008.

Es importante mencionar, que las estaciones con un mayor número de eventos son aquellas que cuentan con sensores en profundidad (CUAGR y CGRAL), puesto que el nivel de activación del sensor es muy bajo, a diferencia de las estaciones ubicadas en superficie que tienen un nivel de disparo alto por el ruido ambiental del sitio.

No	Fecha D/M/A	Hora UT	Sismo	Magnitud (ML)	Profundidad (km)	Coordenadas del Epicentro		Estaciones que registraron
						Lat. N	Long. E	
1	25-Ene-99	18:19	Córdoba (Quin.)	6.2	Superficial	4.44	-75.71	CBART
2	25-Ene-99	22:04	Córdoba (Quin.)	5.4	Superficial	4.41	-75.73	CBART
3	14-Abr-99	07:26	Nido de Bucaramanga (Sant.)	6.1	170	6.82	-73.14	CBART
4	01-Jun-99	21:42	Guayabetal (Cund.)	5.2	Superficial	4.29	-73.73	CEING, CBART
5	10-Jun-99	03:22	Quetame (Cund.)	4.7	Superficial	4.31	-73.79	CBART
6	17-Jul-99	12:23	Sativasur (Boya.)	5.6	Superficial	6.10	-72.74	CEING, CUSAL, CCORP, CPSUB, CAVIA, CBART
7	08-Nov-99	05:52	Betulia (Sant.)	6.5	160	6.92	-73.18	CEING, CUSAL, CCORP, CUAGR, CPSUB, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CBART, CDIOS, CTUNA, CARTI, CVITE, CGRAL, CRADI
8	05-Feb-00	21:53	Nido de Bucaramanga (Sant.)	6	160	6.77	-73.21	CUAGR, CTVCA
9	12-Sep-00	10:55	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.9	160	6.76	-73.18	CUAGR, CBART
10	08-Nov-00	07:01	Juradó (Choc.)	6.4	Superficial	7.13	-77.94	CUAGR, CFLOD
11	24-Nov-00	19:51	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.7	160	6.79	-73.02	CUAGR, CTVCA
12	17-Dic-00	06:14	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.8	153	6.77	-72.97	CEING, CBART, CUAGR, CPSUB, CUSAQ, CTVCA, CLAGO
13	03-May-01	16:14	Los Santos (Sant.)	5.3	159	6.83	-73.06	CUAGR
14	18-May-01	15:04	Los Santos (Sant.)	5.5	159	6.82	-73.07	CBART, CTVCA, CUAGR
15	22-Sep-01	03:23	Tuluá (Valle)	6.1	180	3.99	-76.09	CUAGR, CBART, CGRAL, CTVCA
16	19-Nov-01	21:01	Cepitá (Sant.)	6.8	163	6.80	-72.97	CEING, CUAGR, CGRAL, CPSUB
17	12-May-02	06:23	Los Santos (Sant.)	5.2	164	6.85	-73.06	CUAGR
18	12-Jul-02	18:08	Cepitá (Sant.)	5.3	174	6.84	-73.03	CUAGR
19	23-Nov-02	23:56	La Uribe (Meta)	5.6	Superficial	3.31	-74.41	CAVIA, CUAGR, CUSAQ
20	22-Ene-03	15:55	Colombia (Huil.)	5.2	Superficial	3.58	-74.54	CAVIA, CUAGR
21	03-Oct-04	08:30	Los Santos (Sant.)	5.6	158	6.84	-73.04	CUAGR, CGRAL
22	15-Nov-04	09:06	Océano Pacífico	6.7	24	4.81	-77.79	CUAGR, CEING
23	25-Feb-05	06:41	Los Santos (Sant.)	5.8	153	6.78	-73.17	CUAGR
24	21-Abr-05	03:39	Tadó (Choc.)	5.3	88	5.19	-76.39	CUAGR
25	26-Sep-05	01:55	Perú (Mw)	7.5	132	-5.61	-76.37	CUAGR
26	06-May-07	04:47	Betulia (Sant.)	6	136	6.88	-73.26	CUSAL, CBANC
27	17-Feb-08	21:16	Los Santos (Sant.)	5.6	143	6.84	-73.06	CUAGR, CGRAL
28	25-Mar-08	07:38	Guaduas (Cund.)	4.7	Superficial	5.06	-74.72	CUAGR, CGRAL
29	28-Mar-08	16:36	Zapatoca (Sant.)	5.3	135	6.88	-73.20	CUAGR
30	24-May-08	19:20	Quetame (Cund.)	5.7	Superficial	4.40	-73.81	CEING, CUSAL, CBOSA, CCORP, CUAGR, CUSAQ, CESCA, CBANC, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CNIÑO, CJABO, CBART, CUNMA, CCITE, CTIEM, CTIMI, CTUNA, CMARI, CSMOR, CTEJE, CVITE, CGRAL, CCKEN
31	24-May-08	19:23	Quetame (Cund.)	4.5	Superficial	4.42	-73.83	CUAGR, CMARI, CBART
32	24-May-08	20:08	Quetame (Cund.)	4.4	Superficial	4.41	-73.76	CMARI
33	24-May-08	20:21	Quetame (Cund.)	4.2	Superficial	4.37	-73.72	CGRAL

Tabla 5.2. Eventos registrados por la RAB (DPAE, 2008)

5.1.3 Procesamiento y publicación de registros

Una vez se obtienen los registros de las estaciones de la RAB, estos deben someterse a varios procedimientos con el fin de convertirlos a un formato compatible para que puedan ser interpretados y publicados en el catálogo de eventos de la RAB.

Los catálogos de eventos resumen los datos generales del evento sísmico, las características de la estación de registro, los principales parámetros sísmicos de la señal analizada, las historias y espectros de aceleración velocidad y desplazamiento y el espectro de Amplitudes de Fourier, esto para cada componente del registro (EO, V y NS). De este modo se tienen tres hojas por cada registro en una estación tipo ETNA (superficie) y seis hojas para las estaciones tipo K2 (superficie y profundidad).

Adicionalmente, se diseñaron e implementaron fichas de registro histórico de eventos con el fin de poder comparar de manera rápida todos los eventos registrados en una estación, las cuales se representaron en términos de espectros de respuesta y espectros de respuesta normalizados por la aceleración máxima de la señal.

Finalmente, la información obtenida del monitoreo sísmico que se realiza mediante la Red de Acelerógrafos de Bogotá se publica periódicamente en la página del SIRE (www.sire.gov.co), para que esté a disposición de la comunidad y en especial de los expertos en el tema de amenaza sísmica y respuesta de sitio entre otros, de manera que se puedan adelantar investigaciones que sean útiles para posteriormente actualizar los modelos empleados en los estudios relacionados.

5.2 INTERPRETACIÓN DE REGISTROS

A continuación se resumen los análisis realizados a partir de los registros medidos en las estaciones de la RAB de los espectros de respuesta de cada estación y su correlación con la zona de respuesta sísmica homogénea donde se localiza y de variación espacial de la respuesta sísmica de los depósitos a partir de los registros obtenidos del sismo de Quetame Cundinamarca del 24 de mayo de 2008.

Adicionalmente, se analizó en conjunto con las demás estaciones los registros obtenidos en la estación CBOG1, que pertenece a la Red Nacional Acelerógrafos de Colombia, RNAC, de propiedad de INGEOMINAS que han sido suministrados gentilmente por dicho instituto.

5.2.1 Análisis de la respuesta sísmica de cada estación

De acuerdo con los mapas de Geología (INGEOMINAS, 1995), se identificó en que unidad o zona se encuentra cada estación de la RAB de FOPAE y de RNAC de INGEOMINAS, de modo que se agruparon para efectos de los siguientes análisis en: Cerros, Piedemonte, Lacustre y Aluvial, como se señala en la **Tabla 5.3**.

La zona de cerros comprende los sectores en los que afloran las rocas sedimentarias, bajo esta condición se encuentran siete estaciones de la RAB, de las cuales dos están en los cerros de suba, cuatro en los cerros orientales y una en los cerros del sur de la ciudad. En la **Figura 5.2** se ilustra los espectros de respuesta normalizados de la estación del Colegio San Bartolomé.

Los períodos dominantes de las señales registradas en las estaciones ubicadas en la zona de cerros están entre 0.2 y 0.4 s, a excepción de la estación CSMOR, que la señal que registró tiene un período dominante entre 0.5 y 1 s. Se presentan relaciones Sa/Ao hasta de 5 veces en las estaciones de los Cerros de Suba y de 4 veces para las demás estaciones.

A pesar de las grandes diferencias en las magnitudes y distancias de los sismos registrados, la respuesta en superficie de estas estaciones es normalizable en su mayoría, presentando amplificaciones importantes a períodos bajos por efectos de sitio asociados a la topografía del terreno y pequeños depósitos de ladera.

La zona de piedemonte corresponde a los depósitos que se encuentran entre los cerros y las zonas de planicie (lacustre y aluvial) compuesta predominantemente por suelos duros de espesores menores a 50 m. De acuerdo con esto se localizan cinco estaciones de la RAB en esta zona, de las cuales dos están en el piedemonte del norte de la ciudad, una en el piedemonte del centro y dos en los piedemontes del sur de la ciudad. En la **Figura 5.3** se ilustra los espectros de respuesta normalizados de la estación Universidad la Salle.

Los períodos dominantes de las señales registradas en las estaciones ubicadas en las zonas de piedemonte están entre 0.4 y 0.7 s con relaciones Sa/Ao hasta de 4 veces, además las estaciones del piedemonte norte de la ciudad CUSAL y CUSAQ presentaron para el sismo de Quetame respuestas espectrales considerables en altos períodos (1.5 a 2.5 s) con relaciones Sa/Ao hasta de 2.5.

Las mayores amplificaciones se presentan en los períodos bajos por efectos de la topografía del terreno y espesor del depósito y en las estaciones del piedemonte norte se identifican amplificaciones en los períodos altos por la incidencia de la zona lacustre con la que limita.

No.	CÓDIGO	NOMBRE	EQUIPO	GEOLOGÍA	GRUPO
1	CEING	E. COL. DE INGENIERÍA	ETNA	Llanura de Inundación	Lacustre
2	CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	ETNA	Coluvión	piedemonte
3	CBOSA	COL. FERNANDO MAZUERA	ETNA	Complejo de Conos	aluvial
4	CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	ETNA	Terraza Alta	lacustre
5	CUAGR	UNIAGRARIA	K - 2	Terraza Alta	lacustre
6	CPSUB	ACADEMIA DE POLICÍA	ETNA	Terraza Alta	cerro
7	CUSAQ	COL. ESCOLAR DE USAQUEN	ETNA	Complejo de Conos	piedemonte
8	CESCA	ESCUELA DE CABALLERÍA	ETNA	Coluvión	cerro
9	CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	ETNA	Terraza Alta	lacustre
10	CTVCA	T.V. CABLE	ETNA	Coluvión	cerro
11	CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	ETNA	Llanura de Inundación	lacustre
12	CAVIA	AVIANCA	ETNA	Terraza Alta	lacustre
13	CFONT	PTA DE BOMBEO FONTIBON	ETNA	Llanura de Inundación	lacustre
14	CNIÑO	C. DE ESTUDIOS DEL NIÑO	ETNA	Llanura de Inundación	lacustre
15	CJABO	JARDÍN BOTÁNICO	ETNA	Terraza Alta	lacustre
16	CBART	COLEGIO SAN BARTOLOMÉ	ETNA	Coluvión	cerro
17	CUNMA	U. MANUELA BELTRÁN	ETNA	Formación Plaeners	cerro
18	CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	ETNA	Complejo de Conos	piedemonte
19	CCITE	CITEC	ETNA	Terraza Alta	aluvial
20	CTIEM	CLUB EL TIEMPO	ETNA	Terraza Alta	lacustre
21	CTIMI	PARQUE TIMIZA	ETNA	Complejo de Conos	aluvial
22	CTUNA	PARQUE TUNAL	ETNA	Terraza Baja	aluvial
23	CARTI	ESCUELA DE ARTILLERÍA	ETNA	Terraza Baja	piedemonte
24	CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	ETNA	Complejo de Conos	piedemonte
25	CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	ETNA	Coluvion	cerro
26	CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	ETNA	Complejo de Conos	aluvial
27	CVITE	TANQUES DE VITELMA	ETNA	Coluvion	cerro
28	CLAGO	COLEGIO LAUREANO GÓMEZ	ETNA	Terraza Alta	lacustre
29	CGRAL	ESCUELA GRAL SANTANDER	K - 2	Complejo de Conos	aluvial
30	CCKEN	COL-KENNEDY	ETNA	Terraza Baja	aluvial
31	CBOG1	INGEOMINAS	K - 2	Terraza Alta	lacustre
32	CBOG2	GAVIOTAS (INGEOMINAS)	ETNA	Formación Plaeners	cerro
33	CREAC	REACTOR (INGEOMINAS)	ETNA	Terraza Alta	lacustre

Tabla 5.3. Clasificación de estaciones de acuerdo con las zonas geológicas y de respuesta sísmica

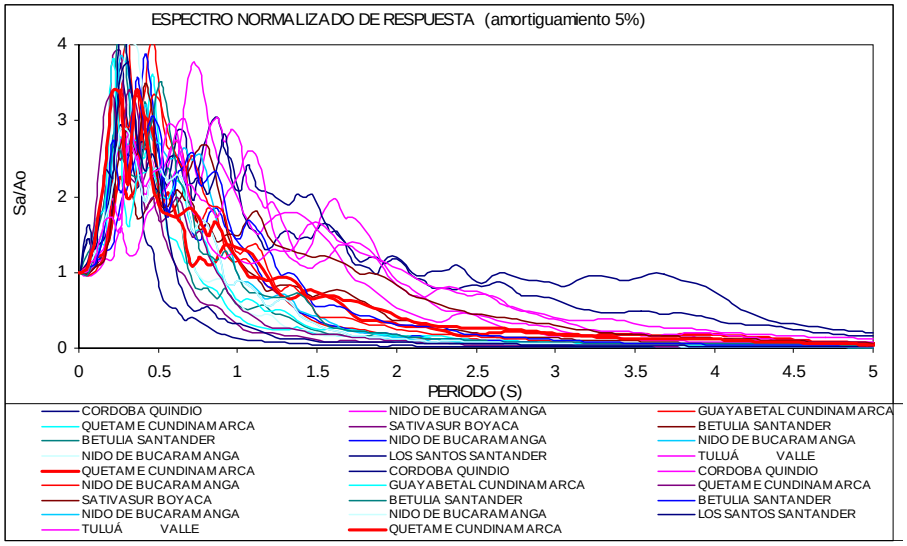


Figura 5.2. Espectros normalizados de CBART

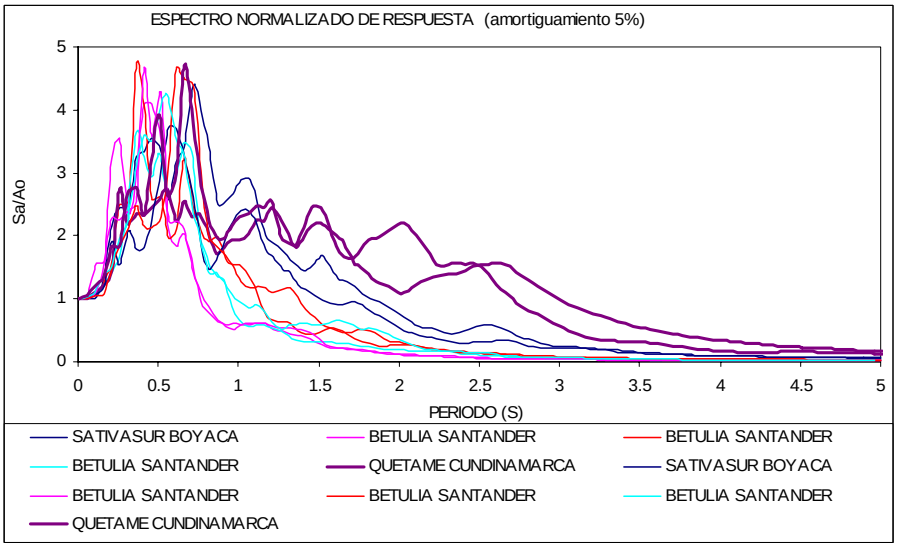


Figura 5.3. Espectros normalizados CUSAL

La zona lacustre corresponde a los sectores compuestos por suelos de origen lacustre de espesor que varia entre 50 y 500 m, en esta zona se localizan once estaciones de la RAB de FOPAE y una estación de la RNAC propiedad de INGEOMINAS, distribuidas de la siguiente manera: tres al norte entre los cerros de Suba y Orientales, dos al costado occidental de los cerros de Suba y siete estaciones entre la Cl 80 y la Cl 13. En la **Figura 5.4** y la **Figura 5.5** se presentan los registros medidos la Universidad Agraria y en el Parque la Florida respectivamente.

En general, los períodos dominantes de las señales registradas en las estaciones ubicadas en la zona lacustre son varios, dependiendo de la magnitud y distancia de la señal y el espesor del depósito bajo la estación. Particularmente se destacan los siguientes aspectos.

Las señales de sismos originados en la zona de subducción (Jurado-Chocó, Perú y Océano Pacifico) presentan aceleraciones espectrales hasta de 50 Gales entre 2.0 y 3.0 s de período. Los sismos originados en el Nido de Bucaramanga (fuente profunda a 260 Km de la ciudad) presentan aceleraciones espectrales inferiores a 20 Gales a un período de 0.5 s. Se destaca que a pesar de que estos sismos son lejanos no presentan contenidos frecuenciales importantes a períodos altos.

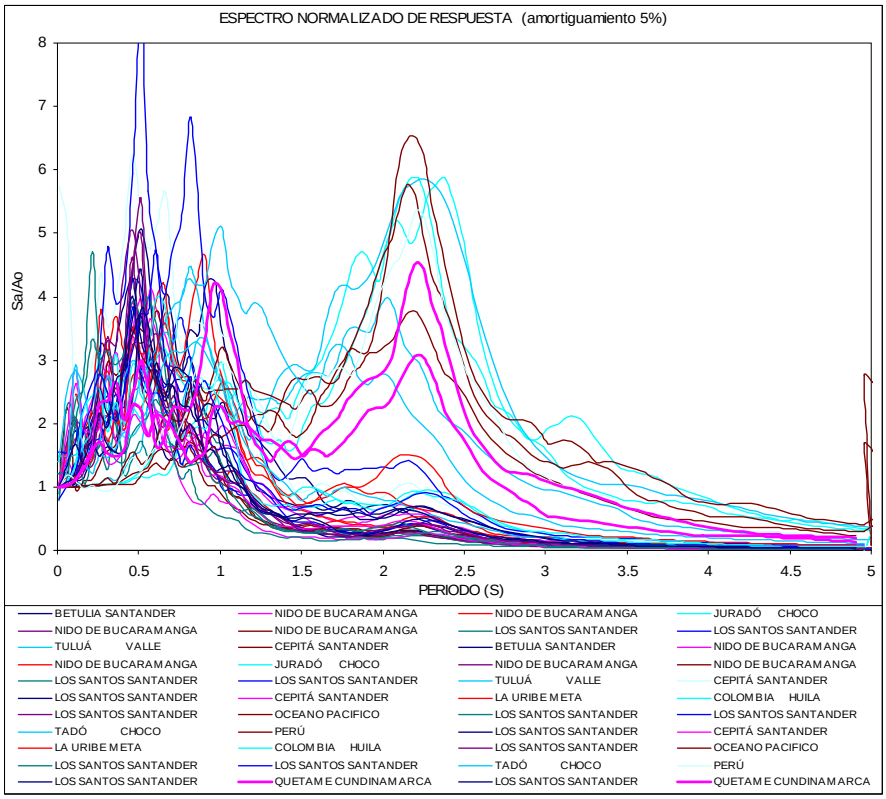


Figura 5.4. Espectros normalizados CUAGR Superficie

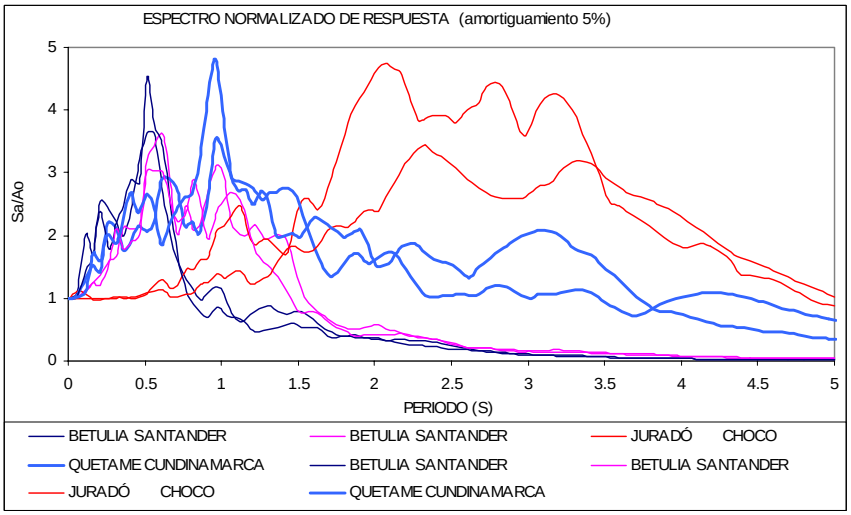


Figura 5.5. Espectros normalizados CFLOD

Sismos de fuentes corticales a distancias entre 50 y 150 km (Dptos de Cundinamarca, Meta, Boyacá y Huila) registraron aceleraciones espectrales hasta de 180 Gales, presentando por lo general dos o tres períodos dominantes, uno a 0.5 s (dominante de la señal), otro entre 1 y 1.5 s (segundo modo de vibración) y entre 2 y 3.5 s (primer modo de vibración). Se destaca de estos sismos que a pesar de ser sismos de fuentes regionales tienen altos contenidos frecuenciales en los períodos altos.

En cuanto a las relaciones Sa/Ao se observa en general que para períodos bajos (menor a 1 s) son de alrededor de 3 a 4 veces y para los períodos altos (mayor a 1 s) están entre 4 y 6 veces.

La zona aluvial corresponde a los sectores compuestos por suelos de origen aluvial de espesor que varía entre 50 y 300 m, en esta zona se localizan siete estaciones de la RAB. En la **Figura 5.6** se presentan los registros medidos en la Escuela General Santander.

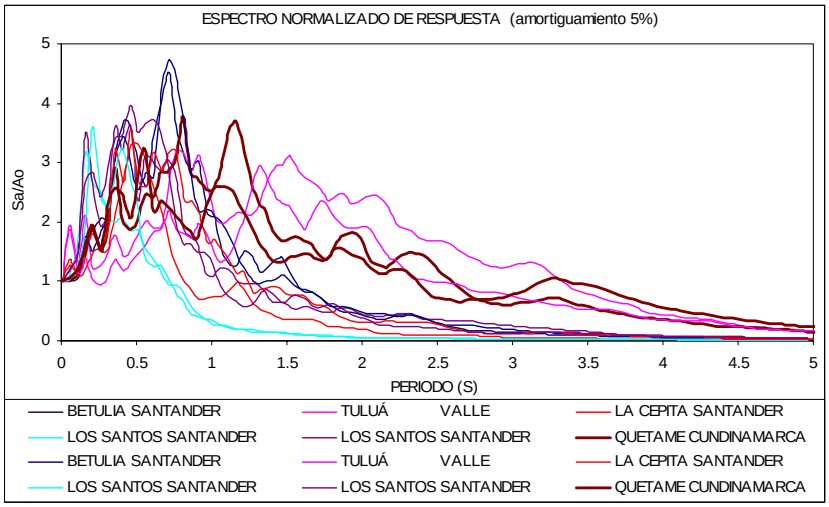


Figura 5.6. Espectros normalizados CGRAL Superficie

Los espectros de respuestas de las estaciones ubicadas en las zonas aluviales tienen períodos dominantes entre 0.5 y 1.0 s, con relaciones Sa/Ao entre 3 y 4 veces. Adicionalmente se aprecia que las estaciones más alejadas de los cerros o cercanas a la zona lacustre (con mayores espesores de sedimentos) presentan amplificaciones en los períodos altos, entre 2 y 2.5 s, con relaciones Sa/Ao inferiores a 2.

5.2.2 Registros en profundidad y relaciones espectrales

Una de las bondades del diseño actual de la RAB es poder contar con registros en profundidad o denominados Down Hole, los cuales se ubicaron en tres estaciones (dos de la RAB y una de la RNAC) de manera tal que se abarcaran los sectores norte, centro y sur de la ciudad. Estos sensores se localizaron en el contacto con el basamento rocoso con el fin de estudiar el comportamiento sísmico de los depósitos.

En la **Figura 5.7** se muestran las relaciones espectrales calculadas a partir de las mediciones en superficie y profundidad de los registros de la estación de Uniagraria (CUAGR).

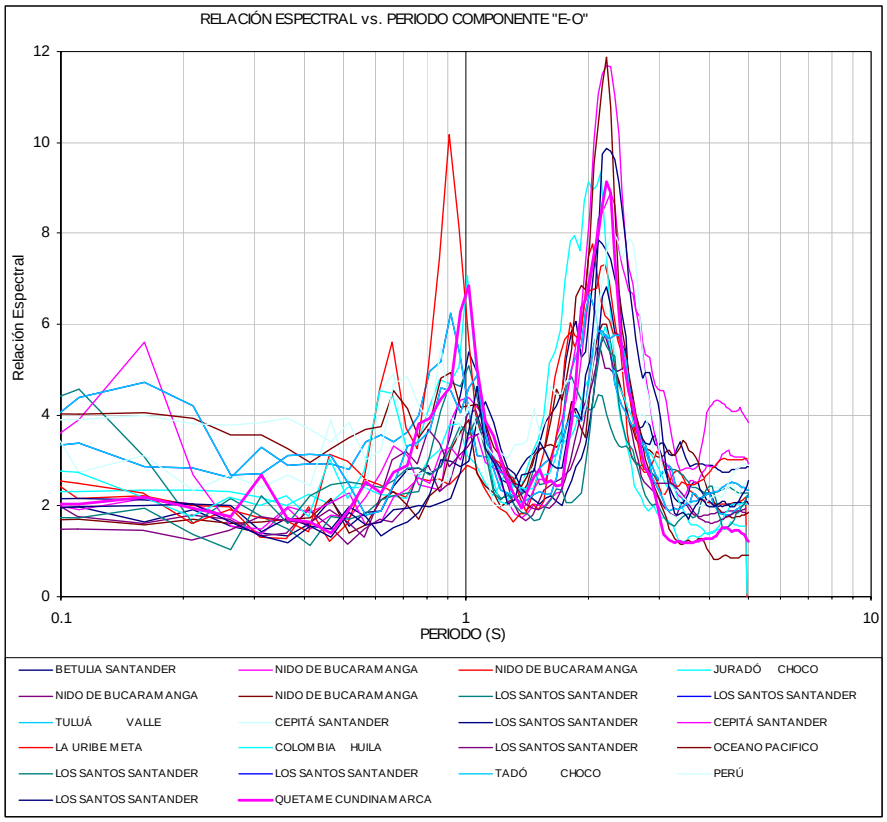


Figura 5.7. Relaciones espectrales CUAGR

A partir de las relaciones espectrales calculadas en la estación CUAGR se concluye que la amplificación del depósito en términos espectrales presenta grandes variaciones, sin embargo se puede apreciar claramente los períodos naturales de vibración del suelo en 2.2 s con amplificaciones entre 6 y 12 veces, en 1 s con amplificaciones entre 3 y 6 veces y en 0.7 s con amplificaciones hasta de 4 veces.

5.2.3 Análisis de los registros del sismo de Quetame, Cundinamarca.

De los 33 eventos registrados por la RAB, el sismo del 24 de mayo de 2008 con epicentro en Quetame Cundinamarca, presentó las mayores aceleraciones desde la implementación de la red, con valores de aceleración máxima en superficie del orden de 50 Gales (incluyendo efectos de sitio). A continuación se resumen los resultados obtenidos más importantes.

5.2.3.1 Características del evento

Fecha: 24 – May – 2008
Hora UT: 19:20
Magnitud ML: 5.7
Profundidad: Superficial
Epicentro: Latitud 4.399º N Longitud -73.814º E
Estaciones de registro (29): CEING, CUSAL, CBOSA, CCORP, CUAGR, CUSAQ, CESCA, CBANC, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CNIÑO, CJABO, CBART, CUNMA,

CCITE, CTIEM, CTIMI, CTUNA, CMARI, CSMOR, CTEJE, CVITE, CGRAL, CCKEN, CBOG1*, CBOG2* y CREAC*. (*Propiedad de INGEOMINAS)

5.2.3.2 Espectros de respuesta y relaciones espectrales

A continuación se presentan en la **Figura 5.8** los espectros de respuesta de los registros obtenidos en profundidad (Down Hole).

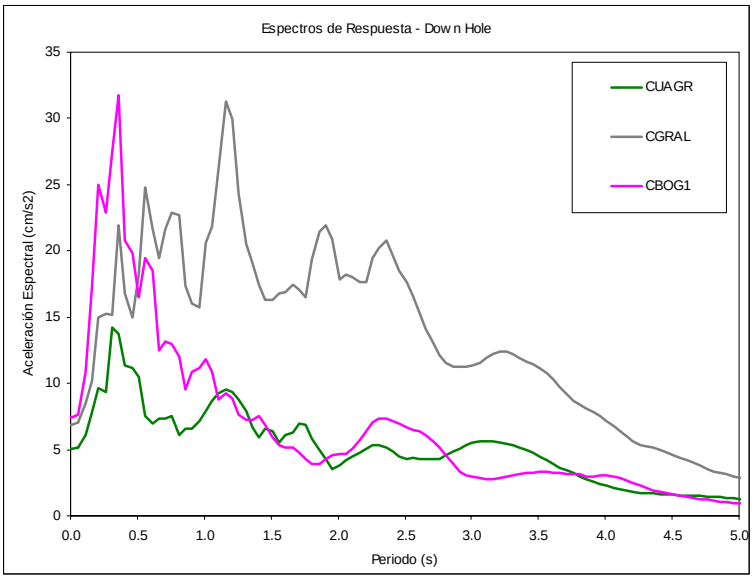


Figura 5.8. Espectros de respuesta en los Down Hole

Se aprecia que las señales tienen un período dominante de 0.35 s en CBOG1 y CUAGR, sin embargo en CGRAL el período dominante es 1.0 s, se destaca que el contenido frecuencial para períodos altos es importante, este puede deberse a ondas que se reflejan por el depósito de suelo o reflectadas por estratos rocosos más profundos.

Dado que la señal de la estación CGRAL se aleja del comportamiento general de las demás y que su espectro de respuesta refleja posibles efectos de sitio, tal vez por que el sensor no se encuentra exactamente en roca, esta señal no se tendrá en cuenta para el cálculo de las relaciones espectrales de cada registro.

Para todos los registros en superficie del sismo de Quetame se calcularon los espectros de respuesta y se estimaron de manera aproximada las relaciones espectrales entre la respuesta en superficie y el registro de Down Hole mas cercano, básicamente la zona norte de la ciudad trabajó con el registro de CUAGR, el centro y sur de la ciudad con el registro de CBOG1.

En la **Figura 5.9** se presentan los resultados para la zona de cerros, en la **Figura 5.10** para el piedemonte, en la **Figura 5.11** para la zona lacustre y en la **Figura 5.12** para los depósitos aluviales.

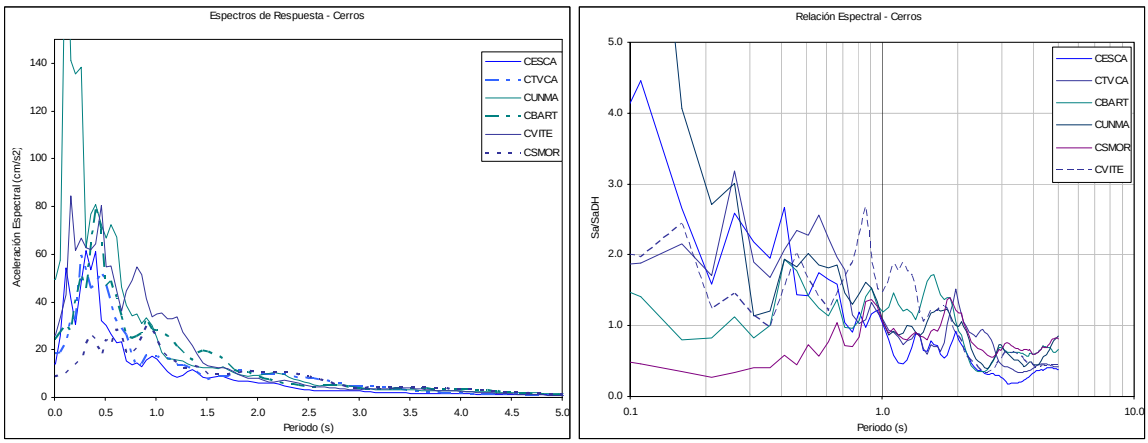


Figura 5.9. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona cerros

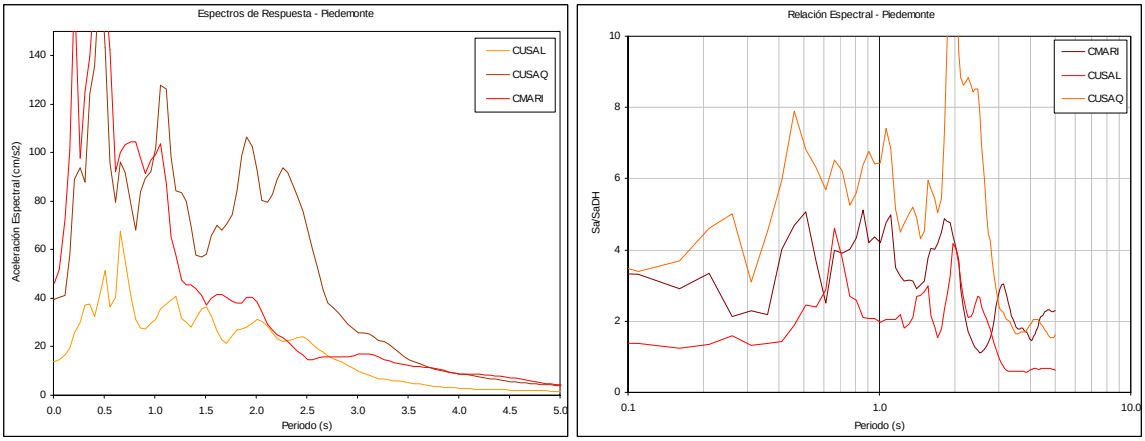


Figura 5.10. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona piedemonte

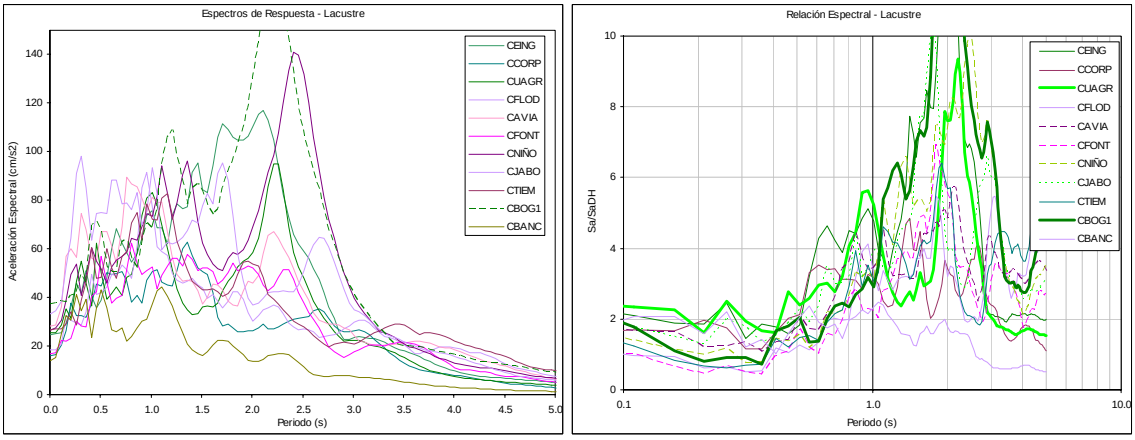


Figura 5.11. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona lacustre

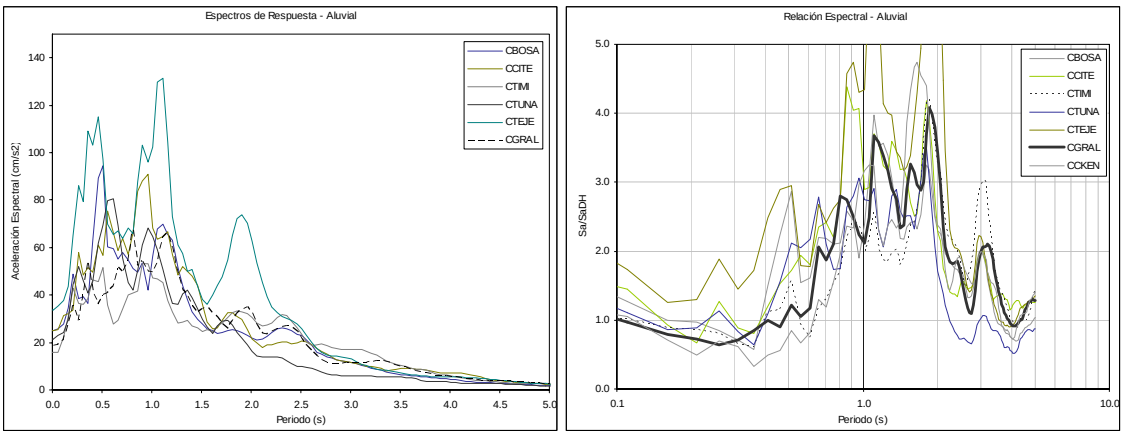


Figura 5.12. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona aluvial

5.2.3.3 Aceleraciones máximas y duración de la fase intensa y período natural

A partir de cada uno de los registros obtenidos de la componente de ondas de corte – SH, se cálculo los valores de aceleraciones máximas, intensidad de Arias, duración de la fase intensa y período natural. Los valores respectivos de cada estación se resumen en la **Tabla 5.4**.

Código	Nombre	Epicentro (Km)	Hipocentro (Km)	Intensidad Arias (cm/s)	Fase intensa (s)	Amax (cm/s^2)	Periodo Natural (s)	Profundidad Depósito (m)
CEING	ESC. COLOMBIANA DE INGENIERIA	49.3	49.5	5.1	46.2	24.8	1.95	110
CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	46.3	46.4	1.1	28.6*	14.0	0.65	30
CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	47.7	47.9	1.7	21.9	25.2	0.95	70
CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	49.9	50.1	2.2	69.8	16.0	2.7	220
CUAGR	UNIAGRARIA Sup.	46.5	46.7	3.7	44.5	25.6	2.2	130
CUAGR	UNIAGRARIA DH.	46.5	46.7	0.65	39.6	5.0		
CUSAQ	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	41.6	41.8	8.2	36.4	39.7	0.45	30
CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	39	39.2	0.67	17.4	14.2	0.3	0
CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	45	45.2	0.71	26.1*	14.3	1.05	60
CTVCA	T.V. CABLE	45.8	46	0.67	23.5	18.5	0.25	0
CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	51.8	52	2.7	52.9*	18.5	4.25	500
CAVIA	AVIANCA	44.2	44.4	3.6	50.3	28.1	2.95	300
CFONT	PLANTA DE BOMBEO FONTIBON	46.8	47	2.8	62.3	17.0	3.2	270
CNIÑO	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO	44.9	45.1	6.1	31.6*	26.6	2.45	220
CJABO	JARDÍN BOTANICO	43.3	43.5	5	32.6*	33.3	2.9	260
CBART	COLEGIO SAN BARTOLOME	36.3	37.7	0.73	17.1	24.7	0.3	0
CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	37.1	37.3	4.3	15.8	49.4	0.2	10
CCITE	CITEC	42	42.2	2.5	40.6	24.9	1.8	200
CTIEM	CLUB EL TIEMPO	49.7	49.9	2.8	32.6*	26.8	3.25	375
CTIMI	PARQUE TIMIZA	43.6	43.8	1.3	36.1	15.7	1.65	160
CTUNA	PARQUE TUNAL	40	40.2	1.5	25.2	21.4	0.9	80
CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	35.8	36	6.4	19.8	46.5	0.4	25
CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	43.4	43.6	0.23	20.1	9.0	0.3	0
CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	39.1	39.3	3.5	14.1	33.5	0.85	80
CVITE	TANQUES DE VITELMA	34.5	34.7	1.4	15.1	26.3	0.15	0
CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER Sup.	40.6	40.8	1.6	35.9	18.5	1.1	100
CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER DH.	40.6	40.8	0.38	40.2	6.8		
CCKEN	COL-KENNEDY	47.9	48	1.5	43.4	17.7	1.65	220
CBOG1	INGEOMINAS Sup.	39.5	39.7	7.3	29.6	37.3	2.1	180
CBOG1	INGEOMINAS DH.	39.5	39.7	0.16	25.4	7.4		

Tabla 5.4. Parámetros sísmicos de los registros del sismo de Quetame en Bogotá, componente SH

A partir de los datos se proyectó la distribución espacial de las aceleraciones máximas registradas en la ciudad y de manera aproximada se estimó el mapa de iso-aceleraciones como se ilustra en la **Figura 5.13**. En general, se puede observar que la zona de cerros tiene períodos menores a 0.4 s; zona de piedemonte en entre 0.4 y 0.65 s; la zona lacustre entre 1.05 y 4.25 s y la zona aluvial entre 0.85 y 1.8 s (ver **Figura 5.14**).

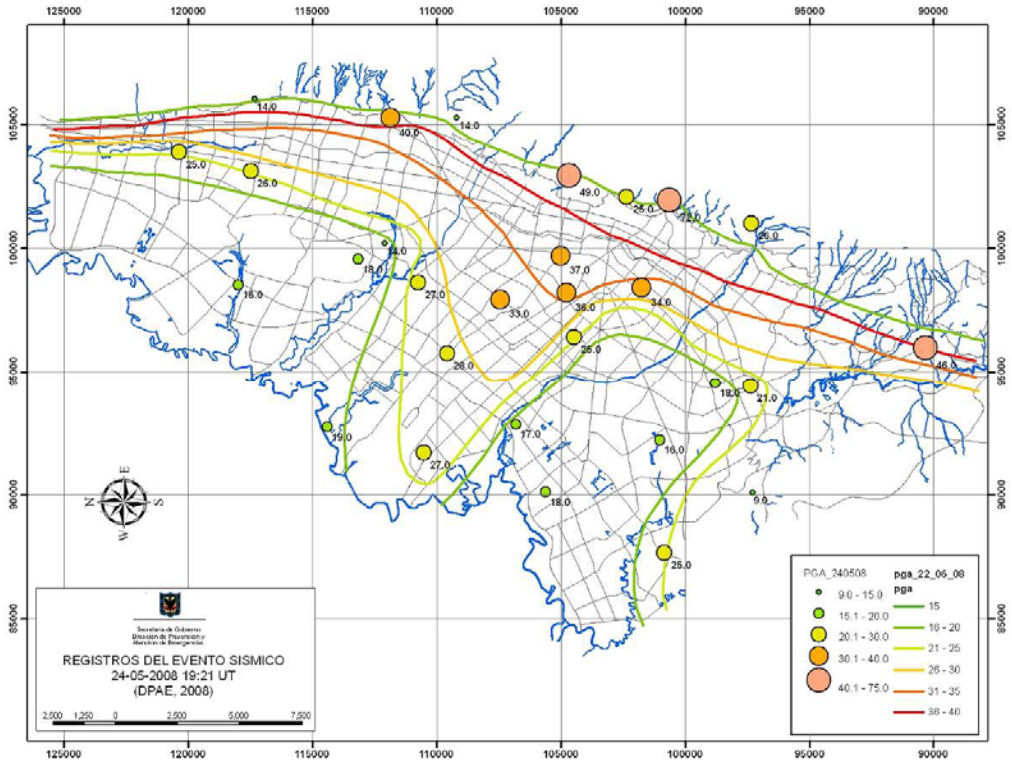


Figura 5.13. Distribución de aceleraciones máximas sismo de Quetame (DPAE, 2008)

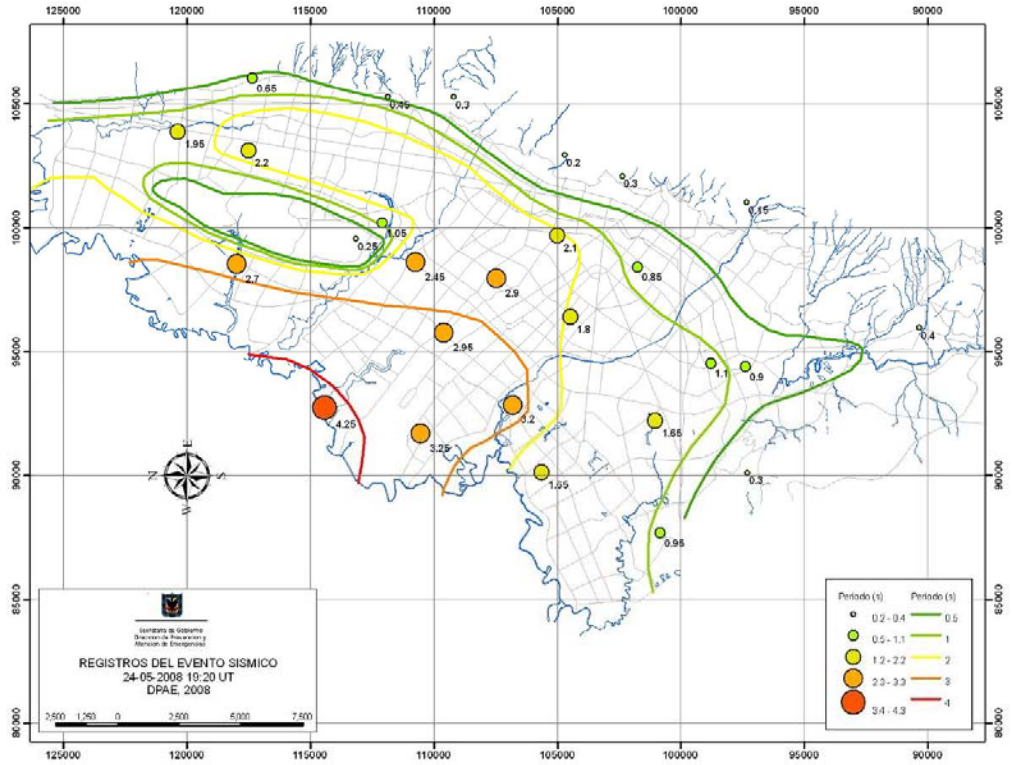


Figura 5.14. Distribución del período natural del depósito sismo de Quetame (DPAE, 2008)

5.2.4 Síntesis de la interpretación de registros

A partir de los análisis de los espectros de respuesta de todos los registros obtenidos hasta el año 2008 se destacaron los siguientes aspectos generales:

Zona de cerros: Los períodos dominantes de las señales registradas están entre 0.2 y 0.4 s, a excepción de la estación CSMOR, que la señal que registró tiene un período dominante entre 0.5 y 1 s, se presentan relaciones Sa/Ao hasta de 5 veces. Se tuvo en esta zona amplificaciones de 2 a 4 veces la señal en períodos entre 0.1 y 0.7 y de-amplificaciones de los períodos mayores a 2 segundos.

Zona de piedemonte: Los períodos dominantes de las señales registradas en el piedemonte están entre 0.4 y 0.7 s con relaciones Sa/Ao hasta de 4 veces, las estaciones del piedemonte norte de la ciudad CUSAL y CUSAQ presentaron para el sismo de Quetame respuestas espectrales considerables en altos períodos (1.5 a 2.5 s) con relaciones Sa/Ao hasta de 2.5 veces.

En términos generales se amplifican las señales de 4 a 6 veces tanto para los períodos bajos entre 0.5 y 0.8 como para períodos altos de 2 segundos en la zona norte.

Zona lacustre: Las señales provenientes del Nido de Bucaramanga presentaron períodos dominantes de 0.5 s y las señales de las fuentes regionales, como el sismo de Quetame, presentaron tres períodos dominantes, a 0.6, 1.1 y 2.3 s. Las relaciones Sa/Ao para períodos bajos (menor a 1 s) son de alrededor de 3 a 4 veces y para los períodos altos (mayor a 1 s) están entre 4 y 6. Las amplificaciones estimadas son del orden de 4 a 10 veces entre 1 a 4 s de período.

No hay un solo período característico para toda la zona, la respuesta de cada estación está dominada en el intervalo de períodos altos. Sin embargo, si se asocia cada estación al espesor del depósito se ve claramente la correspondencia entre el período y el espesor de suelo, de manera que las estaciones con espesor de 50 m (CBANC) tienen un período natural de 1.05 s y la estación con 500 m de sedimento (CFLOD) es de 4.25s.

Zona Aluvial: Los períodos dominantes de las señales registradas están entre 0.5 y 1.0 s, con relaciones Sa/Ao entre 3 y 4 veces, sin embargo las estaciones más alejadas de los cerros o cercanas a la zona lacustre (con mayores espesores de sedimentos) presentan relaciones Sa/Ao inferiores a 2 veces a períodos altos, entre 2 y 2.5 s. Las amplificaciones son del orden de 3 a 4 veces entre 0.8 y 1.9 s de período, se aprecia que las estaciones más cercanas a los cerros presentan mayores amplificaciones y las mas lejanas un poco menos, es decir que similar a la zona lacustre hay relación de las respuestas con el espesor de sedimentos.

5.3 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS

Las propiedades que influyen en la modelación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo son la velocidad de onda de corte, el amortiguamiento viscoso del material, la degradación del módulo de corte, la relación de amortiguamiento histerético, las condiciones de frontera y los efectos topográficos. Por otro lado, los niveles de aceleración registrados por la RAB son bajos, por lo que es solamente posible estudiar las propiedades dinámicas a bajas deformaciones, como son la velocidad de onda cortante y el amortiguamiento viscoso o mínimo; puesto que es necesario contar con registros de

mayor intensidad para estimar el comportamiento no lineal, representado por la degradación del módulo y aumento del amortiguamiento histerético.

Por lo anterior, en la calibración de los modelos de respuesta unidimensional de los sitios con Down Hole se emplearon curvas de degradación y amortiguamiento recomendadas en los estudios recientes. Estos modelos incorporan el concepto de amortiguamiento viscoso y la variación de las propiedades dinámicas como degradación y amortiguamiento en función del confinamiento.

5.3.1 Velocidad de onda cortante

Uno de los parámetros más importantes y sensibles en la evaluación de la respuesta de sitio es la velocidad de onda de corte, por lo que se aplicaron dos métodos para estimar el orden de magnitud como se presenta a continuación.

Método 1. El primer método consistió en que a partir del período fundamental y el espesor del depósito se calcula la velocidad promedio aproximada mediante la siguiente expresión:

$$\overline{Vs} \approx \frac{4 \cdot H}{T_f} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde

$\overline{Vs}$: Velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca

H : Espesor del depósito hasta la roca

T_f : Período fundamental del depósito (primer modo)

Método 2. El segundo método consistió en medir directamente de los registros de las ondas de corte (SH) del sismo del municipio de Quetame el tiempo que dura la onda de corte desde el sensor en profundidad hasta el sensor en superficie, para este ejercicio se escogieron las ventanas de tiempo inicial de la señal, buscando la correspondencia entre los pulsos de la señal en profundidad (DH) y su respuesta en superficie (Sup). Es importante mencionar que los valores obtenidos por este método son aproximados, puesto que en superficie los diferentes tipos de ondas pueden superponerse y la determinación de una onda clara y completa es difícil. Los valores obtenidos por cada método se puede observar en la **Tabla 5.5** para las estaciones de la RAB y la estación CBOG1 propiedad de INGEOMINAS.

Los resultados representan la velocidad de onda cortante promedio tomando todo el depósito hasta la roca, de allí se puede establecer una correlación entre el espesor - H y la Velocidad de onda cortante promedio - $\overline{Vs}$ para las zonas lacustre y aluvial, en el caso de la zona de piedemonte no hay una tendencia clara por que estos depósitos son de poco espesor y muy heterogéneos, de manera las estaciones del piedemonte norte se correlaciona más con la zona lacustre, pero los piedemontes del centro y sur se asemejan más a la zona aluvial, como se presenta en la **Figura 5.15**.

CODIGO	NOMBRE	GRUPO	T fundamental (s)	H Profundidad (m)	Vs promedio metodo 1 (m/s)	Vs promedio metodo 2 (m/s)
CEING	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA	LACUSTRE	1.95	110	226	
CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	PIEDEMONTE	0.65	30	185	
CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	ALUVIAL	0.95	70	295	
CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	LACUSTRE	2.7	220	326	
CUAGR	UNIAGRARIA	LACUSTRE	2.2	130	236	249
CPSUB	ACADEMIA DE POLICIA	CERRO	0.45	0		
CUSAQ	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	PIEDEMONTE	0.45	30	267	
CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	CERRO	0.3	0		
CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	LACUSTRE	1.05	60	229	
CTVCA	T.V. CABLE	CERRO	0.25	0		
CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	LACUSTRE	4.25	500	471	
CAVIA	AVIANCA	LACUSTRE	2.95	300	407	
CFONT	PLANTA DE BOMBEO FONTIBON	LACUSTRE	3.2	270	338	
CNIÑO	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO	LACUSTRE	2.45	220	359	
CJABO	JARDÍN BOTANICO	LACUSTRE	2.9	260	359	
CBART	COLEGIO SAN BARTOLOME	CERRO	0.3	0		
CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	CERRO	0.2	0		
CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	PIEDEMONTE	0.65	40	246	
CCITE	CITEC	ALUVIAL	1.8	200	444	
CTIEM	CLUB EL TIEMPO	LACUSTRE	3.25	375	462	
CTIMI	PARQUE TIMIZA	ALUVIAL	1.65	160	388	
CTUNA	PARQUE TUNAL	ALUVIAL	0.9	80	356	
CARTI	ESCUELA DE ARTILLERIA	PIEDEMONTE	0.4	30	300	
CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	PIEDEMONTE	0.4	30	300	
CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	CERRO	0.3	0		
CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	ALUVIAL	0.85	80	376	
CVITE	TANQUES DE VITELMA	CERRO	0.15	0		
CLAGO	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	LACUSTRE	2.25	175	311	
CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	ALUVIAL	1.1	100	364	334
CCKEN	COL-KENNEDY	ALUVIAL	1.65	220	533	
CBOG1	INGEOMINAS	LACUSTRE	2.1	180	343	368

Tabla 5.5. Valores estimados de la velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca

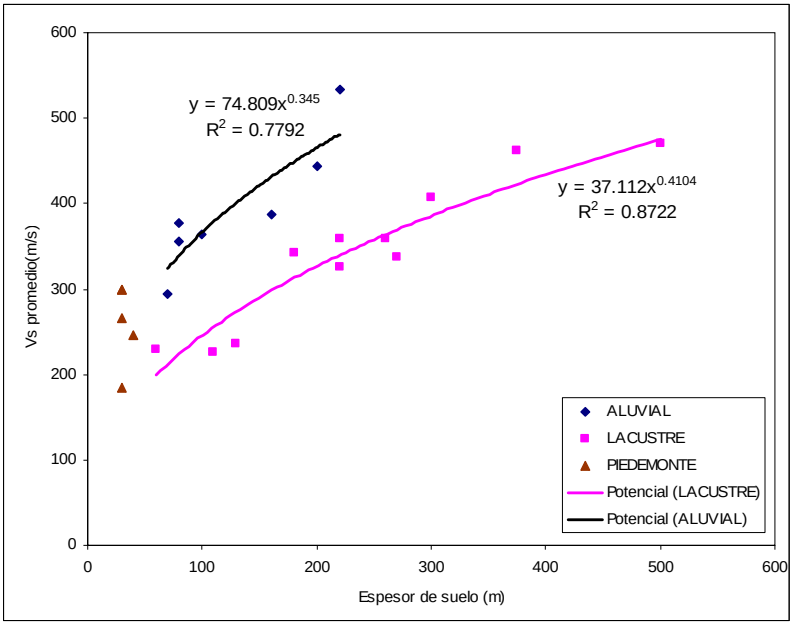


Figura 5.15. Relación entre el espesor del depósito y la velocidad de onda cortante promedio

A partir de los datos se puede establecer la siguiente expresión para relacionar el espesor del depósito y la velocidad de onda cortante promedio:

$$\overline{Vs} = A \cdot H^{B} \qquad \textbf{(2)}$$

Donde *A* tiene un valor de 37.1 para la zona lacustre y de 74.8 para la zona aluvial y *B* es 0.41 para la zona lacustre y 0.35 para la zona aluvial.

Para la calibración de los modelos no solo basta con saber la velocidad de onda promedio del perfil de análisis, es necesario contar con los valores de velocidad de onda cortante de cada una de las capas que conforman el perfil estratigráfico hasta la roca, para lo cual se debe descomponer la velocidad de onda cortante promedio en velocidades de onda cortante - Vs_i y espesores h_i de cada capa como se presenta en la siguiente expresión:

$$\overline{Vs} = \frac{\sum Vs_i \cdot h_i}{\sum h_i} \qquad \textbf{(3)}$$

De acuerdo con la SCG (2007) la velocidad de onda cortante de un estrato se puede expresar en función de una constante *A* que depende del tipo de material, la profundidad media *Z* del estrato y del exponente *b* para tener en cuenta el cambio por el aumento del confinamiento como se presenta en la siguiente ecuación:

$$Vs_i = A \cdot Z^{b} \qquad \textbf{(4)}$$

Realizando un retro-análisis con los valores promedios de la velocidad de onda cortante para cada sitio de la RAB y teniendo en cuenta un perfil estratigráfico simplificado se obtienen las constantes para estimar la velocidad de onda de cada estrato en función de la profundidad como se resume en la **Tabla 5.6**.

Material	a	b
Arcillas blandas (F. Sábana)	90 -110	0.175
Arcillas orgánicas (Turbas)	70 - 90	0.175
Arcillas arenosas(F. Subachoque)	160 - 180	0.175

Tabla 5.6. Valores estimados de a y b para los tipos de suelos generales

Dado que la ecuación (4) no es dimensionalmente correcta se puede expresar de acuerdo con Díaz-Parra (2007) en términos del esfuerzo efectivo medio del estrato - σ'_0 normalizando por la presión atmosférica – Pa elevado a un exponente *b* por una velocidad de onda de corte de referencia Vs_{ref} que corresponderá a la Vs material cuando es sometido a un esfuerzo efectivo igual a la Pa. Los valores estimados para diferentes tipos de suelos para la ecuación anterior se ilustran en la **Tabla 5.7.**

$$Vs_i = V_{ref} \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{Pa} \right)^{b} \qquad \textbf{(5)}$$

Material	Vref (m/s)	b
Arcillas blandas con Wn entre 80 y 150%	150 - 170	0.175
Arcillas limosas firmes con Wn entre 40 y 80%	160 – 180	0.175
Arenas limosas o arcillas arenosas con Wn < 40%	265 - 285	0.175
Arcillas orgánicas Turba con Wn > 150	130 - 150	0.175

Tabla 5.7. Valores estimados de Vs_{ref} y b para los tipos de suelos generales

5.3.2 Amortiguamiento viscoso o mínimo

El amortiguamiento viscoso o mínimo se determina a niveles bajos de deformación, se puede estimar para señales de baja energía en la parte final del registro, donde se presume que el depósito está en vibración libre. El método consiste en seleccionar una ventana de tiempo donde se aprecie el decaimiento de la intensidad de la señal, en este intervalo se aplican las expresiones para calcular el amortiguamiento a partir del decaimiento logarítmico de los ciclos de carga en vibración libre como se recomienda por Ishihara (1993) para ensayos de columna resonante.

$$D = \frac{\Delta}{2\pi} \qquad \textbf{(6)}$$

$$\Delta = \frac{1}{N-1}\log\left(\frac{a_1}{a_N}\right) \qquad \textbf{(7)}$$

Donde *D* es el amortiguamiento, Δ es la pendiente de la relación entre el logaritmo de la amplitud *a* y el número del ciclo *N*.

Con base en los registros de las ondas de corte (SH) se escogieron las ventanas de tiempo del final de la señal para determinar la relación del logaritmo de la amplitud con el número de ciclos. Los resultados calculados indican valores cercanos al 1% para la zona lacustre (CUAGR y CBOG1) y del 0.6% para la zona aluvial (CGRAL) como se puede observar en la **Tabla 5.8**.

Estación	Δ	Amortiguamiento D (%)
CUAGR	0.061	0.97
CGRAL	0.039	0.61
CBOG1	0.058	0.92

Tabla 5.8. Valores estimados de amortiguamiento mínimo estimados

5.3.3 Modelos de degradación del módulo y amortiguamiento compatibles

Los modelos de degradación del módulo y amortiguamiento se emplean para evaluar el comportamiento no lineal del suelo, por lo cual son fundamentales en la evaluación de la respuesta sísmica del depósito cuando es sometido a un sismo de gran energía. Como hasta la fecha no se ha registrado en la RAB un evento con la energía suficiente para estudiar el comportamiento no lineal de los depósitos, se optó por emplear para los análisis de respuesta sísmica unidimensional dos modelos recientemente desarrollados.

Se seleccionaron los modelos de Zhang (2005) y Díaz-Parra (2007) por que sus formulaciones son compatibles con las mediciones realizadas a bajas deformaciones, estos tienen en cuenta el efecto del confinamiento en las propiedades dinámicas como se demostró en el numeral anterior para la velocidad de onda, e involucran la variación del amortiguamiento mínimo.

El modelo no lineal propuesto por Zhang (2005) consideró los datos de laboratorio de Columna Resonante y Corte Torsional, resultado de 78 muestras obtenidas de tres áreas en Carolina del Sur: Charleston, Savannah River Site y Richard B. Russell Dam. Además,

los ensayos de Columna Resonante y Corte Torsional se obtuvieron de 44 muestras de Carolina del Norte y de Alabama.

El modelo propuesto por Díaz-Parra (2007) se determinó a partir de una base de datos experimental de 35 pruebas triaxiales cíclicas realizadas sobre la arcilla blanda de la Ciudad Universitaria en Bogotá y a partir de las formulaciones de Matasovic (1983) y Stokoe (2002) se calcularon los coeficientes y simplificaron algunas de las ecuaciones para el caso de las arcillas de Bogotá, adicionalmente se estimaron los parámetros para los suelos aluviales con base en los ensayos de laboratorio realizados por INGEOMINAS en el sector del Reactor Nuclear (2006) y en la Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (2004).

Finalmente, en la **Tabla 5.9** se resumen las expresiones que definen la forma de la curva de degradación del módulo y el amortiguamiento.

Modelo Zhang et al., 2005	Modelo Díaz-Parra, 2007
$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{1}{1+\left(\gamma / \gamma_r\right)^{\alpha}}$	$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{s}}$
$\alpha = 0.0021PI + 0.834$	Arcillas s = 0.919 y Arenas s = 0.85
$\gamma_r = \gamma_{r1}\left(\sigma'_m / P_a\right)^{k}$	$\gamma_{ref} = (c \cdot e_0) \cdot \left(\frac{\sigma_0'}{Pa}\right)^{m}$
$k = 0.316e^{-0.0142\,PI}$	m = 0.35
$\gamma_{r1} = 0.0011PI + 0.0749$	c = 0.0756
$D = f(G/G_{MAX}) + D_{MIN}$	$D = F \cdot D_{Ma\sin g} + D_{\min}$
$f(G/G_{máx}) = 10.6(G/G_{máx})^2 - 31.6(G/G_{máx}) + 21$	$F = \alpha\left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{\beta}$ $D_{Ma\sin g} \approx 33 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right)$ $\alpha = 0.62\%$ y $\beta = 0.1$
$D_{mín} = D_{mín1}(\sigma'_m / P_a)^{-k/2}$	$D_{\min} = \delta \cdot \left(\frac{\sigma_0'}{Pa}\right)^{-\eta}$ $\eta = 0.3$
$D_{\min 1} = 0.008PI + 0.82$	Arcillas $\delta = 1.0\%$ y Arenas $\delta = 0.5\%$

Tabla 5.9. Expresiones empleadas para calcular las curvas dinámicas

5.4 CALIBRACIÓN DE MODELOS DE RESPUESTA DINÁMICA

El proceso de calibración de los modelos de respuesta dinámica de los sitios con registro en profundidad comprendió los siguientes pasos:

- Definir el perfil estratigráfico del sitio con sus respectivas propiedades geotécnicas.
- Definir las curvas de degradación y amortiguamiento de acuerdo al numeral anterior.
- Adoptar un perfil de velocidad de onda cortante que cumpla las recomendaciones del numeral anterior.

- Verificar que los valores promedio de la velocidad de onda y amortiguamiento estén de acuerdo con las mediciones in situ.

- Modelar la respuesta dinámica y calcular el espectro de respuesta en superficie.

- Comparar con el espectro de respuesta medido en amplitud y períodos dominantes.

- Si el resultado es satisfactorio el modelo se considera adecuado.

- Si el resultado no es satisfactorio se procede a modificar gradualmente las velocidades de onda cortante de referencia acuerdo con su intervalo de variación estimado y se vuelve al modelar la respuesta.

El anterior procedimiento se aplicó en los tres sitios con Down Hole, uno en el sector norte de la ciudad en la Universidad Agraria (CUAGR), donde predominan los materiales muy blandos, en el sector central de la ciudad en INGEOMINAS (CBOG1), con predominio de arcillas blandas con intercalaciones de suelos aluviales, y al sur de la ciudad en la Escuela General Santander (CGRAL), donde predominan los suelos aluviales con intercalaciones de capas orgánicas, donde es importante mencionar que en la estación CGRAL la señal del Down Hole presenta efectos de sitio importantes, es decir que no corresponde exactamente a la roca profundad, por lo que en este sitio se encontró que modelando la señal del Down Hole a los 55 m de profundidad se hallaban resultados satisfactorios.

A continuación en la **Tabla 5.10** a manera de ejemplo para la estación de la Universidad Agraria – CUAGR se ilustra el perfil geotécnico analizado y en la **Figura 5.16** la variación con la profundidad de las propiedades dinámicas.

No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm^3	Vref m/s	Vs modelado m/s
1	CH	Arcilla	0	5	100	2.494	125	1.55	158	124
2	CH	Arcilla	5	10	160	3.934	200	1.40	140	127
3	CH	Arcilla	10	17	160	3.934	200	1.40	140	132
4	CH	Arcilla	17	24	150	3.694	195	1.45	140	138
5	CH	Arcilla	24	28	120	2.974	150	1.50	140	142
6	OH	Arcilla orgánica	28	30	200	4.894	265	1.10	140	144
7	CH	Arcilla	30	35	150	3.694	195	1.40	140	145
8	CL	Arcilla arenosa	35	37.5	80	2.014	100	1.60	158	166
9	CH	Arcilla	37.5	45	130	3.214	170	1.50	140	150
10	CH	Arcilla	45	56.5	100	2.494	125	1.55	158	176
11	CH	Arcilla	56.5	65	60	1.534	70	1.65	158	182
12	OH	Arcilla orgánica	65	67	160	3.934	210	1.30	140	163
13	CL	Arcilla arenosa	67	85.5	50	1.294	40	1.75	158	190
14	CH	Arcilla	85.5	97	50	1.294	55	1.70	158	198
15	SC	Arena fina	97	115	30	0.814	25	1.75	265	342
16	SC	Arena fina	115	130	25	0.694	20	1.80	265	353

Tabla 5.10. Perfil geotécnico analizado en CUAGR

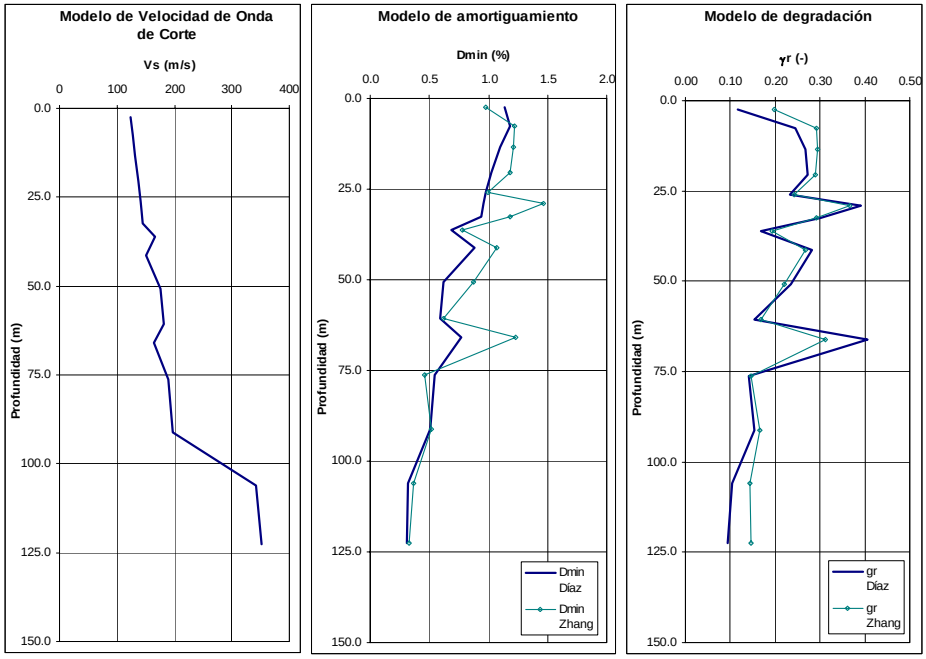


Figura 5.16. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CUAGR

En la **Figura 5.17** se presenta los resultados obtenidos para el sismo de Quetame en términos de aceleración espectral y relación espectral de las estaciones CUAGR, CBOG1 y CGRAL.

De los resultados de la calibración de los modelos se destaca los siguientes aspectos:

- En general se logra reproducir bastante bien la respuesta espectral en términos de amplitud y período fundamental, sin embargo en la zona lacustre se obtiene mayores amplificaciones para períodos menores a 0.7 segundos y ligeramente menores amplificaciones de los períodos mayores a 1 segundo. En la zona aluvial los resultados exageran la respuesta espectral hacia los 1.2 segundos, logrando de todos modos muy buena calibración en las demás ordenadas espectrales.

- Los resultados obtenidos aplicando los modelos de comportamiento dinámico de Zhang son ligeramente superiores a los obtenidos mediante el modelo de Díaz-Parra.

- Dado que se tratan de modelos de respuesta unidimensionales que tienen en cuenta efectos adicionales como los producidos por las ondas superficiales y la forma del basamento rocoso, los resultados presentados en general no logran reproducir totalmente la respuesta espectral de los registros medidos que en alguna medida están influenciados por estos efectos de sitio complementarios.

- Se presenta en las zona lacustre grandes amplificaciones a períodos altos por efecto de los suelos blandos y la forma de la cuenca sedimentaria, en la zona aluvial se presentan amplificaciones menores con ausencia de picos pronunciados en las repuestas espectrales, lo cual se puede atribuir a que estos materiales degradan y amortiguan la señal de una manera significativa.

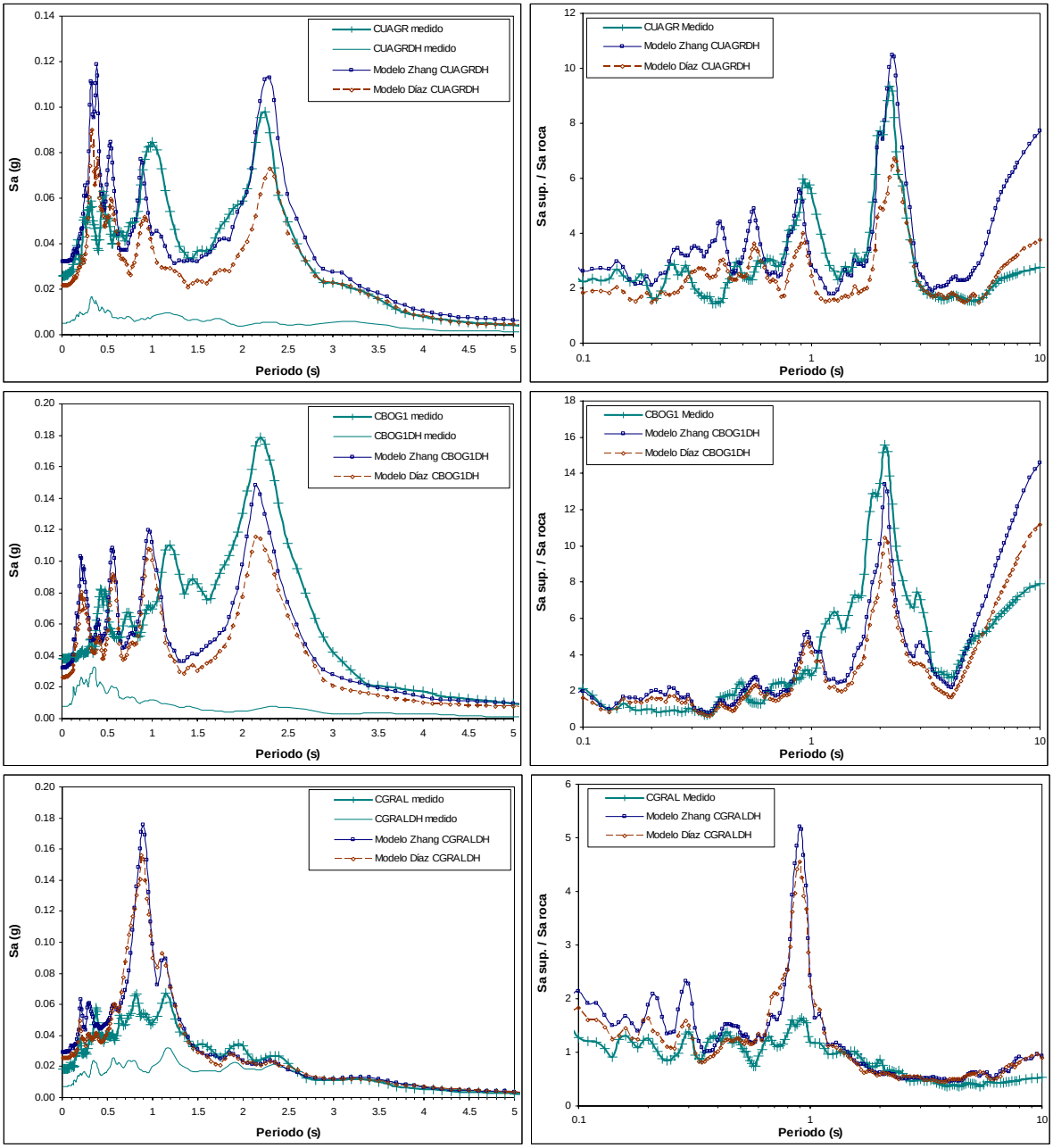


Figura 5.17. Espectro de respuesta y relaciones espectrales en CUAGR, CBOG1 y CGRAL

5.5 SÍNTESIS DE RESULTADOS

A partir de los datos registrados por la RAB, se procedió a analizar la variación en superficie de algunos parámetros sísmicos y la respuesta espectral de los suelos que fuesen útiles para zonificar la respuesta sísmica de la ciudad, para ser aplicado a la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad, información que podrá ser utilizada para mejorar y actualizar las normas de sismo-resistencia de las edificaciones y para mejorar las hipótesis y modelos que se emplean en los escenarios de daño por terremoto.

Con base en los resultados de las dos estaciones con Down Hole en la zona lacustre, se logra identificar que la respuesta sísmica de los depósitos de esta zona (suelos arcillosos blandos) para los registros obtenidos hasta la fecha por la RAB está en el intervalo elástico lineal, con grandes amplificaciones. En el caso de la estación en la zona aluvial se tienen niveles de amplificación bajos, debidos al comportamiento no lineal importante que presentan los tipos de suelos de esta zona (suelos limosos y arenosos duros).

De acuerdo con el mapa de iso-períodos calculado para el evento de Quetame Cundinamarca la zona de cerros tiene períodos menores a 0.4 s, la zona de piedemonte en entre 0.4 y 0.65 s, la zona lacustre entre 1.05 y 4.25 s y la zona aluvial entre 0.85 y 1.8 s.

Se logró reproducir en los sitios con Down Hole bastante bien la respuesta espectral en términos de amplitud y período fundamental, sin embargo en la zona lacustre se obtiene mayores amplificaciones para períodos menores a 0.7 segundos y ligeramente menores amplificaciones de los períodos mayores a 1 segundo. En la zona aluvial los resultados exageran la respuesta espectral hacia los 1.2 segundos, logrando de todos modos muy buena calibración en las demás ordenadas espectrales.

Como ya se mencionó, con base en los resultados de la calibración de los perfiles de los sitios CGRAL, localizado sobre una zona aluvial y CBOG1 y CUAGR, que se encuentran ubicados en depósitos lacustres, se conformaron los modelos unidimensionales que se utilizaron para realizar la verificación de los resultados entregados por los diferentes grupos de trabajo. En este caso, y teniendo en cuenta que los modelos arrojan resultados similares, se emplearon las expresiones propuestas por Díaz-Parra, para la determinación de las velocidades de onda de corte y las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento. Los resultados de estas modelaciones se presentan en el capítulo siguiente.

CAPITULO 6

6 MODELACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL SUBSUELO

En el presente capítulo se ilustran las consideraciones y resultados obtenidos en las modelaciones de respuesta dinámica realizadas en los convenios con UNIANDES, SCG y AIS, así como también la descripción de las modelaciones y los resultados obtenidos por el FOPAE que tuvieron en cuenta el modelo geológico geotécnico de este estudio y las recomendaciones obtenidas a partir de la interpretación de los registros de la RAB, incluidos los registros del sismo de Quetame de Mayo 24 de 2008.

Finalmente, Con el conjunto de resultados se procedió a agrupar las respuestas de acuerdo a las zonas geotécnicas para respuesta sísmica, a cada zona se le calculó la respuesta de sitio a manera de relaciones espectrales para varios niveles de amenaza. De esta forma se logra analizar separadamente el efecto propio de los terrenos, depósitos de suelo o rocas, y de este modo se puede calcular posteriormente espectros uniformes de amenaza en superficie.

La metodología adoptada para representar la respuesta de sitio se justifica en el hecho de que tradicionalmente se ha estudiado la respuesta sísmica a partir de los espectros de respuesta obtenidos de una familia de acelerogramas, cuyo resultado mezcla los efectos propios de las señales empleadas con los efectos del terreno, imposibilitando la definición de espectros uniformes de amenaza o espectros de diseño.

6.1 MODELACIONES DE LOS CONVENIOS INTER ADMINISTRATIVOS

Para modelar la respuesta de sitio se contó con los resultados de los trabajos adelantados mediante los convenios con la Universidad de los Andes UNIANDES, la Sociedad Colombiana de Geotecnia SCG y la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS; entidades de reconocida experiencia en el tema.

En total, UNIANDES modeló la respuesta sísmica en 102 sitios, la SCG en 116 y la AIS en 169, para un total de 384 sitios analizados. A continuación se resumen algunos aspectos de los resultados de cada convenio.

6.1.1 Universidad de los Andes - UNIANDES

La Universidad de los Andes realizó modelaciones de respuesta unidimensional en 102 sitios distribuidos uniformemente por toda la ciudad. Como consideraciones generales de sus modelos se tiene:

- Emplearon las 16 señales sísmicas recomendadas por la DPAE sin escalarlas.

- Adicionalmente, este estudio tuvo en cuenta los Espectros Uniformes de Amenaza EUA para cada uno de los sitios modelados, obtenidos a partir de la metodología probabilística (Uniandes, 2006)

En la **Tabla 6.1** se presentan la ubicación de los sitios modelados, con su correspondiente zona geológica y geotécnica y el espesor de suelo hasta roca.

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	N01	Calle 170 - F.F.N.N.	105112	116788	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
2	N02	Autopista Norte con Calle 200	104008	120975	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	150
3	N04	Cll. 138 Club SubOficiales	101422	114593	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
4	N05	Cll. 100 Autonorte	102311	110007	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
5	N9A	Autonorte - Calle 127	102601	112248	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
6	N09	Cll. 126 - Cra. 29	103114	112201	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
7	N13	Sondeo Clínica Corpas	98293	118284	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
8	N14	Av. Cundinamarca - Calle 139	97595	116193	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
9	N17	Barrio Bochica Norte - Av. Cundinamarca	96701	112698	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
10	N19	Barrio El Luján Av. Boyacá	97301	109209	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
11	N20	Cll. 68 Cra. 82	96734	110252	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
12	N21	Terminal de Transportes	95812	106714	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
13	N22	Cll. 13 Av. Boyacá	94499	105917	Terraza Baja	ALUVIAL	250
14	N23	Av. 68 Av. Americas	95009	103925	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
15	N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	93611	102527	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
16	N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	92122	103925	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
17	N26	Barrio Patio Bonito BOSA	89516	104721	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	200
18	N27	Parque Timiza	91509	101533	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	200
19	N28	Autopista Sur Av. 68	93310	99933	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
20	N29	Autopista Sur SOACHA	89412	100031	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	50
21	N30	Autopista Sur SOACHA	88132	100031		ALUVIAL	50
22	N31	Barrio Bosa Holanda	88027	103536	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	200
23	N33	Monumento Los Heroes	101912	107714	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
24	N34	Escuela Militar Cll. 80	101017	108713	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
25	N36	Cll. 63 Cra. 30	100166	106130	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
26	N37	Cll. 26 Cra. 50	98104	104819	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
27	N38	Cra. 53 Cll. 13	96491	103924	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
28	N39	CAD Av. Americas Cra. 30	99502	103225	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
29	N42	Cra. 30 - Clle. 6	97699	101128	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
30	N43	Av. 1ero de Mayo Cra. 30	96002	100031	Complejo de Conos	ALUVIAL	150
31	N44	Cra. 27 - Clle. 44S	95198	99332	Terraza Baja	ALUVIAL	150
32	N45	Tunal	93611	97241	Terraza Baja	ALUVIAL	50
33	N48	Cll. 170 - Autonorte	102819	117290	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
34	N49	Calle 53 - Cra. 30	99691	105022	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
35	N50	Cll. 80 - Av. Boyacá	98698	111006	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
36	N51	Av. El Dorado	93310	110908	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
37	PA1	Cll. 68 Cra. 110	94323	112020	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
38	PA5	Cll. 68 Cra. 91	95953	110787	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
39	PA7	Cll. 68 Cra. 82	96705	110330	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
40	PA9	Av. Cll. 68 Cra. 74 A	97405	109741	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
41	PA10	Av Cll 68 Av Boyaca	97697	109542	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
42	PA11	Cll. 68 Cra. 66	98147	109178	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
43	PA13	Cll. 72 Av. 68	97983	109299	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
44	PA14	Cll 72 Cra 50	99601	108569	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
45	PA15	Cll. 72 Cra. 45 A	99984	108275	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
46	PA16	Cll 72 No 37-37	100485	107904	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
47	PA17	Cll. 72 Cra. 30	100827	107635	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
48	PA19	Cll. 72 Cra. 24	101159	107402	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
49	PA25	Cra. 7 Cll. 65	102044	105865	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
50	PA26	Cra 7 Cll 61	101872	105536	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
51	PA37	Cra. 10 Cll. 18	100401	101194	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
52	PA43	Cll. 13 Cra. 19	99234	101244	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
53	PA46	Cll 13 Av. Ciudad de Quito	98459	102001	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
54	PA49	Av. Ferrocarril Cll. 9	96957	102490	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
55	PA52	Av Ferrocarril Cll 2	95383	101850	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
56	PA55	Av. Ferrocarril Av. 1 Mayo	94135	101411	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
57	PA58	Av 1 Mayo Cra 65	93429	102153	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
58	PA61	Av. 1 Mayo Cra. 74	92692	102560	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
59	PA64	Diag 43 S Transv 81	95383	100561	Terraza Baja	ALUVIAL	200
60	PA67	Diag. 43 S Cra. 86	90166	102745	Terraza Baja	ALUVIAL	200

Tabla 6.1. Sitios modelados por UNIANDES

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	O01	Calle 95 con Carrera 59	100159	109979	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
62	O02	Carrera 1 este N° 13-51	101003	100050	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
63	O03	Cra 46A N° 135-95	102043	114349	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
64	O04	Cra 48F Nº 95-80	100146	110154	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
65	O05	Carrera 46 con calle 140A	102207	114747	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
66	O09	Calle 170 Nº 31-20	104429	116941	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
67	O10	Calle 134 con Cra 46A	101917	114065	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
68	O11	Carrera 9 Nº 151-52	105043	114701	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
69	O15	Carrera 68B N° 43B-20	96854	106499	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
70	O17	Crr. 30 - calle 45	99222	104638	Terraza Alta	LACUSTRE B	150
71	O20	Carrera 52 con calle 147	101679	115352	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
72	O22	Trv. 5A # 127 - 00	105740	111924	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
73	O23	Cra 7 # 37 - 69	101278	103231	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
74	O27	Av 9, Calle 153 - 155	105044	114899	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
75	O28	Calle 152 con Carrera 28	104638	114924	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
76	O32	Av. Suba - Diag 117A	100761	111833	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
77	O33	Tranversal 21 Calle 98	102526	109856	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
78	O34	Calle 22 C No 40 - 99	98448	103586	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
79	O37	Trv. 32 - Calle 131	103103	113223	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
80	O38	Crr. 9 - Calle 125	105178	111574	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
81	O39	Crr. 47 con Calle 129	101498	112965	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
82	O40	Diagonal 152 Transversal 43	102882	115603	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
83	O41	Calle 136 entre Carrera 13 y Avenida 9	104901	113060	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
84	O43	Carrera 27 con calle 163A	104802	115901	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
85	O44	Calle 26 A con Carrera 13	100729	101999	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
86	O46	Diagonal 165 A N° 28	104836	116279	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
87	AutosurB	Autosur con Av Boyacá	92445	99768	Terraza Baja	ALUVIAL	150
88	BelAir	Cll 88 con Cr 7	103208	108062	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
89	CAD	Cr 30 con Americas	99639	103258	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
90	CAMPIN	Cr 30 con Cl 57	99991	105629	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
91	CITEC	Cr 65 con Cl 17A	96995	106293	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
92	Cl114Cr7	Cr 7 con cl 114	104873	110605	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
93	Cl134Cr9	Cr 9 con Cl 134	104983	112817	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
94	COLGAS	Cr 8 con Cl 37	101100	102975	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
95	ESSO	Cr 7 con Cl 39	101433	103528	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
96	Matatigres	NQS con Autosur	94276	99768	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
97	Megabanco	Cr 13 con Cl 100	103541	109499	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
98	Mudela		103800	125367	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	150
99	Plazatoros	Cr 6 con Cl 26	101211	101759	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
100	PteCl170	Autonorte con Cl 170	103541	117240	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
101	SaludTotal	Autonorte con Cl 100	102210	110052	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
102	SurDuro		94220	94239	Complejo de Conos	PIEDEMONTE C	25

Tabla 6.1. Sitios modelados por UNIANDES (Continuación)

6.1.2 Sociedad Colombiana de Geotecnia - SCG

La Sociedad Colombiana de Geotecnia realizó modelaciones de respuesta bidimensionales en 4 secciones. La primera se localizó en el norte, entre los Cerros Orientales y los Cerros de Suba; la segunda a lo largo de la Calle 72 entre los Cerros Orientales y el Río Bogotá; la tercera se ubicó por la Calle 34 desde el Parque Nacional hasta el barrio Quinta Paredes; y la cuarta se realizó en el sur de la ciudad, por el Corredor Férreo desde el barrio el Perdomo hasta el barrio Carvajal.

Como consideraciones generales de los resultados de modelos de la SCG se tiene:

- Emplearon 12 de las señales sísmicas recomendadas sin escalarlas.

- Para cada sección analizada, se presentó la variación superficial de la aceleración máxima, con lo que se pudo afinar las zonas de piedemonte e inferir hasta dónde se presentan efectos topográficos debidos a la posición y forma del basamento rocoso.

- Se presentó un análisis aproximado de los registros medidos en algunas de las estaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, logrando determinar de manera aproximada el espectro de diseño para cada zona.

En la **Tabla 6.2** se presentan los sitios modelados, su correspondiente coordenada donde se localiza, la zona geológica y geotécnica y el espesor de suelo.

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	ND-145	Sección 1 Cll 150	100348	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
2	ND-375	Sección 1 Cll 150	100405	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
3	ND-800	Sección 1 Cll 150	100502	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
4	ND-1565	Sección 1 Cll 150	100759	115004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
5	ND-2067	Sección 1 Cll 150	100914	115004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
6	ND-2873	Sección 1 Cll 150	101790	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
7	ND-3121	Sección 1 Cll 150	101939	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
8	ND-3687	Sección 1 Cll 150	102141	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
9	ND-4012	Sección 1 Cll 150	102358	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
10	ND-4125	Sección 1 Cll 150	102444	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
11	ND-4475	Sección 1 Cll 150	102872	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
12	ND-4685	Sección 1 Cll 150	103128	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
13	ND-5035	Sección 1 Cll 150	103584	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
14	ND-5385	Sección 1 Cll 150	104040	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
15	ND-5665	Sección 1 Cll 150	104404	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
16	ND-5945	Sección 1 Cll 150	104704	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
17	ND-6145	Sección 1 Cll 150	104782	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
18	ND-6467	Sección 1 Cll 150	104849	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
19	ND-6750	Sección 1 Cll 150	105015	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
20	ND-6978	Sección 1 Cll 150	105162	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
21	ND-7344	Sección 1 Cll 150	105302	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
22	ND-7616	Sección 1 Cll 150	105438	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
23	ND-7926	Sección 1 Cll 150	105528	115001	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
24	ND-8103	Sección 1 Cll 150	105617	115001	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
25	ND-8540	Sección 1 Cll 150	105749	115000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
26	ND-8752	Sección 1 Cll 150	105836	115000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
27	ND-9114	Sección 1 Cll 150	105920	115000	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
28	ND-9212	Sección 1 Cll 150	105953	115000	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
29	ND-9401	Sección 1 Cll 150	106018	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
30	ND-9513	Sección 1 Cll 150	106048	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
31	ND-9662	Sección 1 Cll 150	106077	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
32	ND-9746	Sección 1 Cll 150	106099	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
33	ND-217	Sección 2 Cll 72	93447	112948	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
34	ND-505	Sección 2 Cll 72	94270	112356	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
35	ND-707	Sección 2 Cll 72	94718	112035	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
36	ND-1010	Sección 2 Cll 72	95274	111636	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
37	ND-1212	Sección 2 Cll 72	95556	111433	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
38	ND-1313	Sección 2 Cll 72	95873	111206	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
39	ND-1515	Sección 2 Cll 72	96405	110824	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
40	ND-1818	Sección 2 Cll 72	96811	110532	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
41	ND-2020	Sección 2 Cll 72	97348	110147	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
42	ND-2323	Sección 2 Cll 72	97712	109886	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
43	ND-2626	Sección 2 Cll 72	98162	109562	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
44	ND-2828	Sección 2 Cll 72	98479	109334	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
45	ND-3434	Sección 2 Cll 72	99584	108541	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
46	ND-3939	Sección 2 Cll 72	100531	107862	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
47	ND-4141	Sección 2 Cll 72	100723	107723	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
48	ND-4343	Sección 2 Cll 72	100818	107655	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
49	ND-4747	Sección 2 Cll 72	101146	107420	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
50	ND-4930	Sección 2 Cll 72	101307	107304	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
51	ND-5498	Sección 2 Cll 72	101424	107220	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
52	ND-5981	Sección 2 Cll 72	101509	107159	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
53	ND-6360	Sección 2 Cll 72	101603	107092	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
54	ND-6983	Sección 2 Cll 72	101699	107023	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
55	ND-7154	Sección 2 Cll 72	101805	106947	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
56	ND-7770	Sección 2 Cll 72	101883	106891	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
57	ND-7825	Sección 2 Cll 72	101895	106882	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
58	ND-7999	Sección 2 Cll 72	101995	106810	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
59	ND-8087	Sección 2 Cll 72	102210	106656	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
60	ND-8175	Sección 2 Cll 72	102424	106502	Complejo de Conos	ALUVIAL	100

Tabla 6.2. Sitios modelados por SCG

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	ND-8219	Sección 2 Cll 72	102531	106425	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
62	ND-8263	Sección 2 Cll 72	102639	106348	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
63	ND-8336	Sección 2 Cll 72	102734	106279	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
64	ND-8420	Sección 2 Cll 72	102762	106259	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
65	ND-8628	Sección 2 Cll 72	102786	106242	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
66	ND-8868	Sección 2 Cll 72	102817	106220	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
67	ND-8986	Sección 2 Cll 72	102832	106209	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
68	ND-9315	Sección 2 Cll 72	102920	106146	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
69	ND-9651	Sección 2 Cll 72	103038	106061	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
70	ND-9795	Sección 2 Cll 72	103078	106032	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
71	ND-9819	Sección 2 Cll 72	103090	106024	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
72	ND-9924	Sección 2 Cll 72	103155	105977	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
73	ND-200	Sección 3 Cl 34	98754	103204	Terraza Alta	LACUSTRE C	150
74	ND-480	Sección 3 Cl 35	99171	103137	Terraza Alta	LACUSTRE C	150
75	ND-900	Sección 3 Cl 36	99577	103072	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
76	ND-1122	Sección 3 Cl 37	99743	103046	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
77	ND-1404	Sección 3 Cl 38	100055	102996	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
78	ND-1620	Sección 3 Cl 39	100294	102957	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
79	ND-2247	Sección 3 Cl 40	100555	102916	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
80	ND-2578	Sección 3 Cl 41	100647	102901	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
81	ND-3277	Sección 3 Cl 42	100760	102883	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
82	ND-3816	Sección 3 Cl 43	100867	102866	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
83	ND-4075	Sección 3 Cl 44	100939	102854	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
84	ND-4615	Sección 3 Cl 45	101082	102831	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
85	ND-5021	Sección 3 Cl 46	101169	102817	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
86	ND-5176	Sección 3 Cl 47	101246	102805	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
87	ND-5410	Sección 3 Cl 48	101324	102793	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
88	ND-5985	Sección 3 Cl 49	101376	102784	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
89	ND-6435	Sección 3 Cl 50	101419	102778	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
90	ND-6669	Sección 3 Cl 51	101454	102772	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
91	ND-6997	Sección 3 Cl 52	101499	102765	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
92	ND-7236	Sección 3 Cl 53	101585	102751	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
93	ND-7800	Sección 3 Cl 54	101822	102713	Formacion Bogota	CERROS B	0
94	ND-8027	Sección 3 Cl 55	101919	102698	Formacion Cacho	CERROS A	0
95	ND-8346	Sección 3 Cl 56	102082	102671	Formacion Guaduas	CERROS A	0
96	ND-1628	Sección 4 Av Ferrocaril	90520	99917	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
97	ND-979	Sección 4 Av Ferrocaril	89812	99631	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
98	ND-2718	Sección 4 Av Ferrocaril	91891	100469	Complejo de Conos	ALUVIAL	150
99	ND-738	Sección 4 Av Ferrocaril	89540	99522	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	50
100	ND-365	Sección 4 Av Ferrocaril	89158	99368	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
101	ND-256	Sección 4 Av Ferrocaril	88924	99274	Suelo Residual	PIEDEMONTE C	25
102	ND-327	Sección 4 Av Ferrocaril	89073	99334	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
103	ND-3316	Sección 4 Av Ferrocaril	92730	100806	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
104	ND-1986	Sección 4 Av Ferrocaril	90790	100025	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
105	ND-37	Sección 4 Av Ferrocaril	88471	99091		CERROS A	0
106	ND-853	Sección 4 Av Ferrocaril	89676	99577	Llanura de Inundacion	ALUVIAL	50
107	ND-4900	Sección 4 Av Ferrocaril	94937	101695	Terraza Baja	ALUVIAL	200
108	ND-574	Sección 4 Av Ferrocaril	89409	99469	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
109	ND-1367	Sección 4 Av Ferrocaril	90217	99794	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
110	ND-4002	Sección 4 Av Ferrocaril	93695	101195	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
111	ND-2295	Sección 4 Av Ferrocaril	91218	100198	Complejo de Conos	ALUVIAL	150
112	ND-1144	Sección 4 Av Ferrocaril	89964	99692	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
113	ND-458	Sección 4 Av Ferrocaril	89286	99420	Complejo de Conos	ALUVIAL	50

Tabla 6.2. Sitios modelados por SCG (Continuación)

6.1.3 Asociación de Ingeniería Sísmica - AIS

La Asociación de Ingeniería Sísmica realizó modelaciones de respuesta unidimensionales en 169 sitios distribuidos por toda la ciudad, como consideraciones generales de sus modelos se tiene:

- Se emplearon las 16 señales sísmicas recomendadas, escalándolas a los niveles dados en el estudio de MZSB-1997.

- Se obtuvo la respuesta en cada sitio a partir de la modelación de 30 perfiles, con el fin de tener en cuenta la variación de las propiedades dinámicas y de la señal de diseño.

Esto se realizó para cada escenario sísmico de manera tal que en cada sitio se contaba con 90 modelaciones diferentes, para un total de 15210 corridas.

En la **Tabla 6.3** se presentan los sitios modelados, su correspondiente coordenada donde se localiza, la zona geológica y geotécnica y el espesor de suelo.

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	Z1-01	Carrera 3 con Calle 76	103012	106687	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
2	Z1-02	Calle 32S con Calle 15C	96147	97679	Terraza Baja	ALUVIAL	50
3	Z1-03	Carrera 7 con Calle 45	101494	103882	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
4	Z1-04	Calle 132 con Calle 59-80	100328	114358	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
5	Z2-01	Carrera 9 con Calle 93	103584	108492	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
6	Z2-02a	Calle 64 con Carrera 7	105974	114284	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
7	Z2-02b	Calle 64 con Carrera 7	105974	114284	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
8	Z2-03	Carrera 30 con Calle 13	98425	101996	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
9	Z2-04	Carrera 13ª entre Calles 31 y	100986	102521	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
10	Z2-05	Carrera 8 con Calle 86	103316	107830	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
11	Z2-06	Carrera 7 con Av 39	101291	103301	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
12	Z2-07a	Calle 138 con Carrera 60A - 6	100379	114980	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
13	Z2-07b	Calle 138 con Carrera 60A - 6	100379	114980	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
14	Z2-08	Av Caracas con Calle 53	101266	104873	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
15	Z2-09	Calle 27 con Carrera 13	100710	102117	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
16	Z2-10	Calle 26a con Carrera 13	100733	101997	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
17	Z2-11	Calle 67 con Carrera 9	101979	106139	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
18	Z2-12	Carrera 9 con Calle 71	102230	106513	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
19	Z2-13	Carrera 9 con Calle 71	102230	106513	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
20	Z2-14	Calle 68 con Carrera 6	102411	106146	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
21	Z2-15	Calle 40 con Carrera 7	101388	103590	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
22	Z2-16	Carrera 13 con Calle 31	100986	102521	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
23	Z2-17	Carrera 7 con Calle 37	101268	103154	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
24	Z2-18	Carrera 7 con Calle 45	101494	103882	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
25	Z2-19	Carrera 6 con Calle 40	101438	103400	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
26	Z2-20	Calle 77 con Carrera 3	103057	106830	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
27	Z2-21	Calle 87 con Carrera 8	103402	107985	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
28	Z2-22	Calle 26A con Carrera 13	100733	101997	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
29	Z2-25	Carrera 7 con Calle 61	101876	105535	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
30	Z2-26	Carrera 7 con Calle 65	102048	105865	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
31	Z2-29	Carrera 10 con Calle 18	100405	101192	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
32	Z2-31	Calle 55 con Carrera 6	101738	104958	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
33	Z2-32	Calle 62 con Carrera 7	100774	101805	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
34	Z2-33	Carrera 7 con Calle 34	101151	102784	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
35	Z2-34	Carrera 7 con Calle 36	101244	103000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
36	Z2-37	Carrera 8 con Calle 48	101439	104164	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
37	Z2-38	Calle 67 con Carrera	102167	106028	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
38	Z2-39	Carrera 8 con Calle 48	101459	104285	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
39	Z2-40	Carrera 8 con Calle 46	101421	104048	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
40	Z2-41	Carrera 5 con Calle 26	101120	101753	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
41	Z2-42	Carrera 7 con Calle 72	102466	106478	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
42	Z2-43	Carrera 6 con Calle 55	101738	104958	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
43	Z2-44	Carrera 7 con Calle 32	101033	102436	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
44	Z2-45	Calle 47 con Carrera 7	101517	104148	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
45	Z2-46	Calle 72 con Carrera 7	102457	106473	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
46	Z2-47	Carrera 7 con Calle 70	102340	106249	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
47	Z2-48	Carrera 6 con Calle 27	101047	102136	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
48	Z2-49	Carrera 7 con Calle 66	102099	105947	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
49	Z2-50	Carrera 7 con Calle 64	102009	105777	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
50	Z1_Z2-01	Calle 19A con Carrera 1E	103298	107155	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
51	Z2_Z3-01	Calle 72 con Carrera 15	101771	106953	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
52	Z1_Z2-02	Carrera 7 con Calle 127	105428	111606	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
53	Z2_Z3-02	Avenida 9 con calle 147	105021	114290	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
54	Z1_Z2-03a	Carrera 7 con Calle 132	105377	112611	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
55	Z2_Z3-03	Calle 130 con Carrera 10	105141	112248	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
56	Z1_Z2-03b	Carrera 7 con Calle 132	105377	112611	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
57	Z2_Z3-04	Calle 122 con Carrera 9A	105007	111354	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
58	Z1_Z2-06	Carrera 1 este con 13	101007	100047	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
59	Z2_Z3-06	Calle 73 con Carrera 13	101993	106993	Complejo de Conos	ALUVIAL	50
60	Z1_Z2-07	Transversal 5A con 127	105745	111926	Coluvion	PIEDEMONTE A	25

Tabla 6.3. Sitios modelados por AIS

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	Z2_Z3-07	Calle 72 con Carrera 11	102085	106732	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
62	Z2_Z3-08	Av 9 con Calle 114	104628	110620	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
63	Z2_Z3-09	Av 9 con Calle 125	104965	111623	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
64	Z2_Z3-10	Av caracas con Calle 55	101268	105130	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
65	Z2_Z3-11	Calle 72 con Carrera 17	101593	107089	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
66	Z2_Z3-12	Calle 72 con Carrera 13	101900	106867	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
67	Z2_Z3-13	Calle 106 con Carrera 8B	104560	109889	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
68	Z2_Z3-14	Carrera 92 con Calle 153	99453	117066	Formacion Guaduas	CERROS A	0
69	Z2_Z3-15	Carrera 30 con Calle 45	99222	104638	Terraza Alta	LACUSTRE B	150
70	Z2_Z3-16	Calle 94 con Carrera 10	103544	108916	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
71	Z2_Z3-17	Carrera 27 con Calle 163A	104841	116026	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
72	Z2_Z3-18	Calle 138 con Carrera 57	100798	114829	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
73	Z2_Z5-01	Calle 13 con Carrera 17	99443	101057	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
74	Z2_Z5-02	Calle 13 con Carrera 16	99541	100971	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
75	Z2_Z5-03	Carrera 13 con Calle 13	99840	100716	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
76	Z2_Z5-04	Carrera 10 con Calle 13	100083	100650	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
77	Z2_Z5-05	Carrera 10 con Calle 15	100167	100780	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
78	Z2_Z5-06	Calle 13 con Carrera 19	100167	100780	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
79	Z2_Z5-07	Calle 13 con Carrera 19	99802	100762	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
80	Z2_Z5-08	Calle 13 con Carrera 30	98396	101992	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
81	Z2_Z5-09	Calle 13 con Carrera 30	98396	101992	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
82	Z2_Z5-10	Calle 13 con Carrera 16	99541	100971	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
83	Z3-01	Calle 43A con Carrera 68A Bis	96492	106180	Llanura de Inundacion	LACUSTRE B	300
84	Z3-02	Calle 145 con Carrera 47	101981	115298	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
85	Z3-03	Calle 175 con Carrera 39	103870	117615	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
86	Z3-04	Calle 135 Av Boyaca	100780	114488	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
87	Z3-05	Diagonal 22 B con Carrera 63	96976	105328	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
88	Z3-06	Carrera 30 con Callle 26	99604	103436	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
89	Z3-07	Calle 138 con Carrera 54	101205	114686	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
90	Z3-08	Calle 144 con Carreras 99B a	98466	116348	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
91	Z3-09	Calle 143B con Carrera 48	101867	114960	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
92	Z3-10	Calle 191 con Carrera 34	105148	119004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
93	Z3-11	Carrera 43A con Calle 145	102411	115060	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
94	Z3-12	Calle 153 con Carrera 98	98910	117260	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
95	Z3-13	Carrera 52 con Diagonal 22A	97384	104521	Terraza Alta	LACUSTRE C	250
96	Z3-14	Carrera 45 con calle 64	99322	107449	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
97	Z3-15	Diagonal 183 con 41	103919	118056	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
98	Z3-16	Carrera 46A con Calle 135	101948	114167	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
99	Z3-17	Carrera 28 con Calle 165	104870	116266	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
100	Z3-18	Carrera 64 con Calle 170	101477	117579	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
101	Z3-19	Diagonal 22a con 68d	96345	106424	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
102	Z3-20	Calle 81 con Autopista	101908	108009	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
103	Z3-21	Calle 80 con Escuela Militar	101021	108714	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
104	Z3-22	Calle 63 con Carrera 30	100184	106131	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
105	Z3-23	Calle 26 con Carrera 50	98107	104816	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
106	Z3-24	Carrera 53 con calle 13	96527	103596	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
107	Z3-25	Calle 170 con Autopista Norte	103440	117172	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
108	Z3-26	Calle 13 con Avenida Boyaca	94564	105865	Terraza Baja	ALUVIAL	250
109	Z3-27	Carrera 46 con Calle 140A	102210	114750	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
110	Z3-28	Avenida NQS con Calle 26	99586	103393	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
111	Z3-29	Calle 170 con Carrera 31	104433	116945	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
112	Z3-30	Calle 134 con Carrera 46A	101920	114068	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
113	Z3-31	Carrera 68B con Calle 43B	96856	106498	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
114	Z3-32	Carrera 52 con Calle 147	101682	115355	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
115	Z3-33	Calle 152 con Carrera 28	104461	115014	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
116	Z3-34	Diagonal 152 con Transversal	102886	115607	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
117	Z3-35	Carrera 30 con Calle 6	97702	101125	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
118	Z3-36	Transversal 32 con Calle 131	103107	113226	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
119	Z3-37	Calle 22C con Carrera 40	98500	103539	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
120	Z3-38	Calle 43A con Carrera 68a Bis	99452	103645	Terraza Alta	LACUSTRE C	150

Tabla 6.3. Sitios modelados por AIS (Continuación)

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
121	Z3-39	Calle 72 con Carrera 28	100971	107526	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
122	Z3-40	Calle 72 con Carrera 30	100831	107635	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
123	Z3-41	Calle 72 con Carrera 37	100488	107904	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
124	Z3-42	Calle 72 con Carrera 45A	99932	108317	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
125	Z3-43	Calle 72 con Carrera 50	99604	108569	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
126	Z3-44	Calle 72 con Carrera 20	101433	107200	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
127	Z3-45	Calle 72 con Carrera 24	101163	107402	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
128	Z3-46	Calle 13 con Carrera 39	97536	102744	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
129	Z3-47	Calle 13 con Carrera 35	97966	102369	Complejo de Conos	ALUVIAL	150
130	Z3-48	Carrera 89C con Calle 42	94786	109065	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
131	Z3-49	Avenida Chile con Carrera 24	101172	107380	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
132	Z3-50	Avenida Chile con NQS	100464	107913	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
133	Z3-51	Avenida Chile con Carrera 31	100733	107700	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
134	Z3-52	Calle 53 con Carrera 30	99837	105135	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
135	Z3_Z4-01	Transversal 32 con Calles 131	103107	113226	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
136	Z3_Z4-02	Calle 95 con Carrera 59	99775	110485	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
137	Z3_Z4-03	Calle 116 con Avenida Suba	100748	111885	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
138	Z3_Z4-04	Av Suba con Diag 117A	100763	111829	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
139	Z3_Z4-05	Calle 68 con Carrera 66	98149	109178	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
140	Z3_Z4-06	Calle 127 con Carrera 29	96756	108964	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
141	Z3_Z4-07	Transversal 21 con Calle 98	102530	109857	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
142	Z3_Z4-08	Calle 72 con Avenida 68	98447	109706	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
143	Z3_Z4-09	Calle 68 con Carrera 61	98494	108948	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
144	Z4-01	Calle 59ª con Carrera 74	96858	108872	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
145	Z4-02	Carrera 48F con Calle 95	100294	110262	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
146	Z4-03	Avenida Calle 100 con Carrera	103176	109877	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
147	Z4-04	Calle 127 con Autopista Norte	102605	112250	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
148	Z4-05	Calle 91 con Carreras 17	102576	108801	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
149	Z4-06	Calle 100 con Autopista Norte	102315	110008	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
150	Z4-07	Calle 68 con Carrera 82	97003	110910	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
151	Z4-08	Calle 68 con Carrera 86	96483	110460	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
152	Z4-09	Calle 68 con Carrera 91	96027	110739	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
153	Z4-10	Carrera 98 con Calle 68	95353	111131	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
154	Z4-11	Calle 68 con Carrera 102	95494	112053	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
155	Z4-12	Calle 68 con Diagonal 105F	94863	111722	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
156	Z4-13	Calle 68 con Carrera 110	94324	112021	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
157	Z4-14	Calle 68 con Carrera 74A	97407	109742	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
158	Z4-15	Calle 68 con Carrera 76	97194	109900	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
159	Z4-16	Calle 68 con Carrera 82	97003	110910	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
160	Z4-17	Carrera 111 con Calle 157	98294	118288	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
161	Z4-18	Carrera 117 con Calle 68	93505	113072	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
162	Z5-01	Carrera 92 con Calle 6	91668	104961	Terraza Baja	ALUVIAL	250
163	Z5-02	Calle 3 sur con Carrera 70	94043	102608	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
164	Z5-03	Avenida 68 con Calle 30 sur	94171	101199	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
165	Z5-04	Transversal 72A con Calle 12A	93893	105508	Complejo de Conos	ALUVIAL	250
166	Z5-05	Carrera 27 con Calle 44S	94494	98561	Complejo de Conos	ALUVIAL	100
167	Z5-06	Diagonal 43S con Carrera 86	90166	102742	Terraza Baja	ALUVIAL	200
168	Z5-07	Diagonal 43S con Carrera 81	90461	102272	Complejo de Conos	ALUVIAL	200
169	Z5-08	Diagonal 42S con Carrera 84	90576	102720	Complejo de Conos	ALUVIAL	200

Tabla 6.3. Sitios modelados por AIS (Continuación)

La **Figura 6.1** contiene la ubicación de los sitios de análisis para los estudios de UNIANDES, SCG y AIS. La ubicación de cada sitio fue revisado cuidadosamente, debido a que había algunas inconsistencias en las coordenadas.

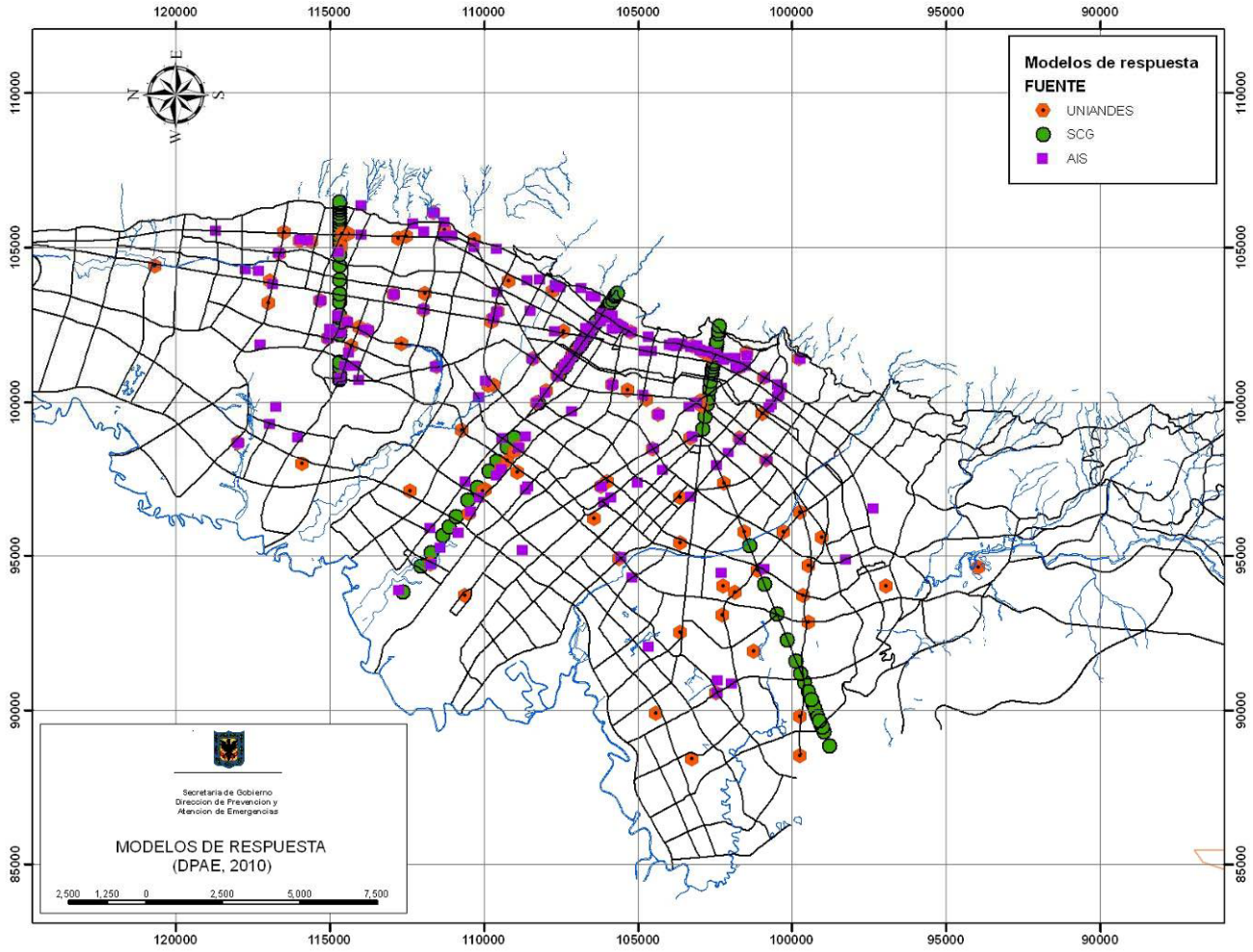


Figura 6.1. Localización de los modelos de respuesta

6.1.4 Agrupación de los modelos de respuesta

Con el fin de caracterizar el comportamiento dinámico de cada una de las 31 zonas geotécnicas para respuesta sísmica, se agruparon los sitios modelados de acuerdo a su localización y se analizo la respuesta sísmica de cada zona, se concluyó de dicho análisis inicial que se podían unir zonas, obteniendo así 16 zonas de respuesta sísmica homogénea. En la **Tabla 6.4** y en la **Figura 6.2** se presenta la distribución de los modelos realizados por cada convenio en cada una de las zonas consideradas finalmente.

ZONA	CODIGO	TOTAL	SCG	UNIANDES	AIS
CERROS	1	5	4	0	1
PIEDEMONTE A	2	20	8	4	8
PIEDEMONTE B	3	64	14	6	44
PIEDEMONTE C	4	4	2	1	1
LACUSTRE 50	5	5	1	1	3
LACUSTRE 100	6	14	4	4	6
LACUSTRE 200	7	86	20	29	37
LACUSTRE 300	8	54	10	20	24
LACUSTRE 500	9	17	6	4	7
LACUSTRE ALUVIAL 200	10	7	2	2	3
LACUSTRE ALUVIAL 300	11	3	0	1	2
ALUVIAL 50	12	7	4	3	0
ALUVIAL 100	13	27	10	5	12
ALUVIAL 200	14	30	5	18	7
ALUVIAL 300	15	2	0	0	2
DEPOSITO LADERA	16	42	26	4	12
TOTAL		387	116	102	169

Tabla 6.4. Número de modelos por zona geotécnica de respuesta sísmica

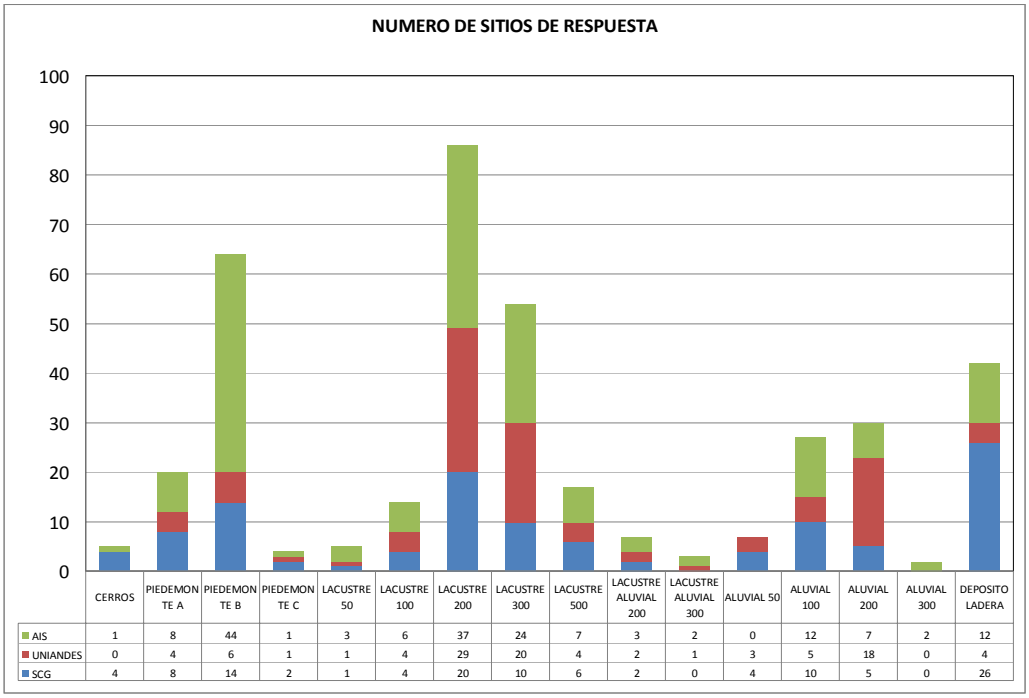


Figura 6.2. Distribución de los modelos de respuesta en cada zona

6.2 MODELACIONES UNIDIMENSIONALES

Como se ha mencionado anteriormente, se realizaron una serie de modelaciones en la que se tuvo en cuenta el modelo geológico geotécnico, las propiedades dinámicas obtenidas de las señales de la RAB y las zonas de respuesta sísmica determinadas a partir del análisis de las respuestas de los convenios presentados en el numeral anterior.

De este modo, se realizaron para las zonas planas de la ciudad, Lacustre, Aluvial y Lacustre-Aluvial modelaciones unidimensionales empleando el programa EERA desarrollado por Bardet et al (2000). El programa asume un comportamiento del suelo lineal equivalente para evaluar la respuesta sísmica de una columna de depósito de suelo.

6.2.1 Procedimiento de modelación

El procedimiento de modelación unidimensional comprendió la definición de los perfiles típicos de cada zona acordes con el modelo geológico geotécnico, la adopción de propiedades dinámicas calibradas con los registros de la RAB, calculo de la respuesta de sitio con el programa EERA, obtención de espectros de respuesta, relaciones espectrales y funciones de transferencia.

6.2.2 Definición de perfiles de análisis

Se construyeron once perfiles estratigráficos típicos que representan a cada una de las zonas de respuesta sísmica homogénea del sector plano de la ciudad, en la **Tabla 6.5** se resume el tipo de zona y profundidad del perfil típico.

Zona	Profundidad (m)
Lacustre	50
Lacustre	100
Lacustre	200
Lacustre	300
Lacustre	500
Lacustre-Aluvial	200
Lacustre-Aluvial	300
Aluvial	50
Aluvial	100
Aluvial	200
Aluvial	300

Tabla 6.5. Perfiles típicos modelados 1D

6.2.3 Propiedades dinámicas

A cada perfil típico se le definió sus propiedades dinámicas con base en la información disponible en la base de datos geotécnica y las recomendaciones de la interpretación de señales de la RAB. A manera de ejemplo se presenta el perfil típico y propiedades dinámicas planteadas para la zona Lacustre100 en la **Tabla 6.7** y en la **Tabla 6.7**, las curvas de degradación y amortiguamiento se calculan para cada estrato con base en los parámetros recomendados por el modelo de Díaz-Parra 2008 y las propiedades dinámicas del perfil, el resultado se presenta en la **Figura 6.3**.

No Capa	Material	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario KN/m^3	σ'_o capa (KN/m^2)
1	CL	0	5	50	1.29	56	17.7	29
2	CH	5	10	150	3.69	195	13.7	65
3	CH	10	15	180	4.41	237	13.7	78
4	CH	15	20	180.0	4.41	237	14.2	92
5	CH	20	30	180.0	4.41	237	14.2	114
6	CH	30	40	160.0	3.93	209	14.7	146
7	CH	40	50	120.0	2.97	154	14.7	178
8	CL	50	60	80.0	2.01	98	15.7	214
9	CL	60	75	50.0	1.29	56	15.7	263
10	SM	75	90	30.0	0.81	29	17.7	332
11	SM	90	100	30.0	0.81	29	17.7	397

Tabla 6.6. Perfil típico zona Lacustre 100

No Capa	Material	Vref m/s	Vs modelado m/s	s Díaz	m Díaz	c*eo Diaz	γ_r Díaz	d Díaz	Dmin Díaz
1	CL	158	127	0.850	0.350	0.098	0.064	0.75	1.08
2	CH	140	130	0.919	0.350	0.279	0.241	1.00	1.14
3	CH	140	134	0.919	0.350	0.334	0.307	1.00	1.08
4	CH	140	138	0.919	0.350	0.334	0.325	1.00	1.02
5	CH	140	143	0.919	0.350	0.334	0.350	1.00	0.96
6	CH	140	149	0.919	0.350	0.297	0.339	1.00	0.89
7	CH	158	175	0.919	0.350	0.225	0.275	1.00	0.84
8	CL	158	180	0.919	0.350	0.152	0.199	0.75	0.60
9	CL	158	187	0.919	0.350	0.098	0.137	0.75	0.56
10	SM	265	326	0.850	0.350	0.062	0.094	0.50	0.35
11	SM	265	337	0.850	0.350	0.062	0.100	0.50	0.33

Tabla 6.7. Propiedades dinámicas típicas zona Lacustre 100

6.2.4 Modelación con EERA

El programa EERA, desarrollado en la Universidad de California del Sur (University of Southern California), calcula la respuesta de un sistema de suelo sometido a la excitación producida por ondas de corte que viajan verticalmente a través de capas horizontales visco-elásticas, infinitas y homogéneas. El programa se basa en la solución continua de la ecuación de onda (Kanai, 1951) adaptada para el uso de movimientos transcientes a través del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965). La no linealidad del módulo de corte y amortiguamiento es tenida en cuenta con el uso de propiedades lineales equivalentes del suelo (Idriss y Seed, 1968, Idriss y Seed, 1970) mediante un proceso iterativo para obtener un módulo de corte y un amortiguamiento compatibles con las deformaciones efectivas calculadas en cada capa.

En las modelaciones se emplearon las señales presentadas en el numeral 3.4.2 sin escalarlas y los resultados de obtuvieron en superficie o campo libre.

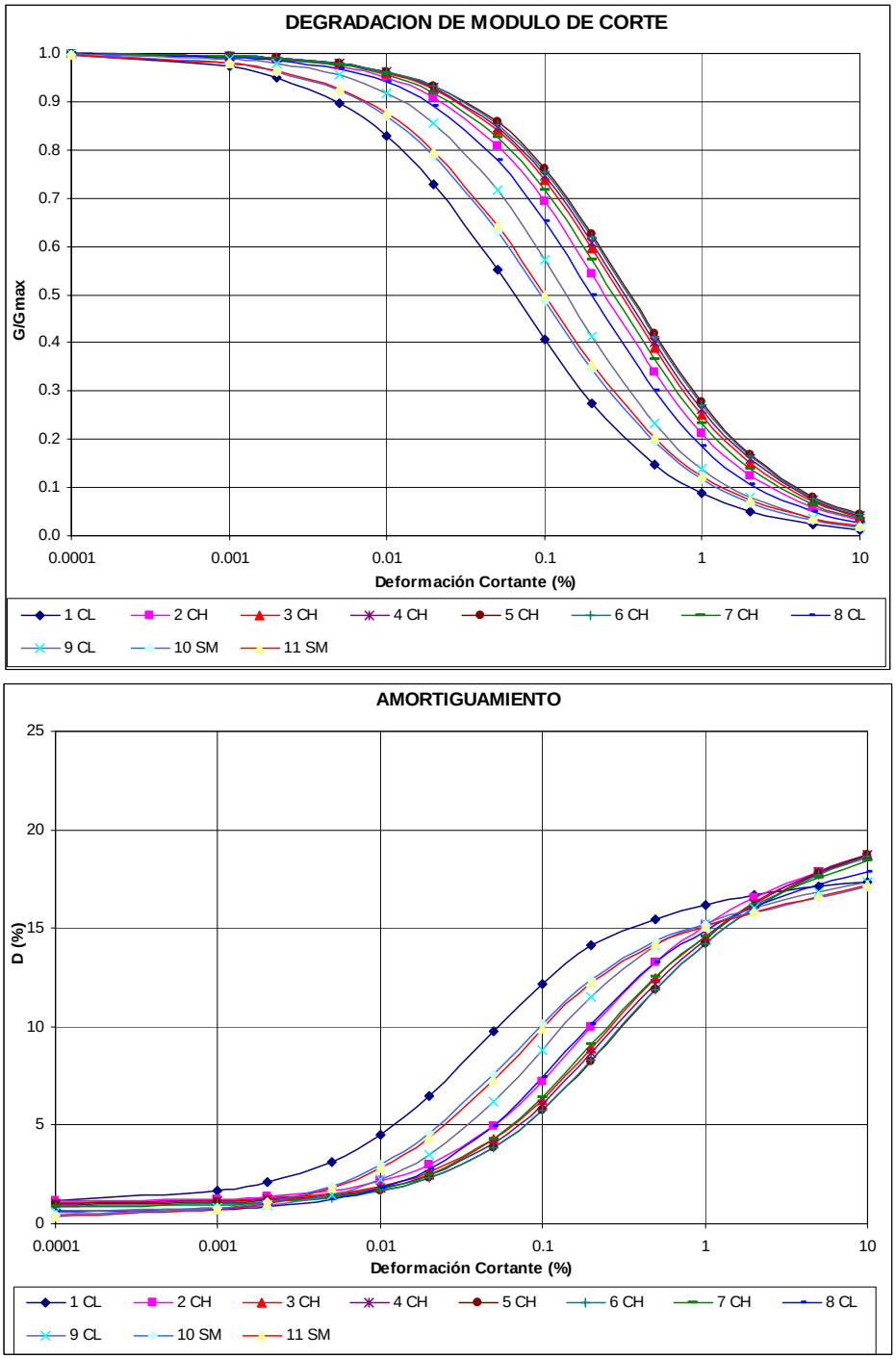


Figura 6.3. Curvas de degradación y amortiguamiento calculadas para la zona Lacustre 100

6.2.5 Espectros de respuesta

Con el objetivo de observar el comportamiento general de cada una de las zonas se obtuvieron los espectros de respuesta del grupo de señales empleadas para un amortiguamiento del 5%, a manera de ejemplo se ilustra la respuesta obtenida la la Zona Lacustre 100 en la **Figura 6.4**.

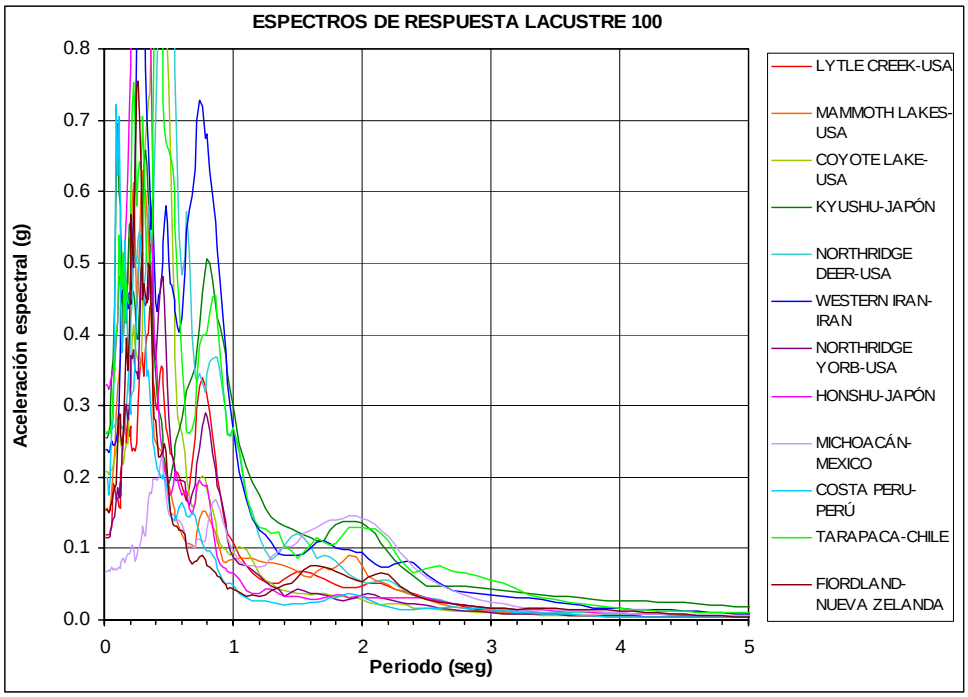


Figura 6.4. Espectros de respuesta perfil típico zona Lacustre 100

6.2.6 Relaciones espectrales y funciones de transferencia

Las relaciones espectrales son una manera de observar el efecto (amplificación o de-amplificación) que produce el perfil del suelo cuando es excitado por un sismo. Se determina la relación espectral como el cociente entre el espectro de respuesta en superficie respecto al espectros de respuesta de entrada en roca. A manera de ejemplo se muestra en la **Figura 6.5** las relaciones espectrales obtenidas para el perfil típico de la zona Lacustre 100.

Con el mismo concepto anterior, las funciones de transferencia representan la respuesta del perfil del suelo, pero en este caso en el dominio de las frecuencias a partir del cociente de las transformadas de Fourier entre la señal de salida y entrada. En la **Figura 6.6** se ilustran las funciones de transferencia del perfil típico de la zona lacustre 100.

6.2.7 Análisis de resultados unidimensionales

A partir del análisis de todos los resultados de cada una de los perfiles típicos las zonas modeladas se tiene:

- A medida que el espesor de depósito aumenta en el perfil modelado las respuestas se reducen progresivamente.

- Se pueden apreciar claramente en las relaciones espectrales y funciones de transferencia los periodos dominantes del perfil, así como los niveles de amplificación.

- A medida que la intensidad de la amenaza es mayor se disminuye la amplificación del suelo, por el efecto de la no linealidad de las propiedades dinámicas.

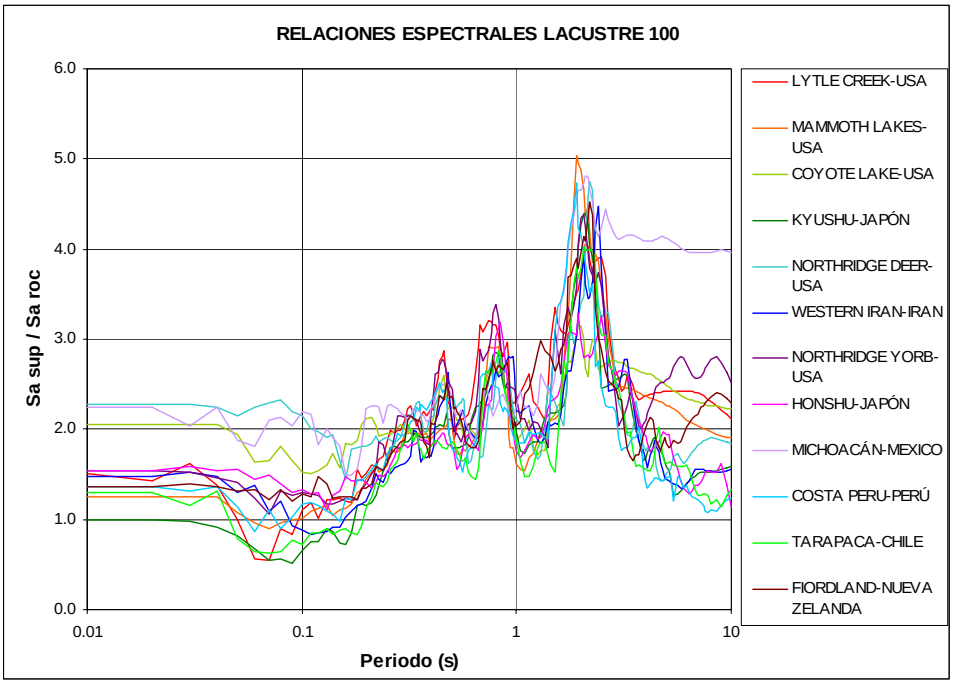


Figura 6.5. Relaciones espectrales perfil típico zona Lacustre 100

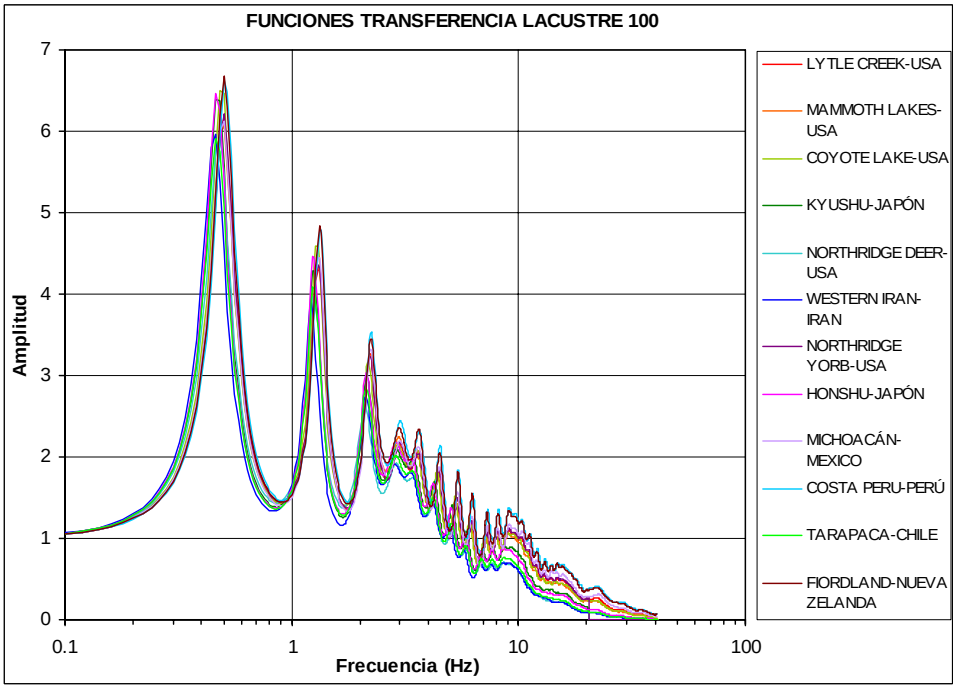


Figura 6.6. Funciones de Transferencia perfil típico zona Lacustre 100

6.3 MODELOS BIDIMENSIONALES

La modelación bidimensional se hizo con el fin de establecer la variación de la respuesta dinámica en superficie debido a la topografía del terreno y al cambio en la profundidad del basamento rocoso en las zonas de piedemonte A, B y C. Esta respuesta está condicionada por las propiedades y la distribución de los materiales en profundidad, la variación de sus espesores a lo largo de la sección y las condiciones de frontera del modelo.

La modelación se realizó mediante el programa QUAD4M, el cual resuelve la ecuación de equilibrio dinámico en dos dimensiones en el dominio del tiempo mediante la técnica de elementos finitos, considerando un modelo de comportamiento lineal equivalente y un esquema de amortiguamiento dependiente de la frecuencia tipo Rayleigh.

6.3.1 Procedimiento de modelación

Para realizar la modelación bidimensional es necesario definir secciones típicas acordes con el modelo geológico geotécnico, que incluyan espesores, distribución y propiedades dinámicas de los estratos. Con esto, se realiza la modelación bidimensional para obtener resultados de espectros de respuesta, relaciones espectrales y funciones de transferencia.

6.3.2 Definición de secciones típicas de análisis

Las secciones de análisis se localizaron, para los piedemontes A y B, en los mismos lugares modelados por la Sociedad Colombiana de Geotecnia. Para el caso del Piedemonte C, cuyos materiales se asumen iguales a los del Piedemonte B, pero se encuentra incluido en una configuración tipo cañón por el río Tunjuelo, se modeló una sección en el sur de la ciudad, en sentido oriente occidente, comenzando aproximadamente en la Av. Boyacá con Carrera 5E, y terminando en la Calle 73 DBis Sur con Av. Boyacá aproximadamente.

Los modelos de la zona de Piedemonte y la zona de Cerros, utilizaron los mismos materiales empleados por la Sociedad Colombiana de Geotecnia, pero detallando la malla de elementos finitos en las zonas de estudio. Las **Figura 6.7**, **Figura 6.8**, **Figura 6.9**, **Figura 6.10** muestran las mallas de elementos finitos con los materiales empleados en cada uno de los modelos establecidos.

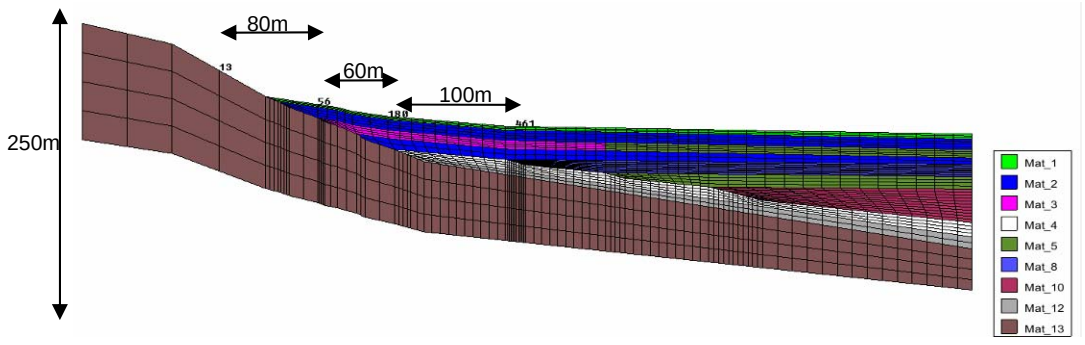


Figura 6.7. Sección bidimensional de análisis Piedemonte A

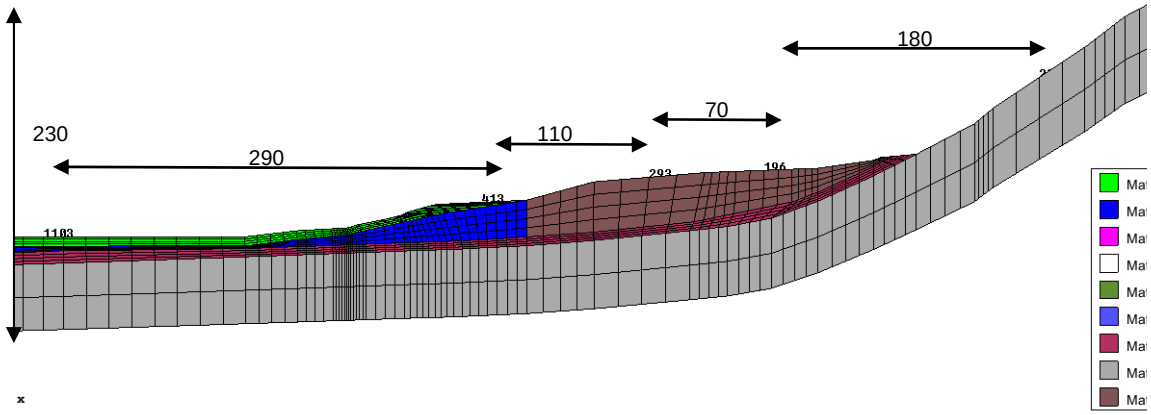


Figura 6.8. Sección bidimensional de análisis Piedemonte B

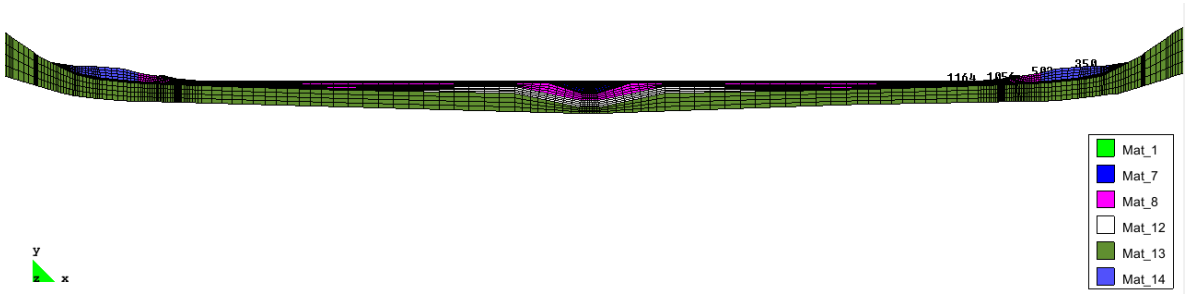


Figura 6.9. Sección bidimensional de análisis Piedemonte C

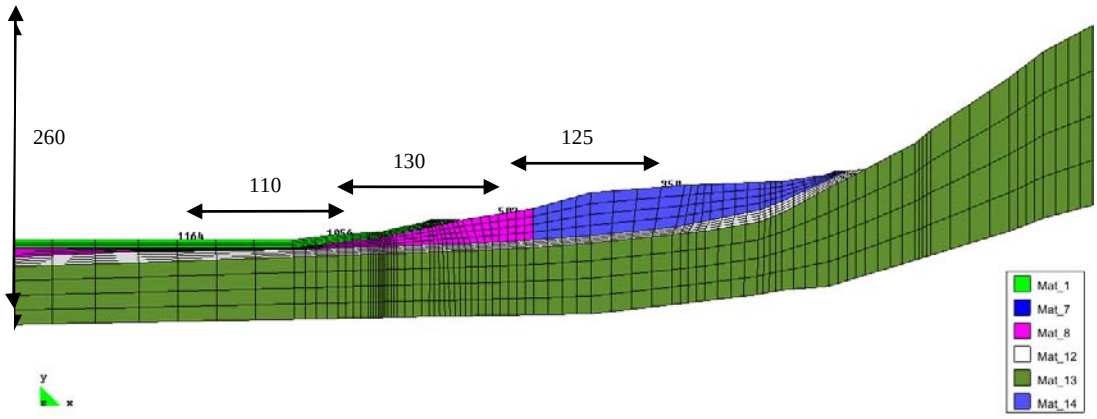


Figura 6.10. Sección bidimensional de análisis Piedemonte C (acercamiento)

6.3.3 Propiedades dinámicas

Para cada uno de los materiales empleados en los modelos bidimensionales, se establecieron sus propiedades dinámicas tales como velocidad de onda de corte, curvas dinámicas, relación de poisson entre otros. En la **Tabla 6.8** se recopilan las propiedades físicas de los materiales y la **Figura 6.11** se presentan las curvas dinámicas de los mismos.

Material	Descripción	Peso unitario □ (kN/m^3)	Módulo de corte máximo Gmáx (kPa)	Relación de Poisson m	Vs (m/s)	Sección	Fuente Curvas Dinámicas
1	Relleno (CH IP50)	17.0	38250	0.35	150	1, 2, 3	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
2	Limos arcillo-arenosos (IP30)	16.0	36000	0.38	150	1	Arena Seed (límite superior), 1970 + confinamiento 200KPa
3	Arena y Gravas	20.0	96800	0.35	220	1	Rollins, arenas entre 6-15m
4	Arena y Gravas profundas	20.0	180000	0.35	300	1, 3, 4	Rollins, arenas entre 15-37m
5	Arcilla IP80	14.7	28812	0.40	140	1	MZSB IP60
6	Arcilla Sabana 1	13.2	15972	0.45	110	1, 2, 3	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
7	Arcilla Sabana 2	13.2	22308	0.45	130	1, 2, 3	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
8	Arcilla Sabana 3	14.0	31081	0.45	149	1, 2, 3	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
9	Arcilla Transición	15.0	62424	0.40	204	1, 2, 3	MZSB IP60
10	Arcilla Subachoque 1	15.0	115094	0.40	277	1, 2, 3	MZSB IP60
11	Arcilla Subachoque 2	16.2	178563	0.40	332	1, 2, 3	MZSB IP60
12	Residual IP60 180-200m	21.0	425488	0.30	450	1, 2, 3, 4	Vucetic and Dobry (1991)
13	Roca arcillolita	25.0	1225000	0.25	700	1, 2, 3, 4	Base de datos Curvas Dinámicas IGR
14	Coluvión	18.0	288000	0.35	400	1,2	Coluvión de Caracas (Seed 1970, K2=90)

Tabla 6.8. Propiedades dinámicas de los materiales modelo 2D

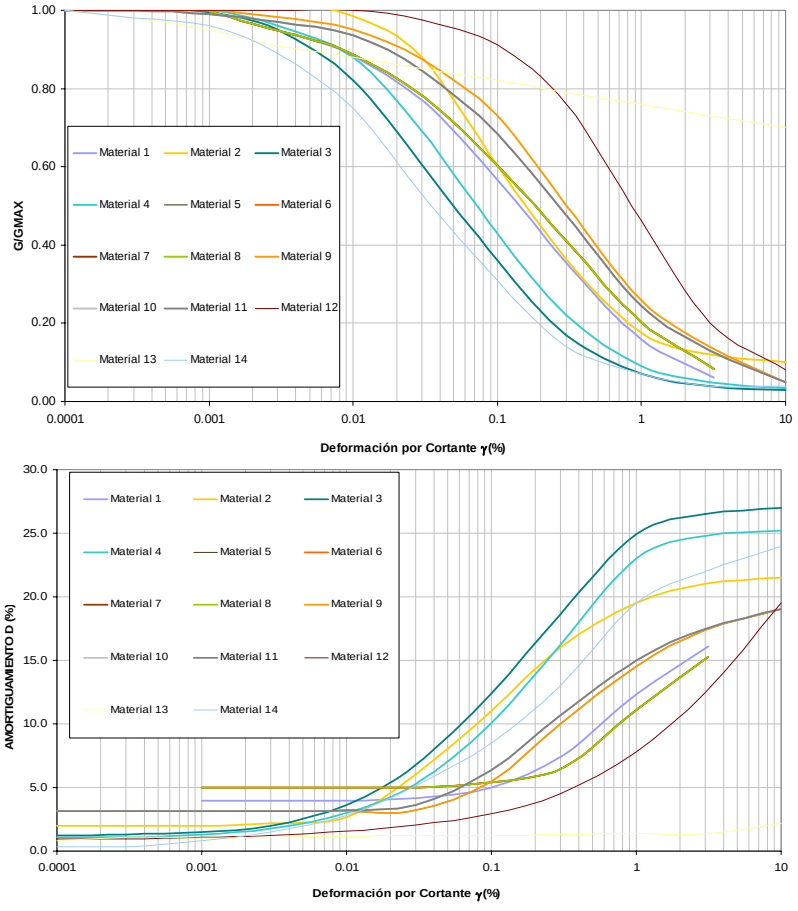


Figura 6.11. Curva dinámicas de los materiales modelo 2D

6.3.4 Modelación con QUAD4M

Para la construcción de la malla de elementos finitos se utilizó las herramientas de dibujo y enmallado del software GiD desarrollado por Ribo et al (2006) y las herramientas de definición del problema del módulo DSUN realizado por Vargas y Palacios (2002) en la tesis de ingeniería civil de la Universidad Nacional.

DSUN es un módulo de preproceso y postproceso de GiD diseñado para la captura de información y posterior presentación de resultados del QUAD4M. Por medio del DSUN se puede dibujar la geometría de una estructura de suelo a la cual se le aplicaran condiciones iniciales y de contorno. Una vez descritas estas condiciones se generan los datos de entrada correctamente organizados los cuales serán leídos por el módulo de cálculo QUAD4M. Este archivo de entrada para el cálculo de la respuesta sísmica de un deposito de suelo es un archivo plano en donde se describe detalladamente la malla junto con las propiedades de cada uno de los elementos que la constituye, así como también habilita la posibilidad de obtener como salida esfuerzos y deformaciones máximas en los elementos de la malla e historias de aceleraciones y aceleraciones máximas en los nodos deseados.

En general la solución de un problema modelado por medio del DSUN y analizado con el QUAD4M es un procedimiento que tiene los pasos que se ilustra en la **Figura 6.12**.

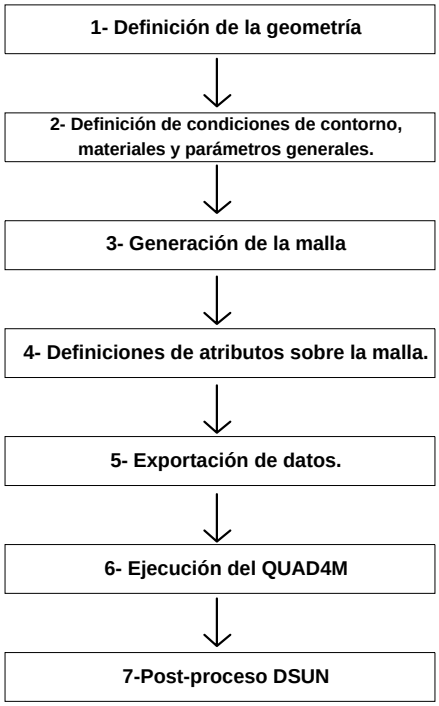


Figura 6.12. Metodología seguida en el modelamiento bidimensional

6.3.4.1 Definición de la geometría

Mediante la importación del modelo en formato dxf se obtuvieron en GiD las entidades geométricas (puntos, líneas y superficies) que definen el modelo bidimensional. Por tratase de una verificación de la respuesta obtenida anteriormente, y para optimizar el

tiempo de corridas, se hicieron los ajustes necesarios para el enmallado estructural en los sitios donde se requería conocer con un grado suficiente de precisión la respuesta. En la Figura 6.7, Figura 6.8, Figura 6.9 y Figura 6.10 se indican los puntos de análisis en los cuales se obtuvieron las historias de aceleración para posteriormente obtener espectros de respuesta y de Fourier que permitieran la determinación de las relaciones espectrales y funciones de transferencia.

6.3.4.2 Definición de condiciones de contorno, materiales y parámetros generales

Una vez establecida la geometría se definió sobre ella los diferentes atributos del modelo. Esto se hace usando las ventanas del DSUN, las cuales facilitan la asignación de las condiciones de contorno y materiales sobre las entidades de la geometría (puntos, líneas y superficies). Las condiciones de frontera se asignaron sobre puntos o líneas del contorno del dominio geométrico. Para cada material se definen sus respectivas propiedades como lo son el peso unitario, el modulo cortante máximo, el coeficiente de Poisson y los valores de relación de amortiguamiento y la relación de módulos cortantes respecto a las deformaciones. Una vez determinadas las propiedades del material estas fueron asignadas a las superficies de la geometría. Los valores antes asignados luego serán trasferidos a los nodos y elementos en la etapa de enmallado, además de las condiciones de contorno y materiales es posible establecer los parámetros generales del problema mediante una ventana del DSUN.

Debido a que los procedimientos de cálculo en el modelo bidimensional demora aproximadamente 1 a 2 horas, se seleccionaron algunas señales representativas de cada uno de los niveles de amenaza para las modelaciones. La **Tabla 6.9** muestra la relación de las señales de aceleración utilizadas para la modelación de cada escenario.

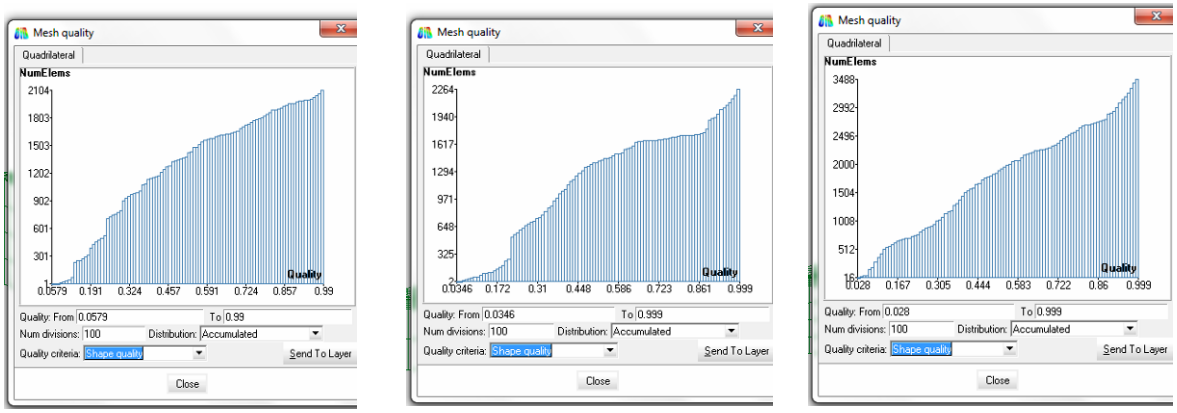
Nombre señal	Aceleración máxima (g)
Lytle Creek	0.081
Mammoth Lake	0.127
North-Deer Canyon	0.117
North-Yorb Lind	0.073
Michoacan	0.031
Costa Peru	0.149

Tabla 6.9. Relación de sismos empleados en la modelación 2D

6.3.4.3 Generación de la malla

Mediante las herramientas del GiD se definieron los parámetros para la obtención de una malla estructurada de elementos de cuatro nodos. Este procedimiento dio como resultado una malla estructurada conformada por 2210 nodos y 2104 elementos, para la sección de Piedemonte A, 2463 nodos y 2264 elementos, para la sección correspondiente al Piedemonte B y 3761 nodos y 3488 elementos para la sección correspondiente al Piedemonte C.

Con el objeto de optimizar el tiempo de corrida se optó por realizar una discretización mas detallada de la malla en el sentido de propagación de la onda (vertical) y en los sitios en los cuales se buscaba obtener la respuesta, evitando filtrar altas frecuencias debido a que la longitud de onda es mayor al tamaño de los elementos. El índice de la calidad de la malla se muestra en la **Figura 6.13**.



Piedemonte A Piedemonte B Piedemonte C

Figura 6.13. Índice de calidad de las mallas de elemento finitos

6.3.4.4 Definiciones de atributos sobre la malla

Una vez diseñadas las mallas, se definieron las condiciones de frontera sobre los nodos, así como también se eligieron nodos sobre los cuales se obtendrían los acelerogramas de respuesta. En la **Figura 6.14** se ilustra las condiciones nodales en el contorno de la malla de elementos finitos. Se asigno a los nodos de la base como trasmisores y los nodos laterales con libre desplazamiento horizontal.

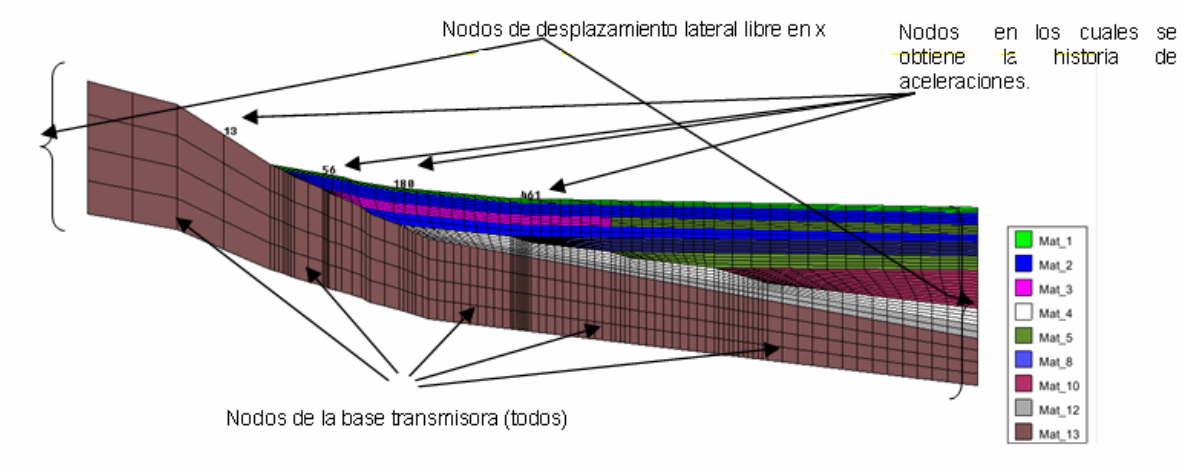


Figura 6.14. Condiciones nodales introducidas en el programa

6.3.4.5 Exportación de datos a QUAD4M

Mediante la herramienta de exportación del DSUN se obtuvo dos archivos planos que se constituyen en los archivos de entrada para el QUAD4M. El archivo de extensión *.q4i contiene los parámetros generales del problema, la numeración de los nodos y las conectividades. El archivo de extensión *.q4m contiene las curvas dinámicas con respecto a las deformaciones por corte.

6.3.4.6 Ejecución del QUAD4M

Los archivos obtenidos en la parte del preproceso (*.q4i y *.q4m) del DSUN son introducidos al programa QUAD4M para su análisis por medio del método de los elementos finitos.

6.3.5 Espectros de respuestas

Una vez corridas las secciones con las seis señales se obtuvieron espectros de respuesta y de Fourier de acuerdo con sus respectivas historias de aceleraciones en los respectivos puntos de evaluación. A manera de ejemplo, se muestran a continuación los espectros de respuesta para el modelo de Piedemonte A, generados para un amortiguamiento del 5% (Ver **Figura 6.15**).

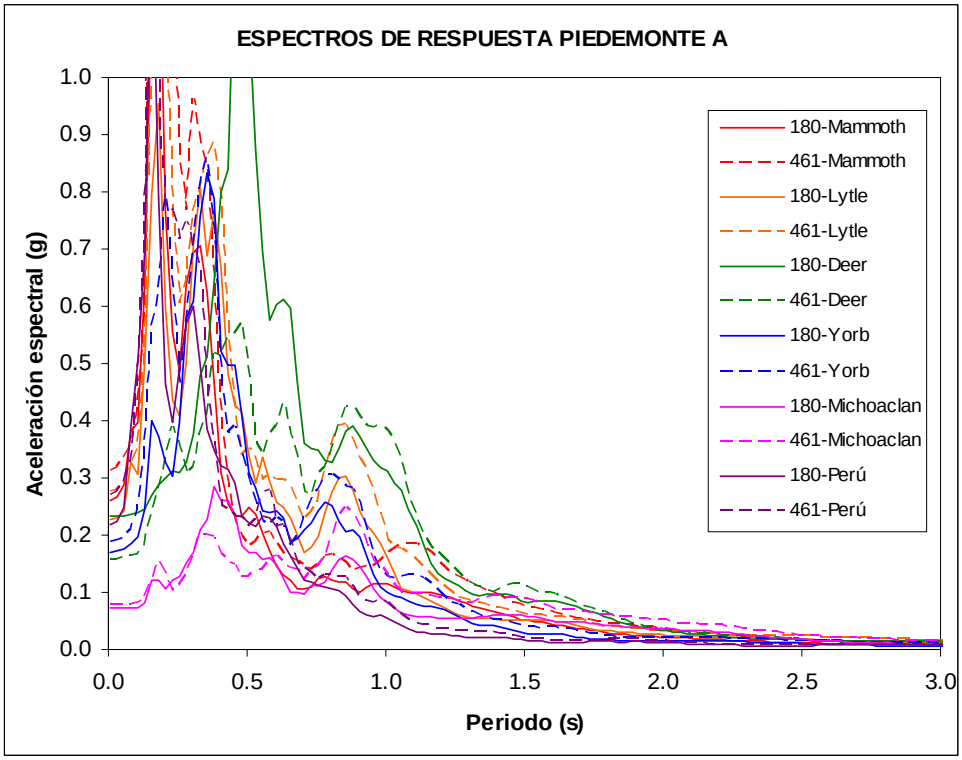


Figura 6.15. Espectros de respuesta nodos del Piedemonte A

6.3.6 Relaciones espectrales

De igual manera que en los modelos unidimensionales, se establecieron las relaciones espectrales de cada nodo para cada una de las señales, en las cuales se puede apreciar en que rangos de períodos el depósito de-amplifica o amplifica la señal de entrada y además sirve para comparar respuestas entre diferentes zonas. En la **Figura 6.16** se muestran a las relaciones espectrales para el modelo de Piedemonte A.

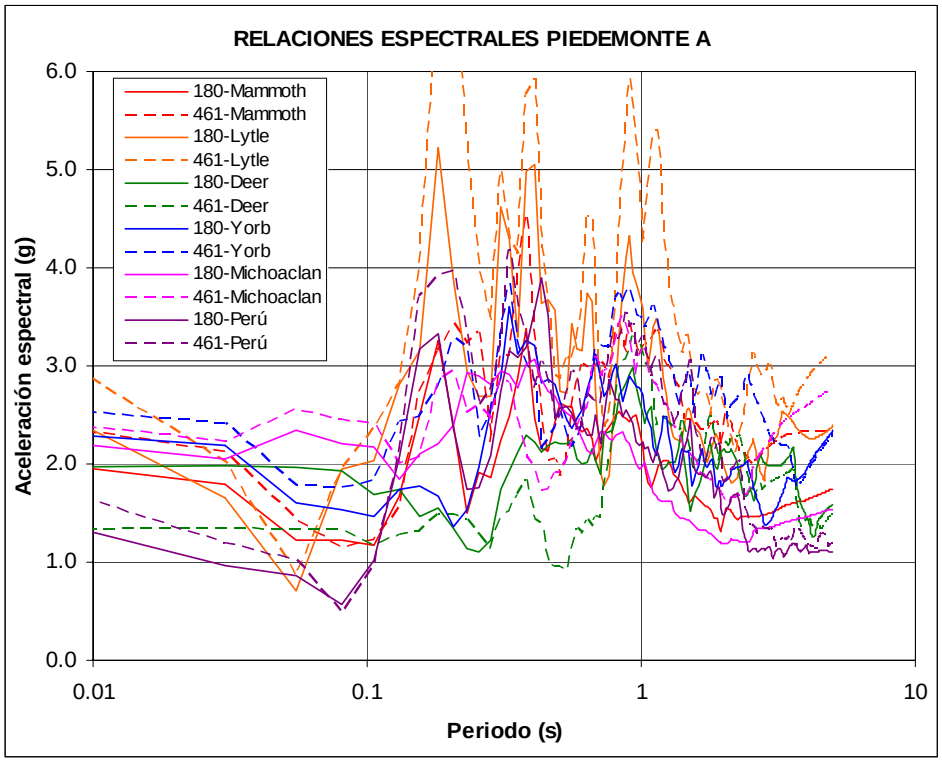


Figura 6.16. Relaciones espectrales nodos del Piedemonte A

6.3.7 Análisis de resultados bidimensionales

A partir del análisis de todos los resultados de cada una de las secciones típicas de los Cerros y Piedemontes modeladas se tiene:

- Es notorio en todas las secciones el efecto topográfico, tanto por las formas superficiales como por la profundización del basamento rocoso, dicho efecto se manifiesta principalmente en amplificaciones de las ondas de periodo bajo. Esto se explica en el hecho de que se están modelando materiales velocidades de onda de corte altas y de espesores relativamente bajos, por lo cual se espera que el período dominante de vibración del depósito sea bajo.

- A medida que la intensidad de la amenaza es mayor se disminuye la amplificación del suelo en los periodos bajos principalmente, por el efecto de la no linealidad de las propiedades dinámicas.

- Las amplificaciones observadas de las relaciones espectrales de los modelos 2D son mayores para los periodos bajos (< 0.75 s) y menores para los periodos altos (> 0.75 s) a los observadas en los resultados de los modelos 1D.

- Dado que se empleó un criterio diferente al utilizado por la Sociedad Colombiana de Geotecnia quienes modificaron la señal de entrada dependiendo de la malla de elementos finitos, mientras que en la DPAE optó por utilizar la señal de entrada sin ninguna modificación y considerar un semiespacio infinitamente rígido, las respuestas obtenidas en estas modelaciones fueron superiores a las obtenidas por la SCG.

6.4 RELACIONES ESPECTRALES PROMEDIO

Como se ha explicado en la metodología adoptada, para definir la respuesta de sitio de cada zona es necesario establecer la respuesta promedio para varios niveles de amenaza, de este modo cubrir diferentes escenarios para construir espectros uniformes de amenaza en superficie para varios periodos de retorno.

Es importante resaltar que estos resultados se emplearan para la definición de curvas de diseño de edificaciones conforme la NSR-10 y la modelación de escenarios de amenaza sísmica para efectos de evaluar daños por sismos.

Finalmente, aprovechando que se realizaron una serie de modelaciones considerando varios niveles de aceleración se logró definir para cada grupo de modelaciones las relaciones espectrales de cada zona teniendo las siguientes aceleraciones promedio para cada grupo (ver **Tabla 6.10**)

Grupo de modelaciones	Aceleraciones promedio (g)
FOPAE (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias)	0.03 0.10 0.16 0.23
UA (Universidad de los Andes)	0.03 0.08 0.12
SCG (Sociedad Colombiana de Geotecnia)	0.03 0.08 0.12
AIS (Asociación de Ingeniería Sísmica)	0.04 0.20 0.25

Tabla 6.10. Aceleraciones consideradas para cálculo de relaciones espectrales

A continuación se presentan las relaciones espectrales que se obtuvieron promediando para los niveles de amenaza considerados por cada uno de los grupos. Se aclara que para las zonas de cerros, piedemonte A, B y C solamente se tuvieron en cuenta los resultados de los modelos bidimensiones de DPAE y SCG, para las demás zonas se tuvieron en cuenta todos los resultados en la medida en que por su localización cubrieran la zona.

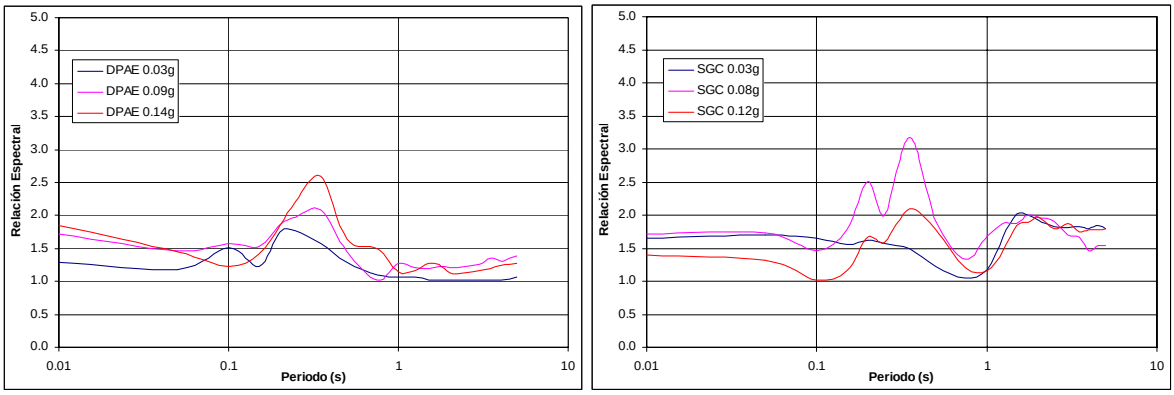


Figura 6.17. Relaciones espectrales promedio de Cerros

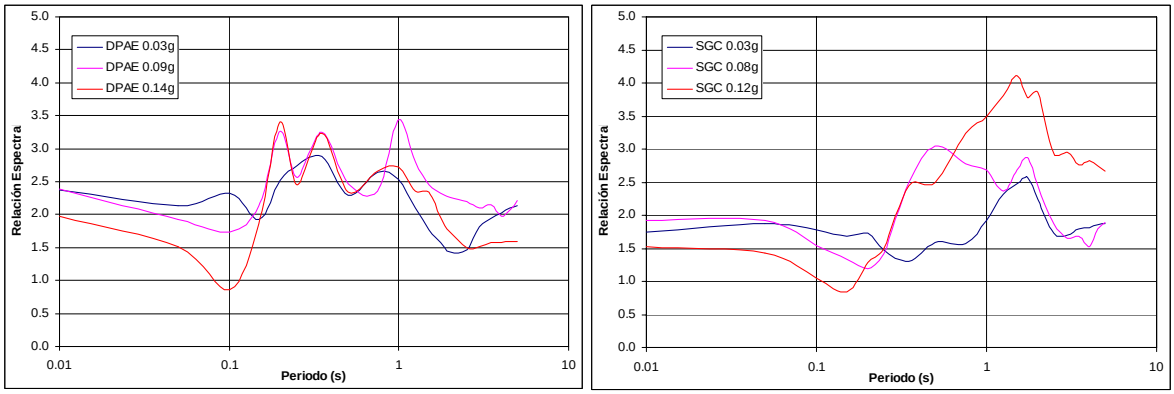


Figura 6.18. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte A

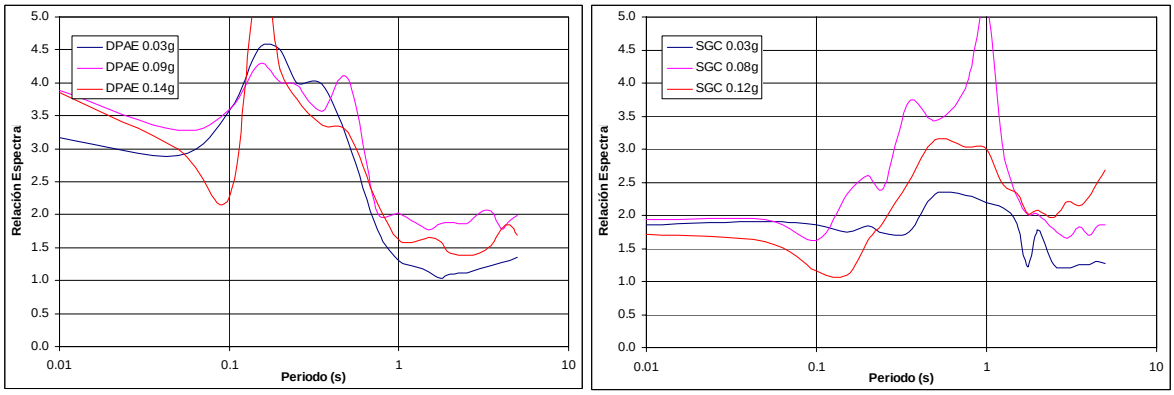


Figura 6.19. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte B

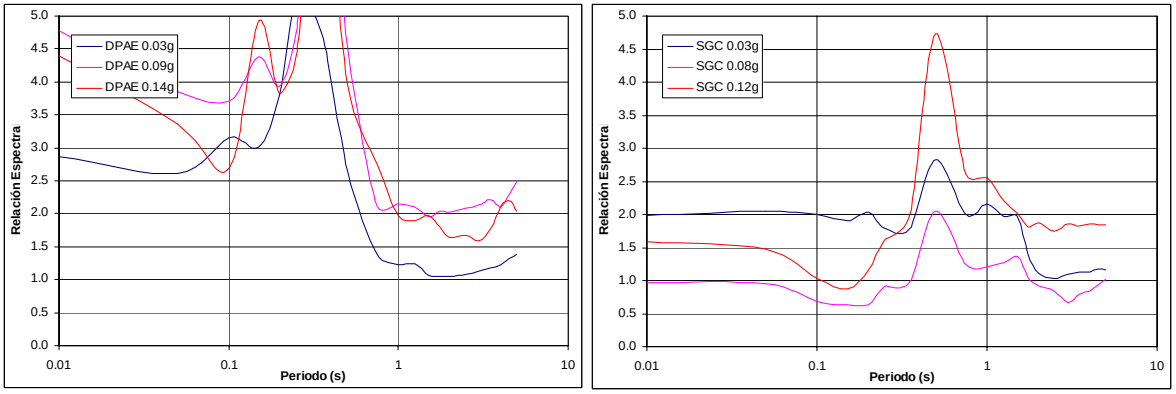


Figura 6.20. Relaciones espectrales promedio de Piedemonte C

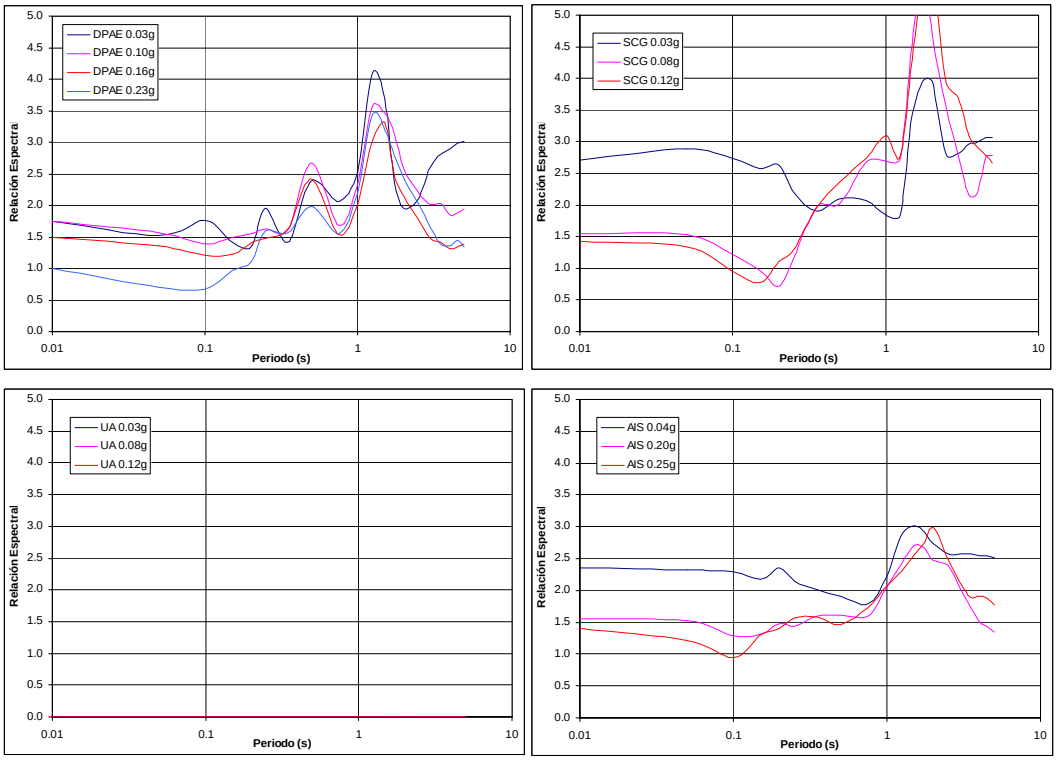


Figura 6.21. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 50

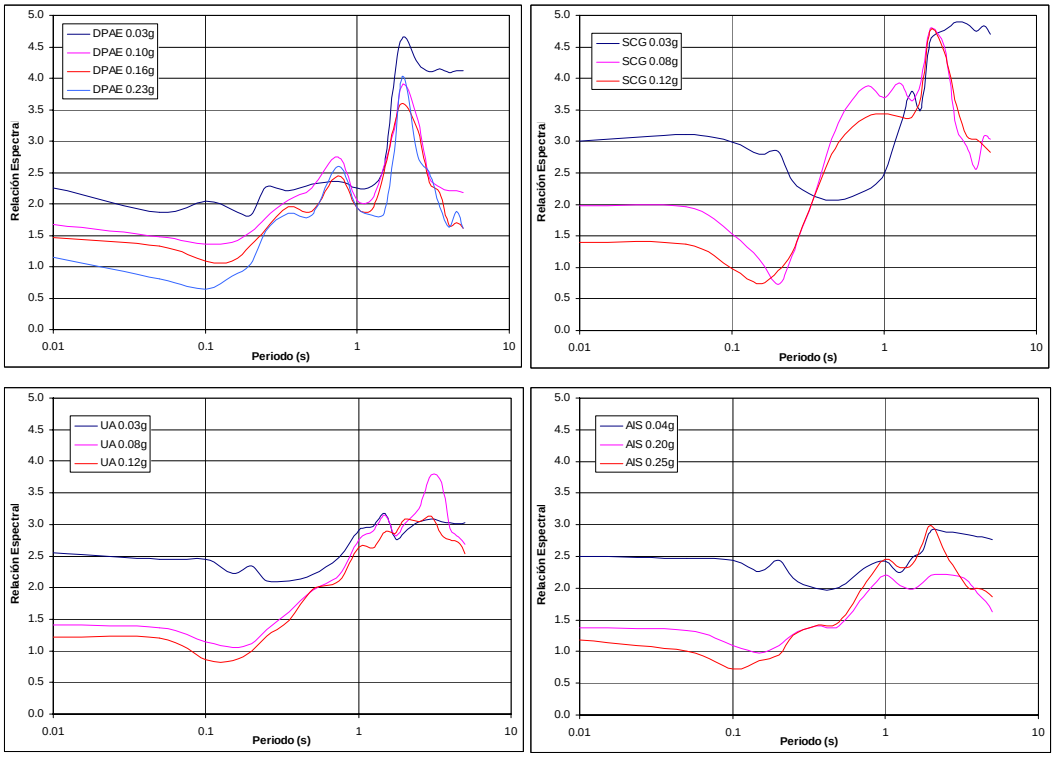


Figura 6.22. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 100

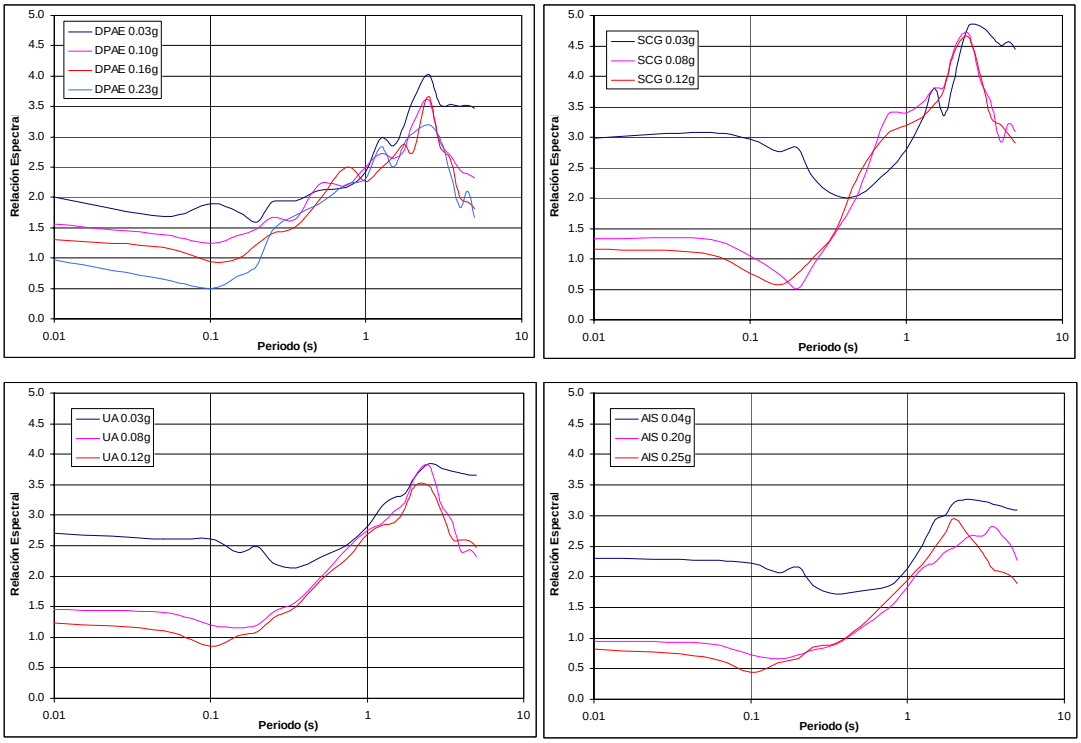


Figura 6.23. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 200

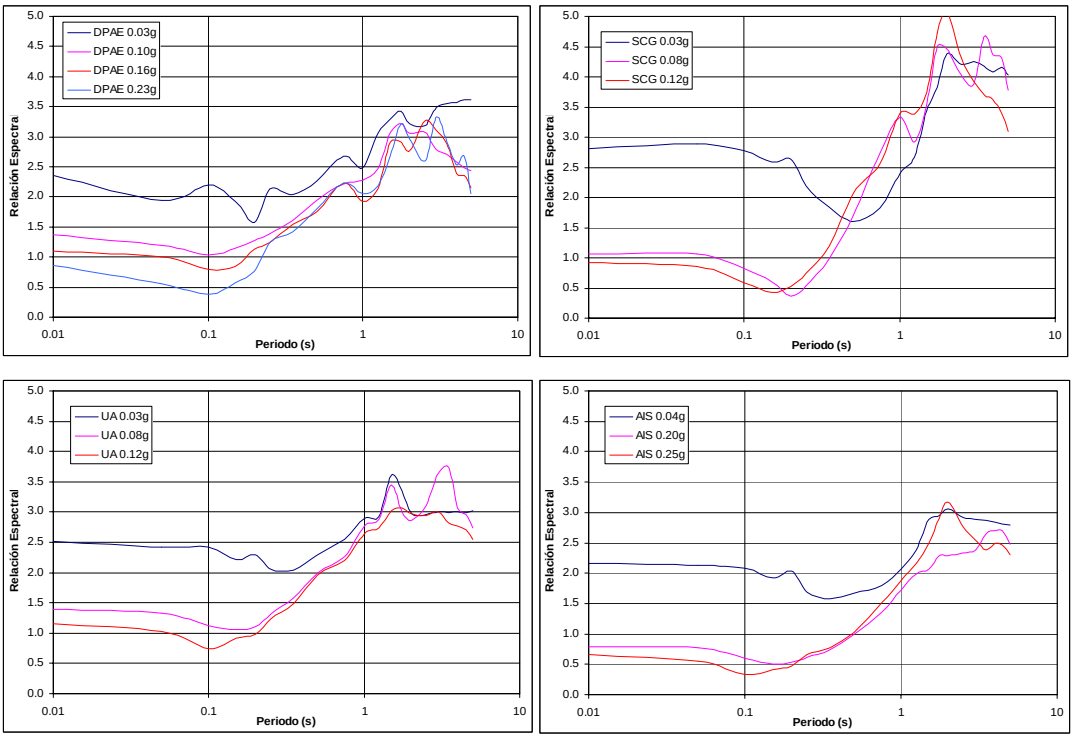


Figura 6.24. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 300

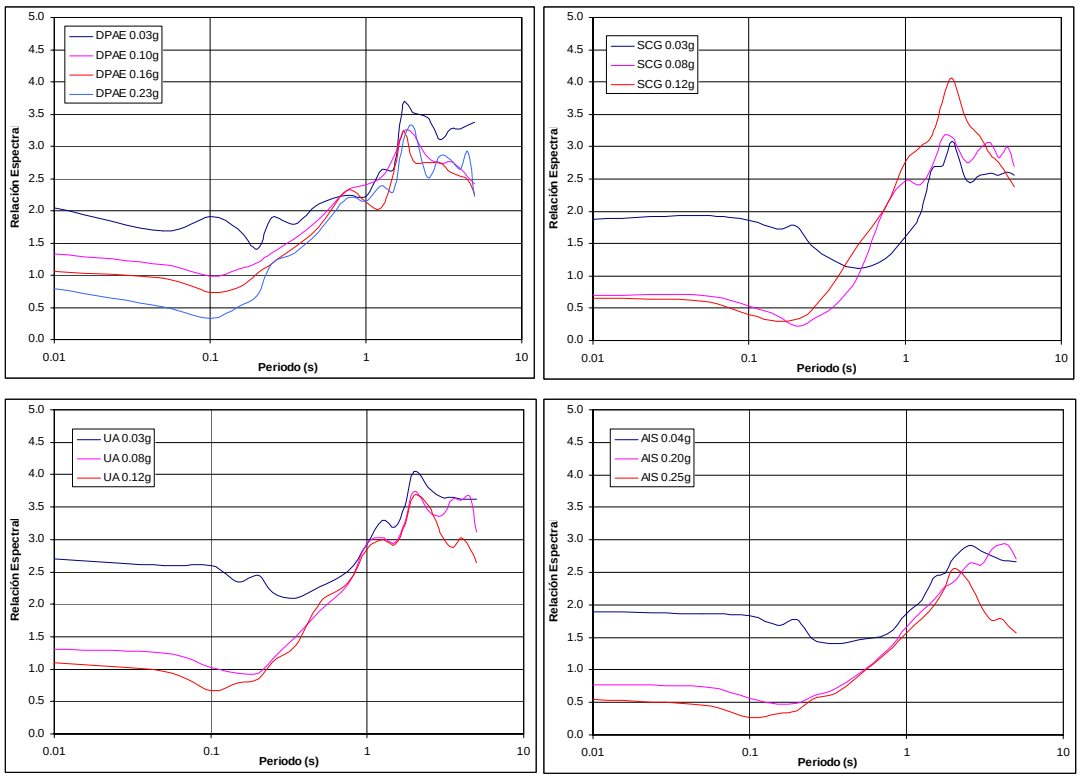


Figura 6.25. Relaciones espectrales promedio de Lacustre 500

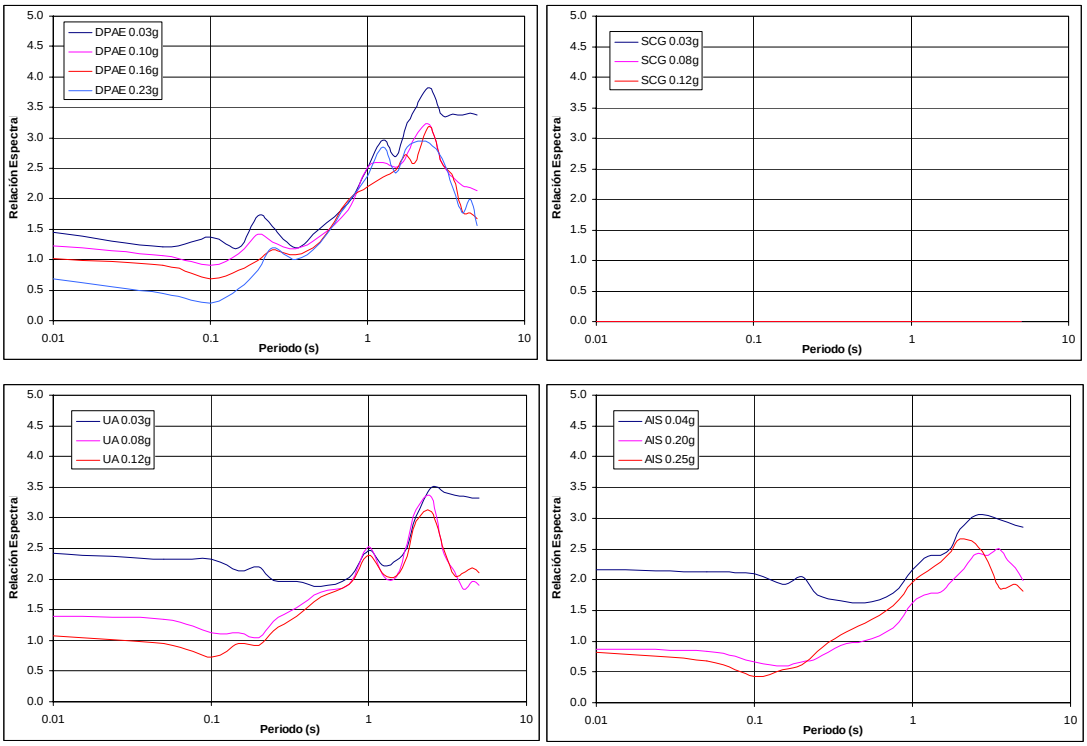


Figura 6.26. Relaciones espectrales promedio de Lacustre Aluvial 200

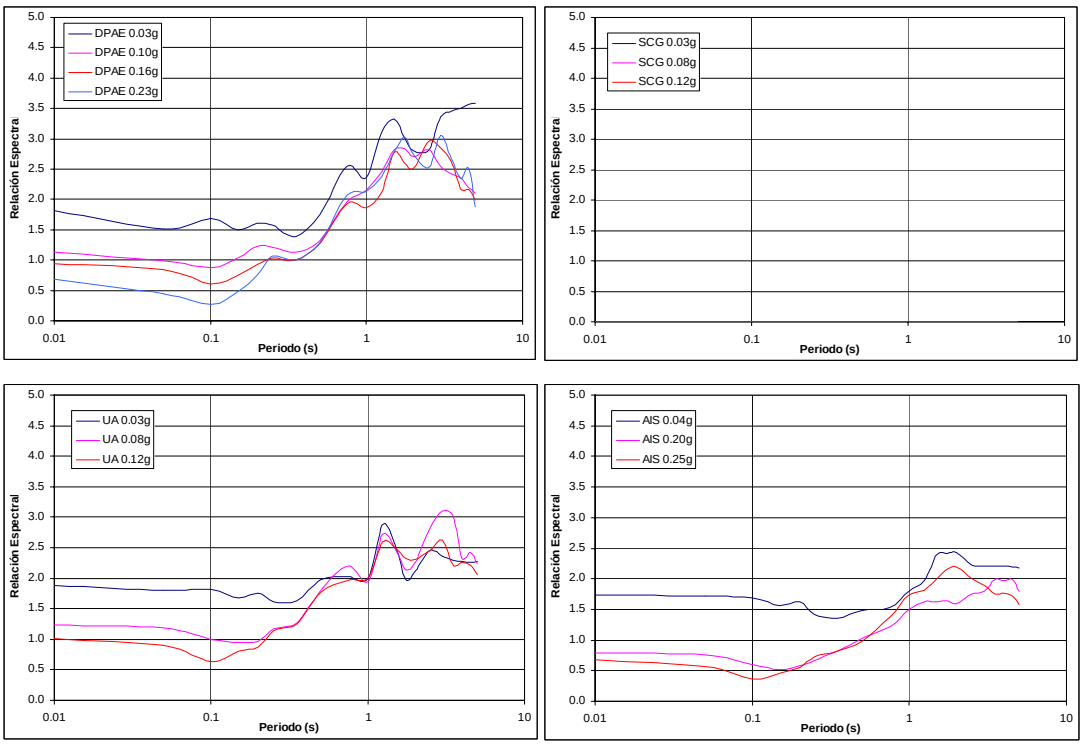


Figura 6.27. Relaciones espectrales promedio de Lacustre Aluvial 300

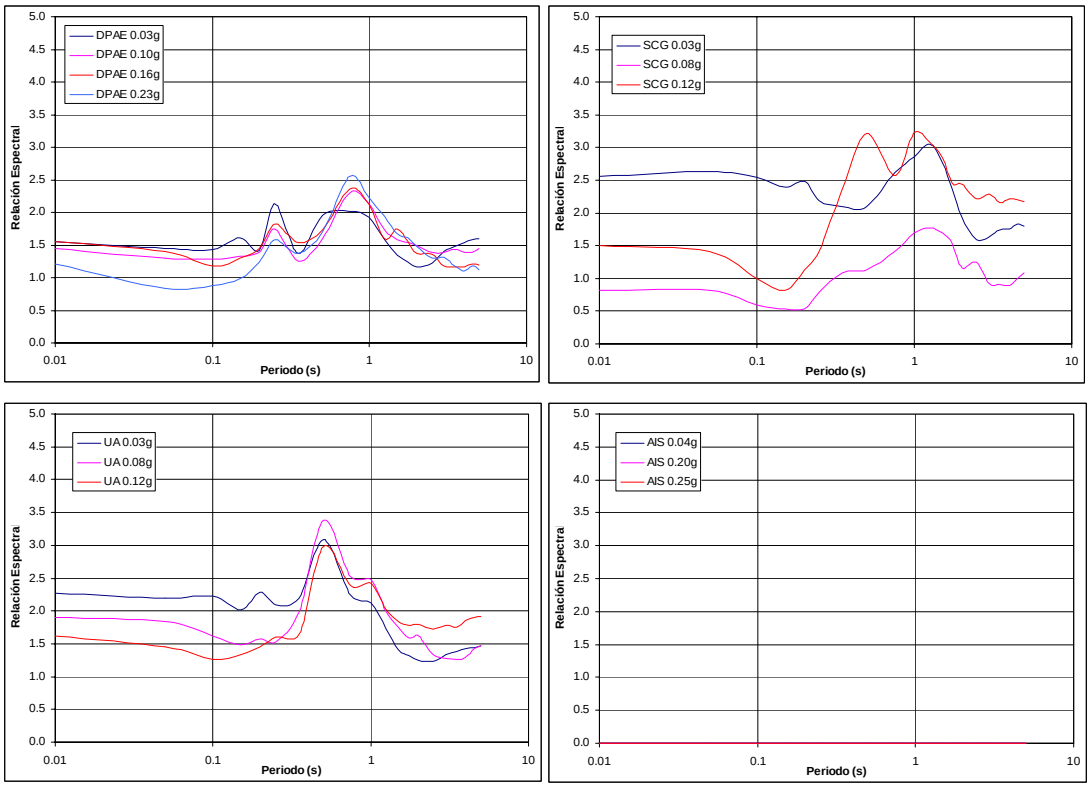


Figura 6.28. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 50

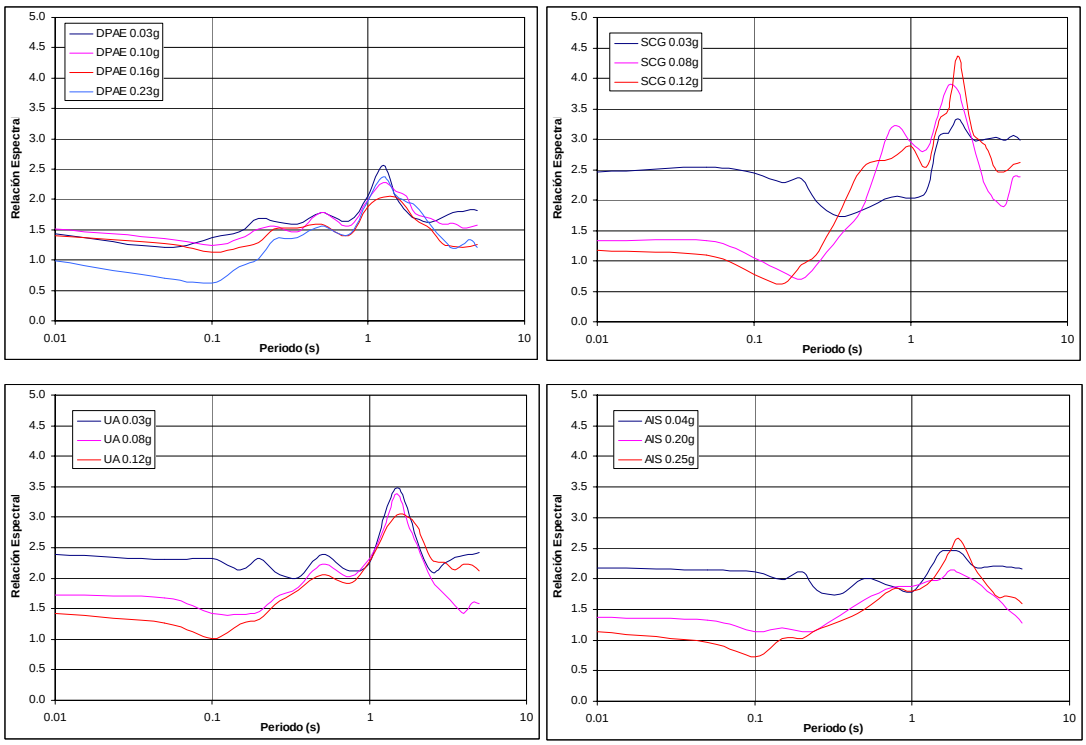


Figura 6.29. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 100

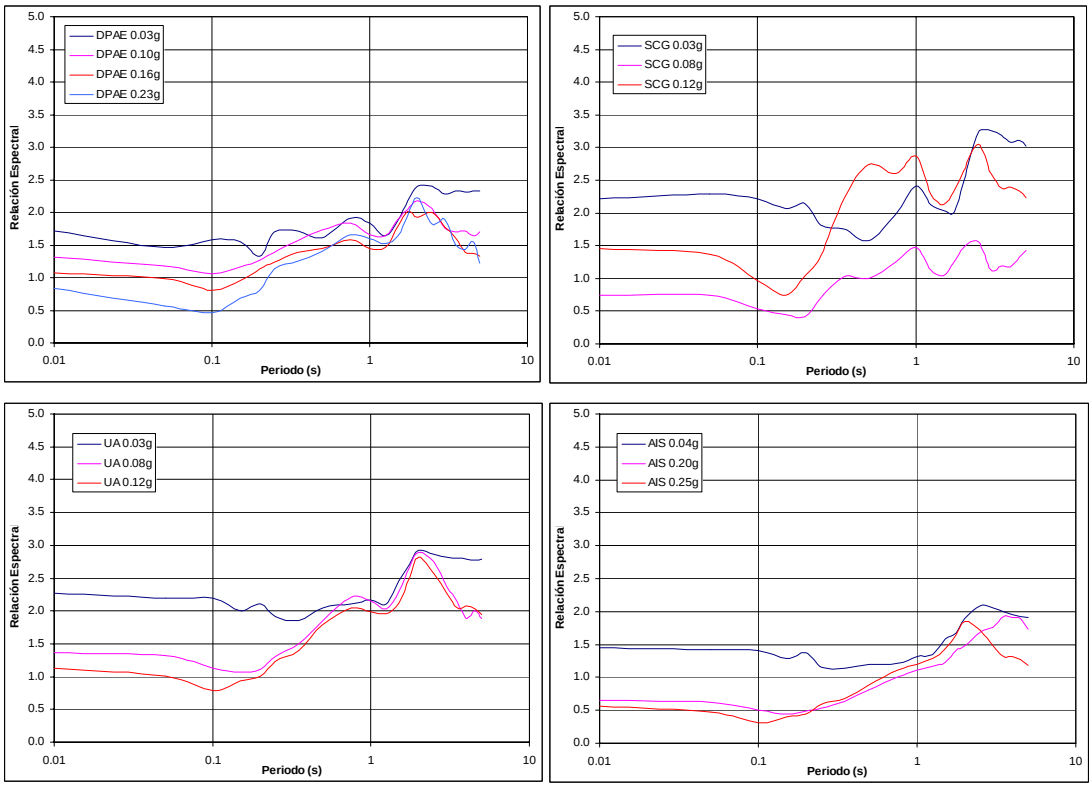


Figura 6.30. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 200

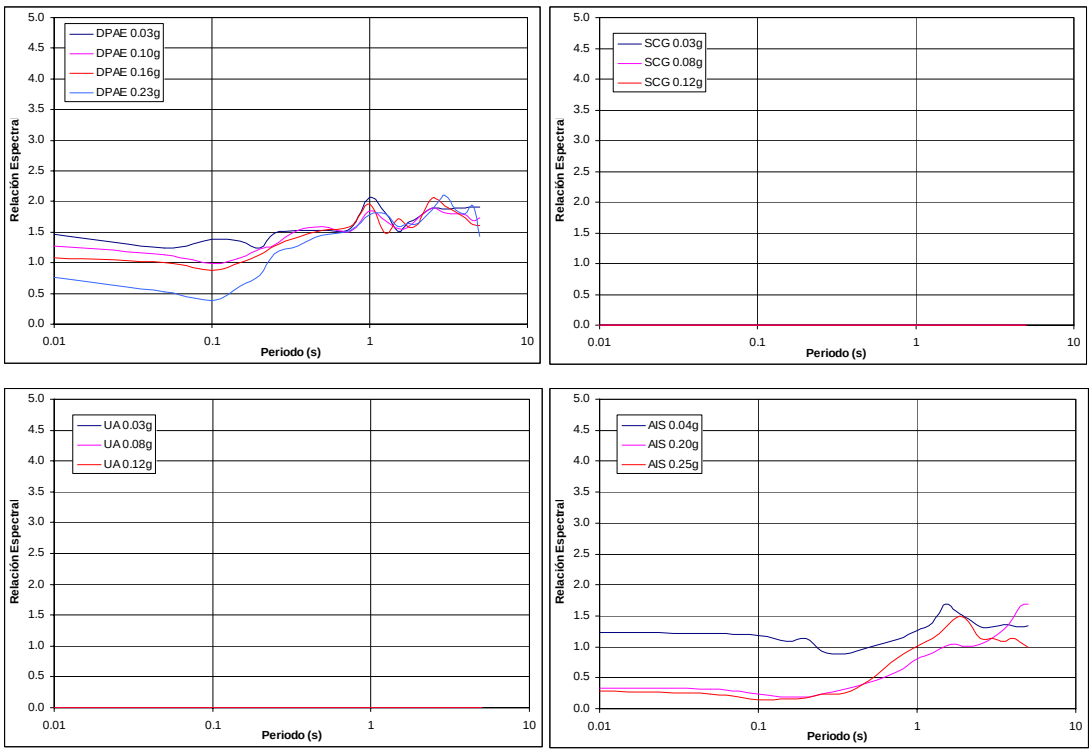


Figura 6.31. Relaciones espectrales promedio de Aluvial 300

CAPITULO 7

7 ZONIFICACIÓN Y ESPECTROS DE RESPUESTA

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos en la zonificación de la respuesta sísmica junto con los espectros de amenaza uniformes en superficie calculados para cada una de las zonas dispuestas en este documento y los factores de amplificación empleados para construir los espectros de diseño de edificaciones conforme lo solicita la NSR-10.

Inicialmente se presenta el mapa actualizado de la zonificación de respuesta sísmica junto con consideraciones generales a tener en cuenta para su alcance y espectros uniformes de respuesta en superficie. Posteriormente se hace una descripción de la forma espectral que define la NSR-10 para edificaciones y presentan los factores amplificación encontrados para cada una de las zonas de respuesta sísmica de la ciudad, y finalmente se hace una propuesta técnica para actualizar la normatividad vigente.

7.1 ZONIFICACIÓN DE RESPUESTA SÍSMICA

Con los resultados obtenidos en la modelación unidimensional y bidimensional, fueron reagrupados en las zonas de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá, por lo que de las 31 zonas geotécnicas para respuesta sísmica iniciales se simplificó para efectos de consideraciones de diseño a 15 zonas de respuesta sísmica homogénea y 1 zona de tratamiento especial. En general, se agruparon las subdivisiones geotécnicas (i.e. A, B y C) pero se conservaron las subdivisiones por la profundidad del depósito (i.e. 50 m, 100m, etc.).

7.1.1 Mapa de zonificación de respuesta sísmica

Se ilustra en la **Tabla 7.1** el identificador de cada zona, nombre, descripción geotécnica, espesor del depósito, intervalo de período fundamental del suelo y posibles efectos de sitio relacionados y en la **Figura 7.1**, se presenta anexo el Mapa de Zonificación de Respuesta Sísmica de la ciudad de Bogotá (**MAPA No 2**).

Zona	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción Geotécnica General	Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s)	Humedad Promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Cerro	-	< 0.3	Rocas sedimentarias y depósitos de ladera con espesores inferiores a 6 m	> 750	< 10	Topográfico
Piedemonte A	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con intercalaciones de arcillas blandas: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa, capas de arcillas blandas.	200 - 750	Oct-80	Topográfico, amplificación
Piedemonte B	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con espesor superior a 12 m: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa	300 - 750	Oct-30	Topográfico, amplificación
Piedemonte C	< 50	0.3-0.6				
Lacustre-50	< 50	1.0-1.5	Suelo lacustre blando: Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba	< 175	> 80	Amplificación
Lacustre-100	50-100	1.5-2.5				Amplificación
Lacustre-200	100-200	2.5-3.5				Amplificación
Lacustre-300	200-300	3.5-4.5				Amplificación
Lacustre-500	300-500	4.5-6.5				Amplificación
Lacustre Aluvial-200	100-200	2.0-3.0	Suelo lacustre con intercalaciones de aluvial: Arcillas limosas o limos arcillosos con de lentes de turba y capas de arenas compactas	< 200	> 60	Amplificación
Lacustre Aluvial-300	200-300	3.0-4.0				Amplificación
Aluvial-50	< 50	0.4-0.8	Suelo aluvial duro: Arcillas limosas o arenas arcillosos o limos arenosos, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias	175 - 300	25 - 50	Amplificación, licuación
Aluvial-100	50-100	0.8-1.2				Amplificación, licuación
Aluvial-200	100-200	1.2-2.5				Amplificación, licuación
Aluvial-300	200-300	2.5-4.0				Amplificación, licuación
Depósito Ladera	Jun-25	< 0.3	Depósitos de ladera con espesores superiores a 6 m de composición variable.	Variable según el tipo de deposito	Variable según el tipo de deposito	Topográfico

Tabla 7.1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica

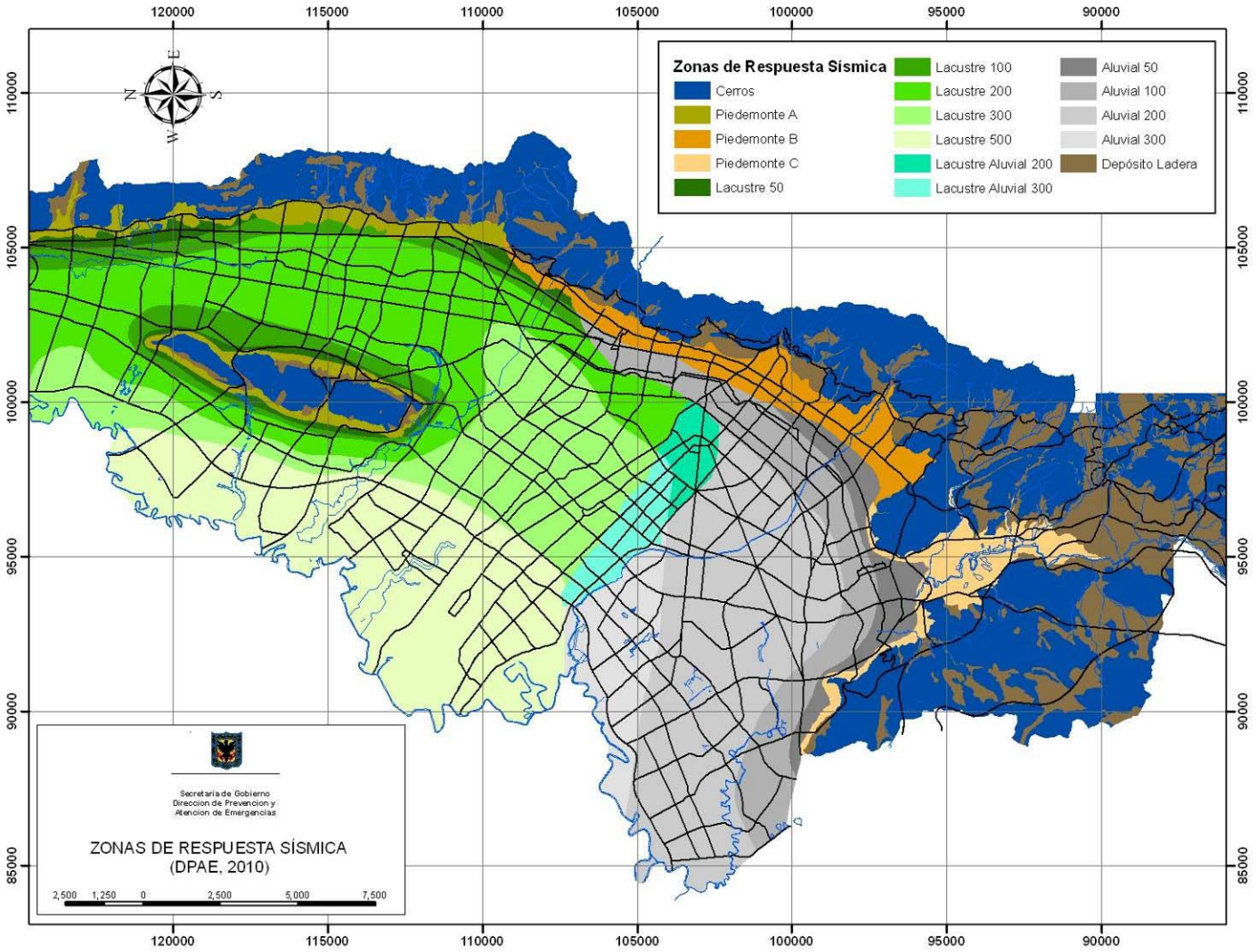


Figura 7.1. Mapa de zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá

7.1.2 Consideraciones generales

A continuación se listan las consideraciones especiales que se deben tener en cuenta para el uso del mapa de zonificación de efectos locales de la ciudad de Bogotá.

- Entre las zonas de piedemonte, lacustre y aluvial se definen franjas de transición de 100 m, tomando 50 m a cada lado de los límites establecidos, donde se toma como aceleración espectral de diseño la resultante del promedio de las zonas.

- En las zonas de cerros y piedemonte se debe consultar el mapa de amenaza por remoción en masa y dar cumplimiento a la normatividad vigente.

- En las zonas geotécnicas de conos aluviales y llanura de inundación se debe revisar el potencial de licuación y dar cumplimiento a la normatividad vigente.

- Se podrá reclasificar el sitio de estudio únicamente si se comprueba mediante un estudio geotécnico detallado que el perfil estratigráfico y la profundidad del basamento rocoso corresponden a la de otra zona, esta reclasificación es solamente válida para las zonas de transición o contiguas al sitio de interés.

- En la zona de piedemonte si se comprueba que el espesor de depósito es inferior a 6 m, penetrando mínimo 5 m en el estrato rocoso, se puede considerar como zona cerros.

- En los depósitos de ladera se deben considerar como la zona de piedemonte, a menos que se compruebe que el espesor es menor a 12 m, penetrando mínimo 5 m en el estrato rocoso, se puede tomar considerar como promedio entre la zona de cerros y piedemonte.

7.1.3 Espectros de respuesta uniformes en superficie

La respuesta sísmica en superficie se determinó como el producto espectral (periodo a periodo) de los espectros uniformes de amenaza en roca (obtenido del promedio más desviación estándar de los espectros de amenaza de IGM3, AIS Cambell y AIS Gallego) por las relaciones espectrales promedio (obtenidas a partir de todas las modelaciones) correspondiente al nivel de aceleración considerado.

Es importante mencionar que se optó por trabajar con los promedios de las relaciones espectrales de los sitios que están en la zona de estudio y la respuesta uniforme en superficie se calculo tomando el promedio más desviación estándar de los espectros uniformes en superficie de los sitios que están en la zona de estudio.

De la **Figura 7.2** a la **Figura 7.5** se ilustran los espectros uniformes de respuesta en superficie para aceleraciones máximas (Am) de 0.22, 0.15, 0.13, 0.06 y 0.04 g. Los resultados presentados corresponden a un 5% de amortiguamiento (D).

La respuesta sísmica de la zona Depósito Ladera es variable según el tipo de depósito y espesor del mismo, para no dejar esta amplia zona de cerros de la ciudad sin espectro de respuesta se recomienda trabajar por lo menos con el promedio entre cerros y el piedemonte más cercano.

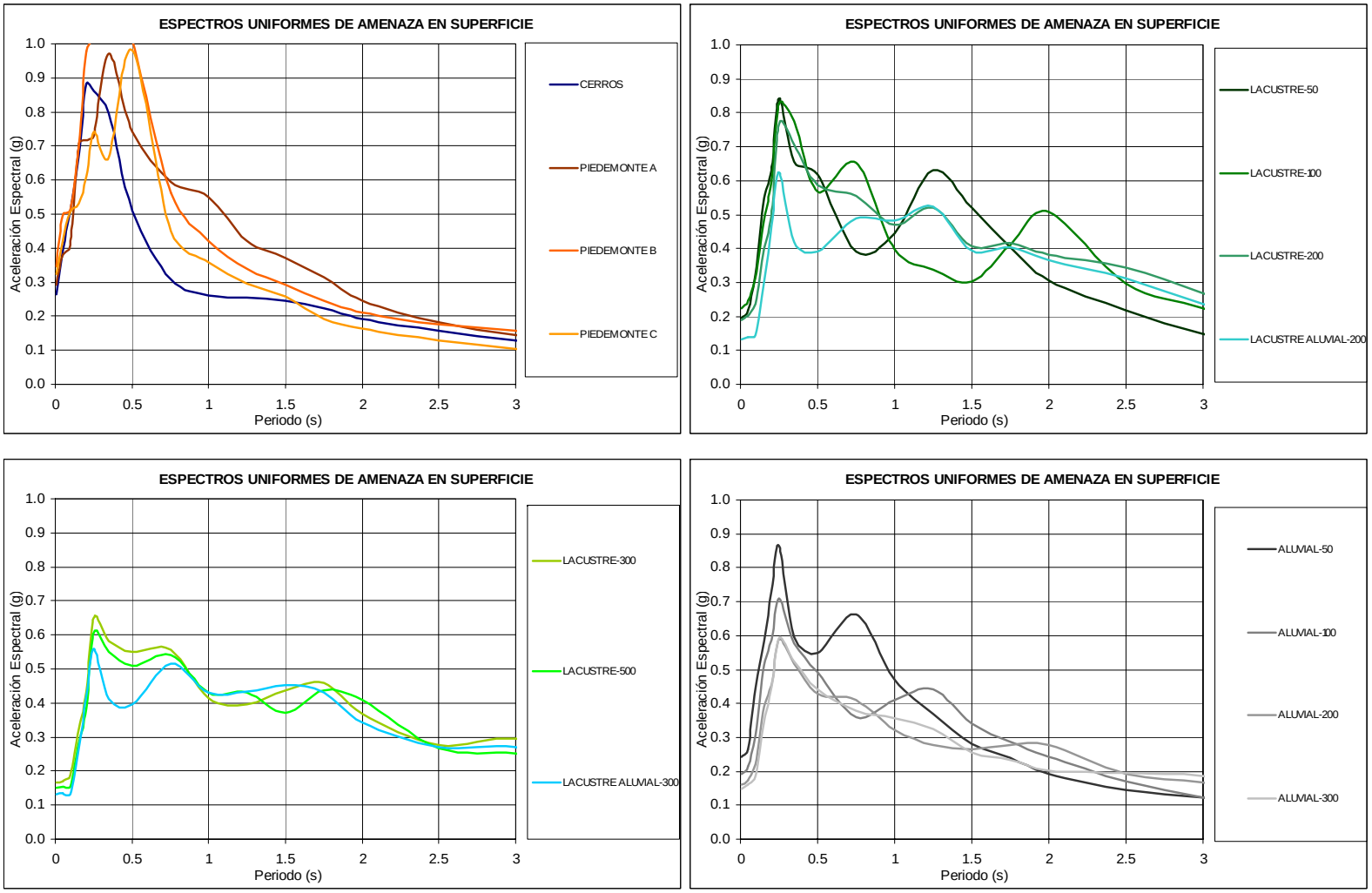


Figura 7.2. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.22, D=5%

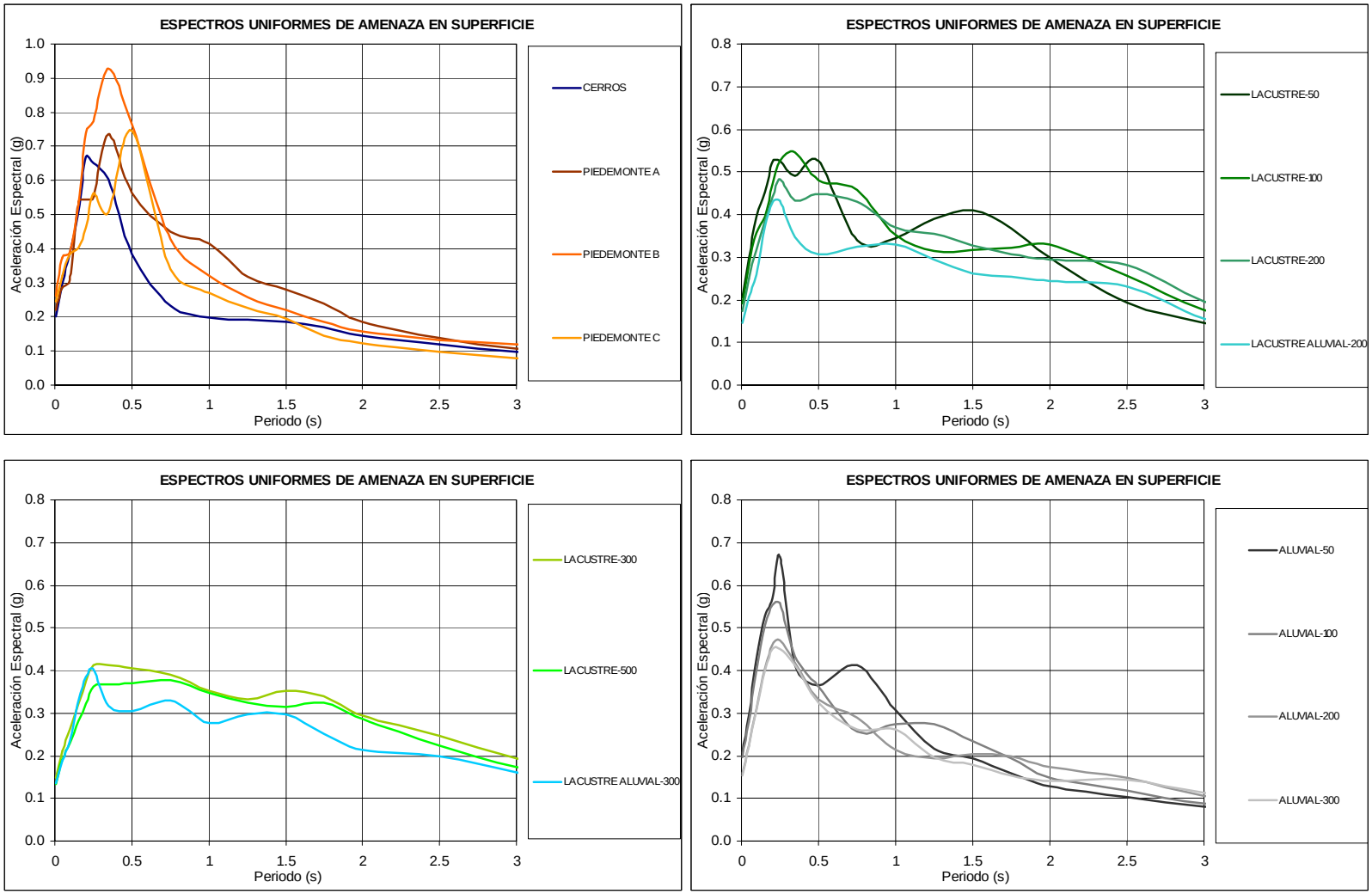


Figura 7.3. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.15, D=5%

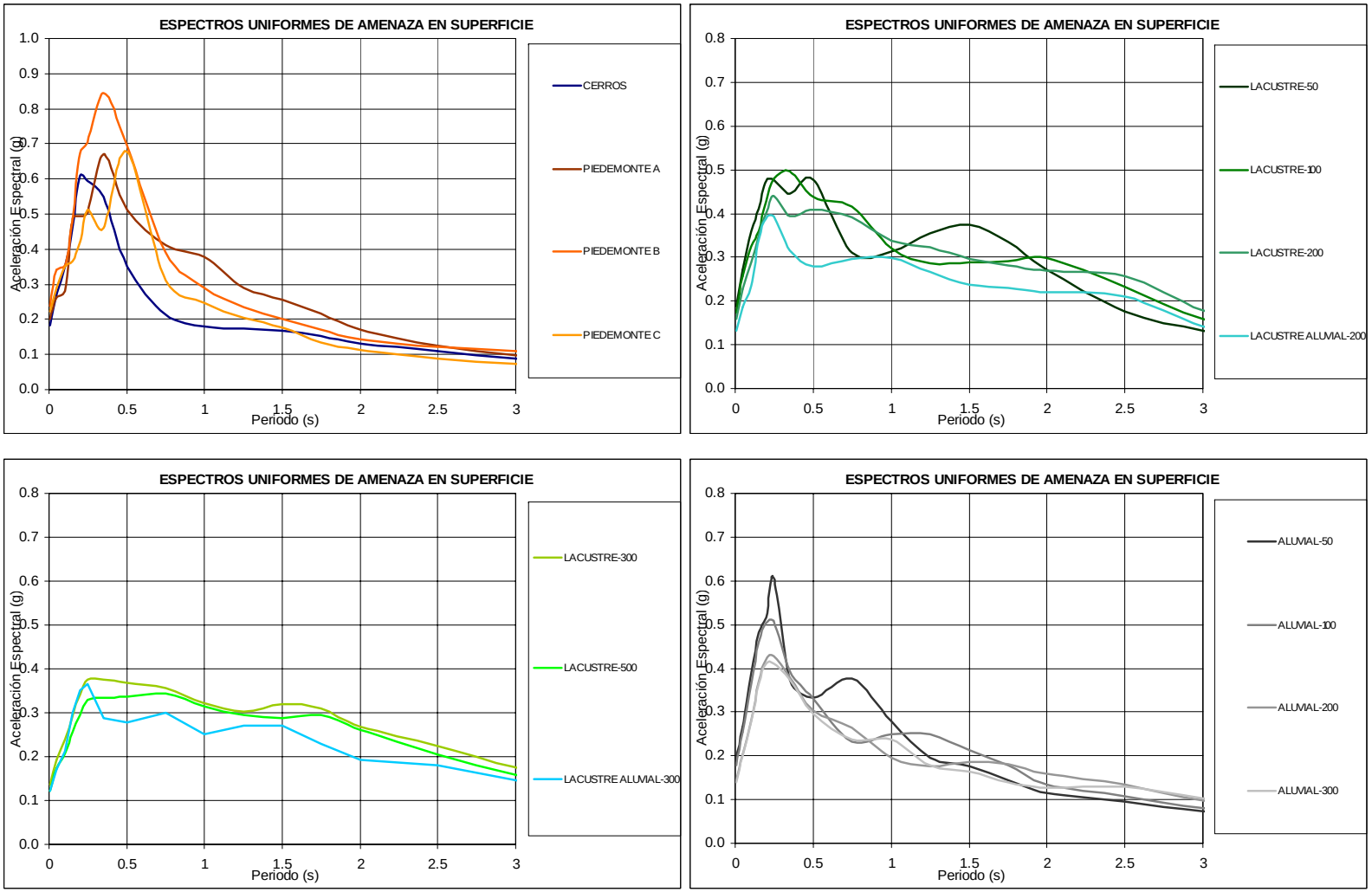


Figura 7.4. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.13, D=5%

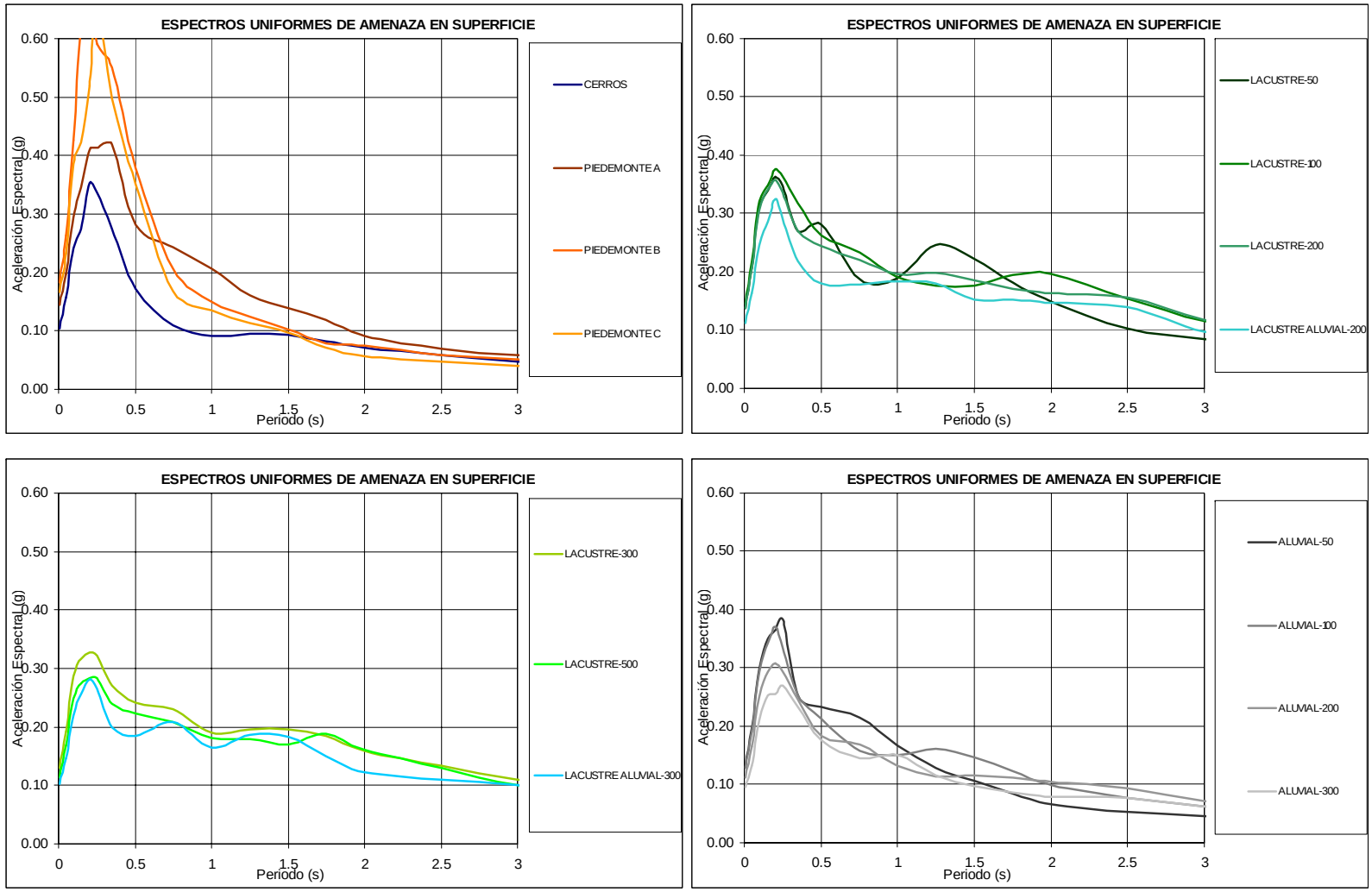


Figura 7.5. Espectro Uniformes de Amenaza en superficie para Aa = 0.06, D=5%

7.2 PARÁMETROS REQUERIDOS POR LA NSR-10

El reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 que corresponde a la segunda actualización de la reglamentación sismo resistente nacional, propone tres diferentes espectros de diseño.

El primer espectro propuesto es el espectro de diseño para edificaciones. Este espectro de tipo elástico expresado en términos de la aceleración (Sa) y del período espectral (T), fue concebido para un amortiguamiento del 5% y para una probabilidad de excedencia de 10% en un lapso de 50 años lo cual corresponde a un período de retorno de 475 años. Los parámetros fundamentales en este caso son la Aa que es la aceleración pico efectiva para diseño y el Av que representa la velocidad horizontal pico efectiva.

El segundo espectro es el espectro de seguridad limitada el cual se refiere al caso de intervención de estructuras de edificaciones que deben ser reforzadas. Este segundo espectro esta definido para una probabilidad de excedencia de 20% en un lapso de 50 años que corresponde a un período de retorno de 225 años y adicionalmente se encuentra definido por el parámetro Ae que es la aceleración pico reducida.

El tercer espectro propuesto es el espectro de umbral de diseño que corresponde al espectro utilizado para edificaciones calificables dentro del grupo III y IV de la NSR-10. Este espectro es un espectro elástico establecido para un amortiguamiento crítico de 2%, corresponde a un periodo de retorno de 31 años y está definido mediante Ad que es la aceleración pico al nivel del umbral de daño.

Es importante mencionar que los parámetros que a continuación se presentan se deben emplear únicamente para fines de diseño de edificaciones, puesto que los factores de amplificación calculados solamente se pueden aplicar a las formulaciones dadas en la NSR-10.

7.2.1 Espectros de diseño para edificaciones nuevas

Para la construcción de estos espectros se empleará la forma espectral de la **Figura 7.6** con los factores de amplificación que se resumen en la **Tabla 7.2**, además se presentan los valores de aceleración máxima en superficie Ao. De la **Figura 7.7** a **Figura 7.10** se ilustran las formas espectrales obtenidas junto con los espectros uniformes de amenaza en superficie y los espectros de referencia de la NSR-10 para un perfil tipo B y un perfil tipo E, todos para un amortiguamiento del 5%.

Es importante mencionar que los factores de amplificación se han ajustado de manera tal que sean valores con una decimal y que con respecto a las zonas contiguas se guarde la gradualidad en la respuesta consistente con las medicines, es decir que los cambios bruscos de una zona a otra no existen, excepto entre cerros y piedemonte que es marcado por la geología.

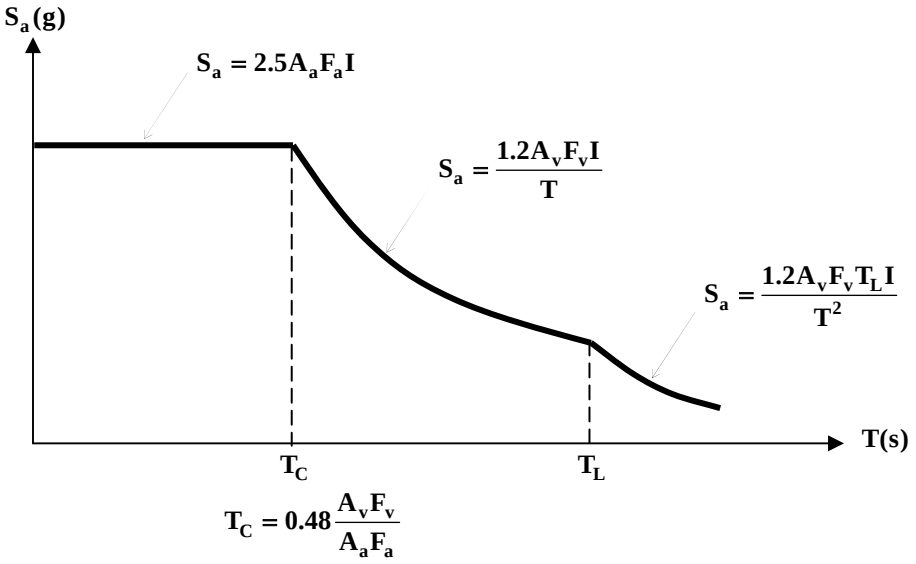


Figura 7.6. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico

Zona	Fa475 D=5%	Fv475 D=5%	Ao475 (g)	Tl (s)
CERROS	1.35	1.30	0.18	3.0
PIEDEMONTE A	1.65	2.00	0.22	3.0
PIEDEMONTE B	1.95	1.70	0.26	3.0
PIEDEMONTE C	1.80	1.70	0.24	3.0
LACUSTRE-50	1.40	2.90	0.21	4.0
LACUSTRE-100	1.30	3.20	0.20	4.0
LACUSTRE-200	1.20	3.50	0.18	4.0
LACUSTRE-300	1.05	2.90	0.16	5.0
LACUSTRE-500	0.95	2.70	0.14	5.0
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.10	2.80	0.17	4.0
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.00	2.50	0.15	5.0
ALUVIAL-50	1.35	1.80	0.20	3.5
ALUVIAL-100	1.20	2.10	0.18	3.5
ALUVIAL-200	1.05	2.10	0.16	3.5
ALUVIAL-300	0.95	2.10	0.14	3.5
DEPOSITO LADERA	1.65	1.70	0.22	3.0

Tabla 7.2. Parámetros Ao, Fa y Fv para espectro de diseño

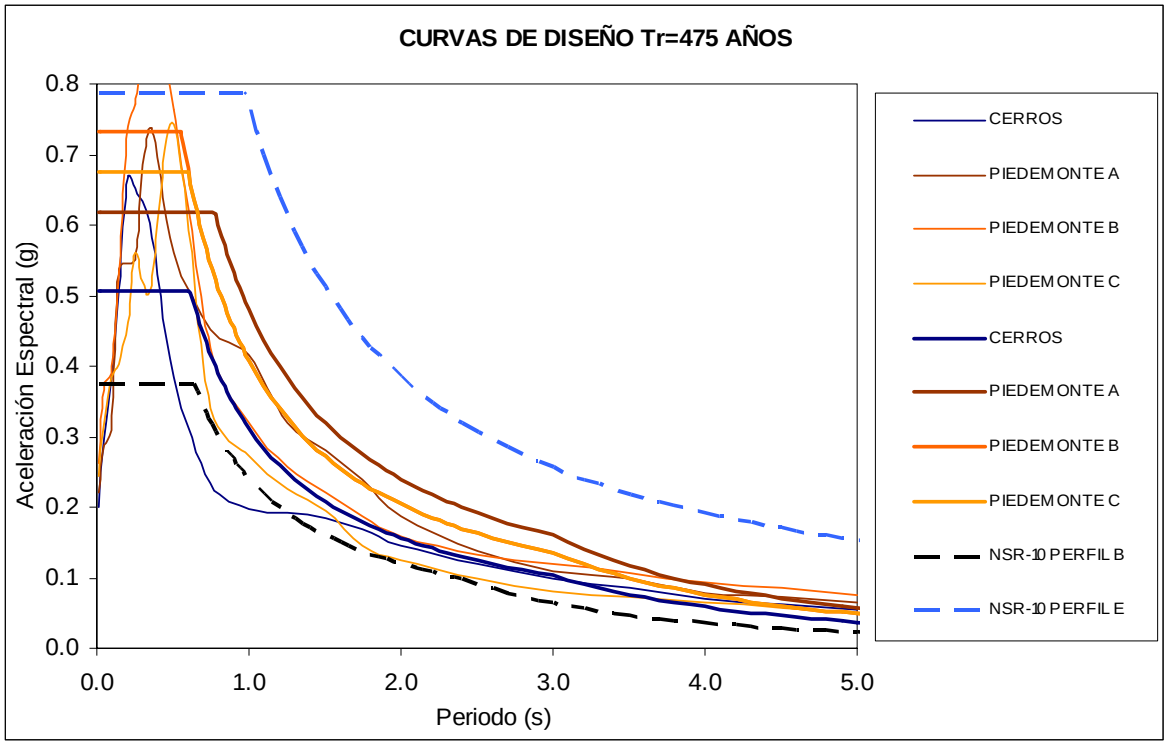


Figura 7.7. Espectro de diseño de la zona Cerros y Piedemontes

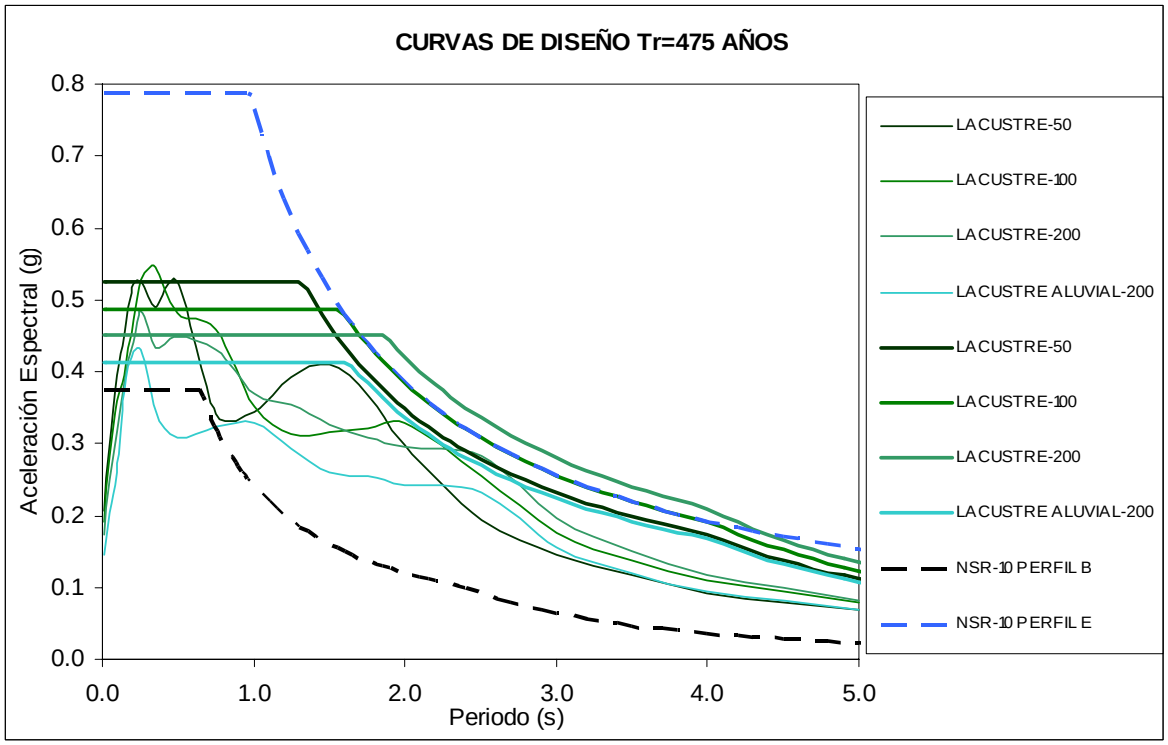


Figura 7.8. Espectro de diseño de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m

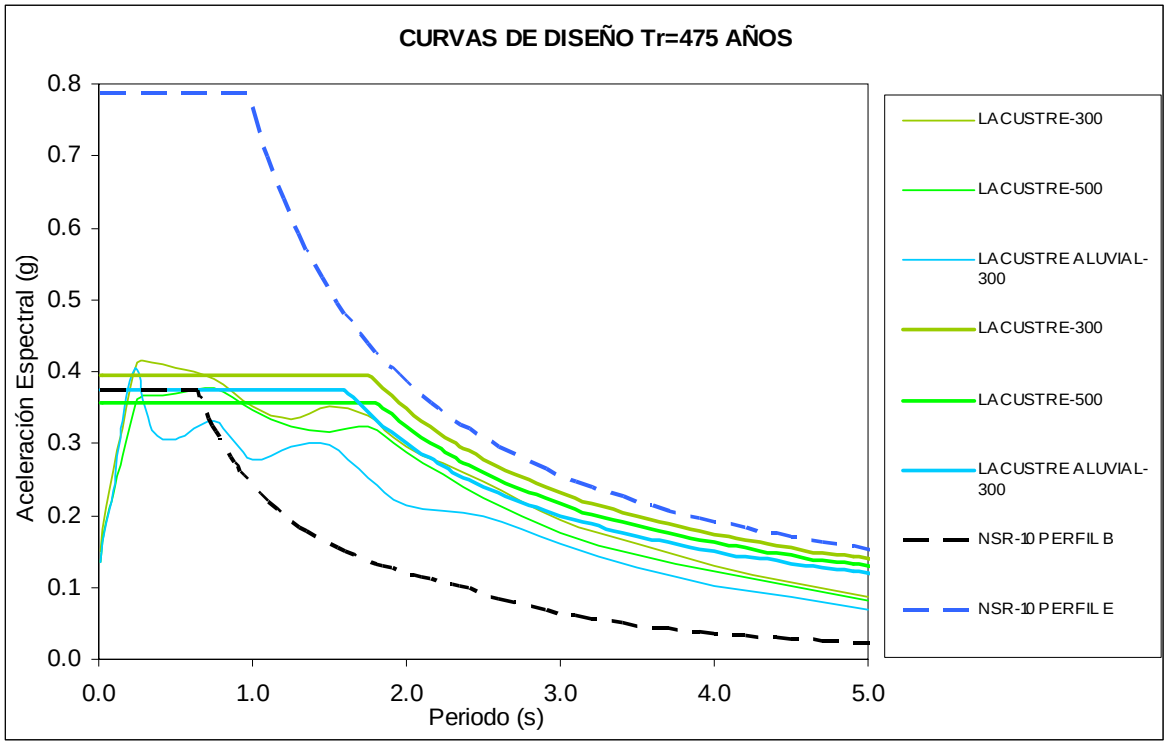


Figura 7.9. Espectro de diseño de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial de más de 200 m

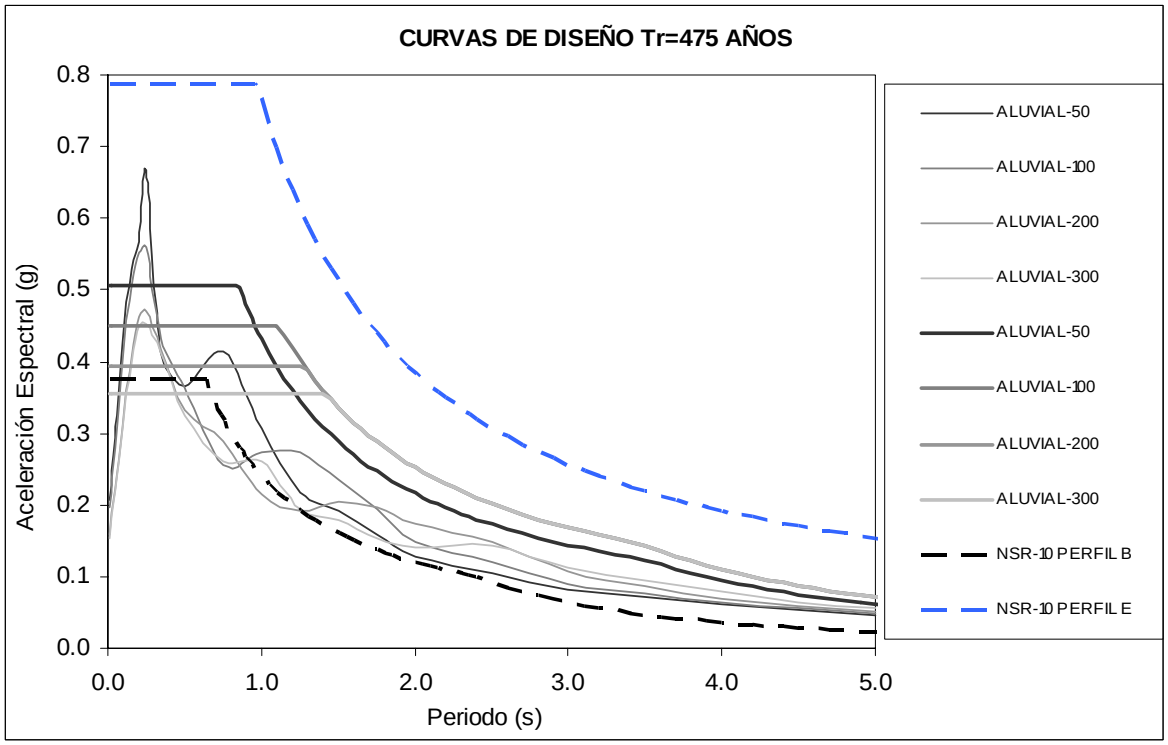


Figura 7.10. Espectro de diseño de las zonas Aluviales

7.2.2 Espectros de diseño de seguridad limitada

Este tipo de espectros son concebidos para una probabilidad de excedencia de 20% para un lapso de 50 años, es decir para un periodo de retorno de 225 años y son dados en función de la aceleración pico reducida Ae. Los valores de Ae se encuentran consignados en las tablas A.10.3-1 y A.10.3-2 y la Figura A.10.3-1 de la NSR-10.

La forma del espectro de seguridad limitada corresponde a la **Figura 7.11** y en la **Tabla 7.3** se resumen los parámetros espectrales para la construcción y de la **Figura 7.12** a **Figura 7.15** se presentan las respectivas formas espectrales junto con los espectros uniformes de amenaza en superficie y los espectros de referencia de la NSR-10 para un perfil tipo B y un perfil tipo E, todos para un amortiguamiento del 5%.

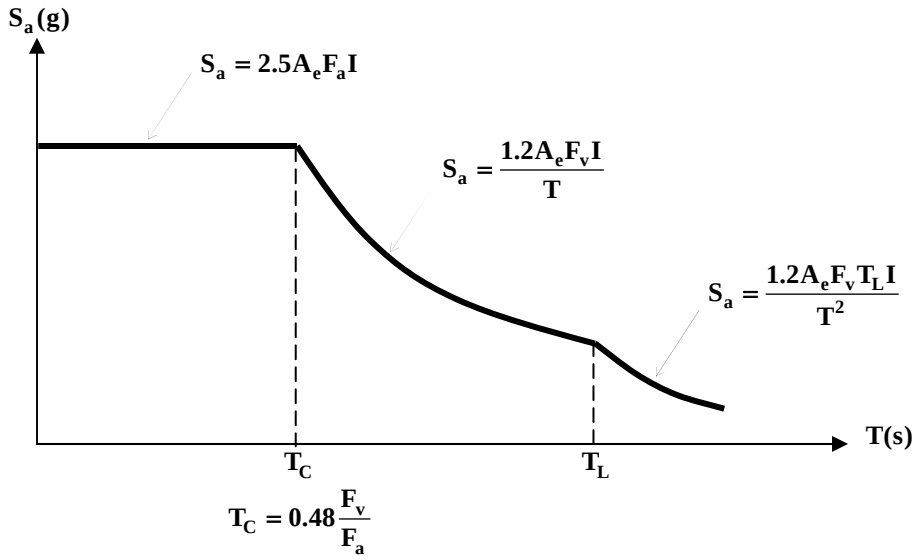


Figura 7.11. Curva de seguridad limitada para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico

Zona	Fa225 D=5%	Fv225 D=5%	Ao225 (g)	Tl (s)
CERROS	1.40	1.50	0.16	3.0
PIEDEMONTE A	1.70	2.35	0.20	3.0
PIEDEMONTE B	2.00	1.95	0.23	3.0
PIEDEMONTE C	1.85	1.95	0.22	3.0
LACUSTRE-50	1.45	3.40	0.19	4.0
LACUSTRE-100	1.35	3.70	0.18	4.0
LACUSTRE-200	1.25	4.00	0.16	4.0
LACUSTRE-300	1.10	3.40	0.14	5.0
LACUSTRE-500	1.00	3.10	0.13	5.0
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.15	3.20	0.15	4.0
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.05	2.90	0.14	5.0
ALUVIAL-50	1.40	2.10	0.18	3.5
ALUVIAL-100	1.25	2.50	0.16	3.5
ALUVIAL-200	1.10	2.50	0.14	3.5
ALUVIAL-300	1.00	2.50	0.13	3.5
DEPOSITO LADERA	1.70	1.95	0.20	3.0

Tabla 7.3. Parámetros Fa y Fv para espectro de seguridad limitada

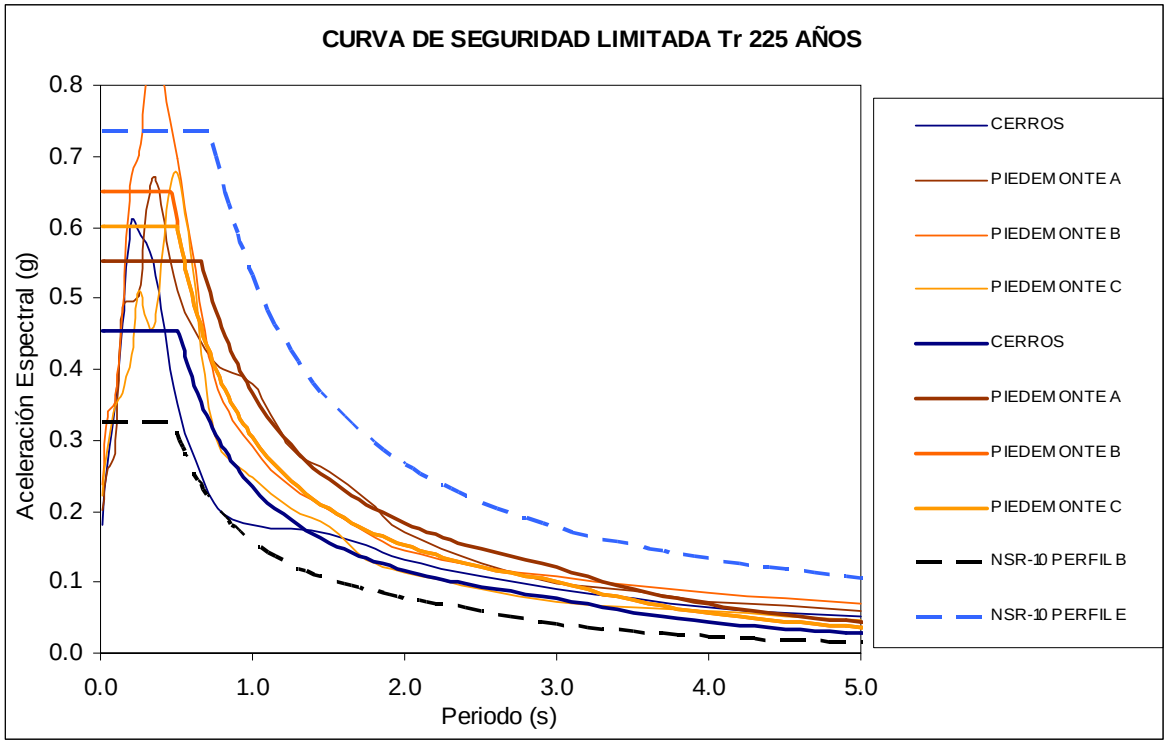


Figura 7.12. Espectro de seguridad limitada de la zona Cerros y Piedemontes

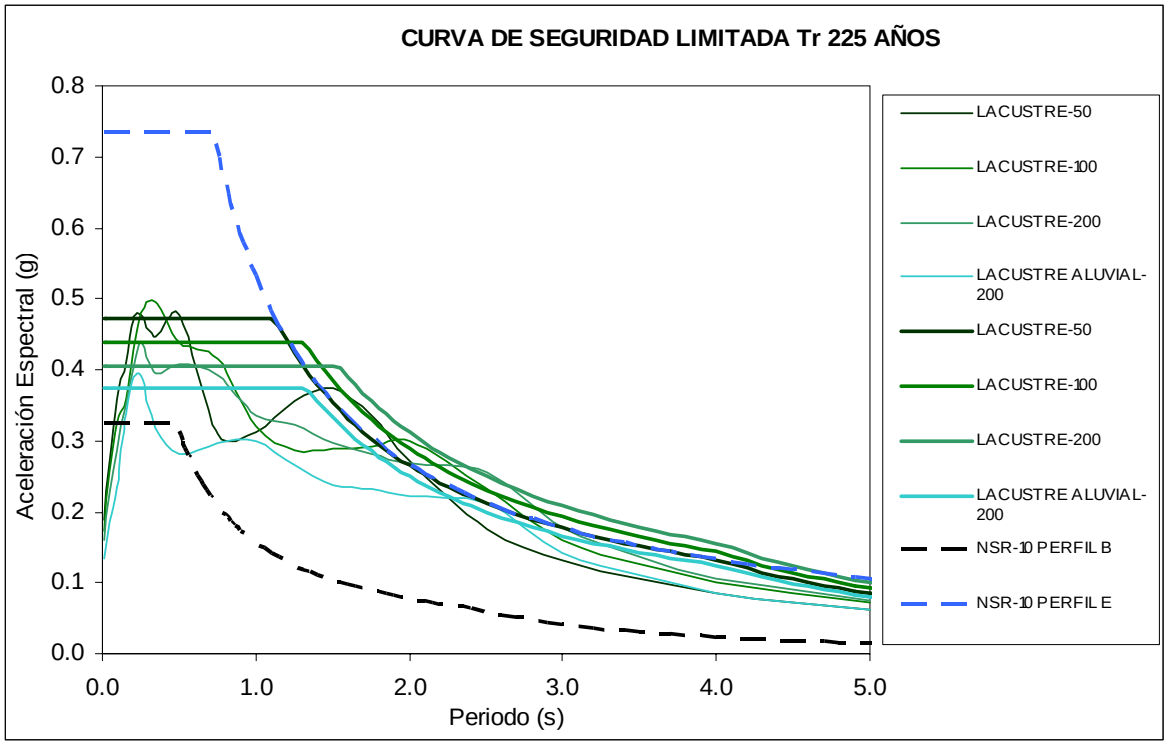


Figura 7.13. Espectro de seguridad limitada de las zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m

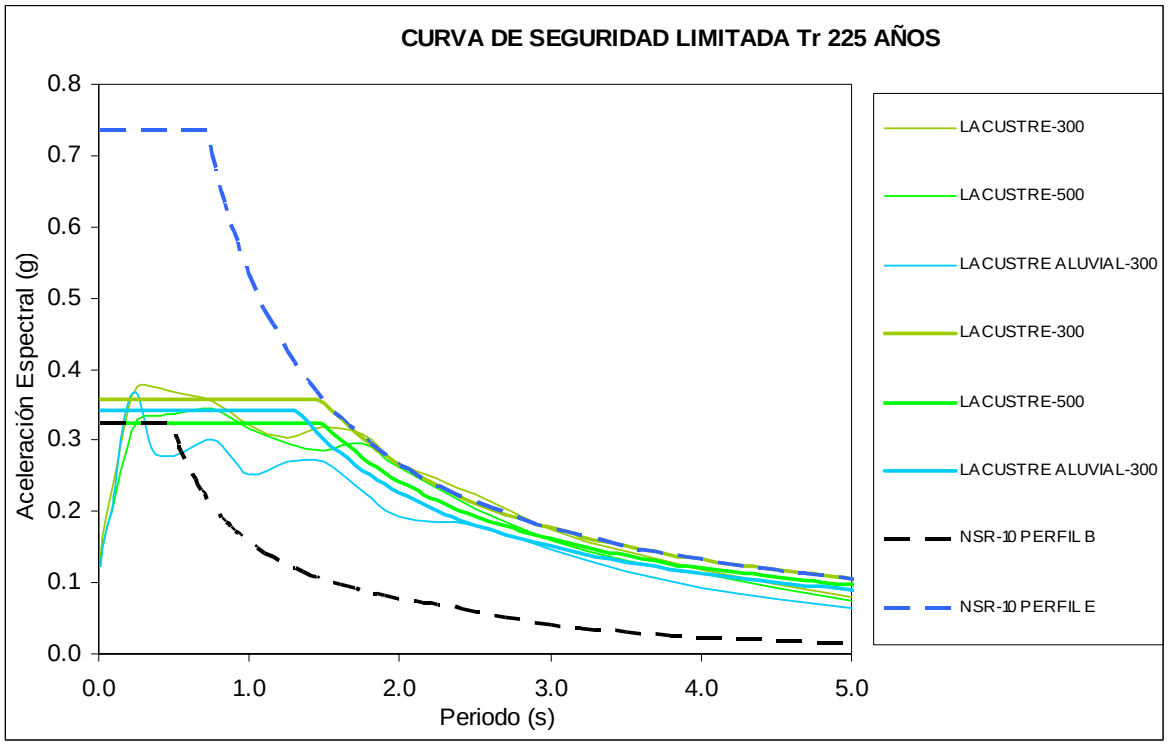


Figura 7.14. Espectro de seguridad limitada de las zonas Lacustre-Aluvial de más de 200 m

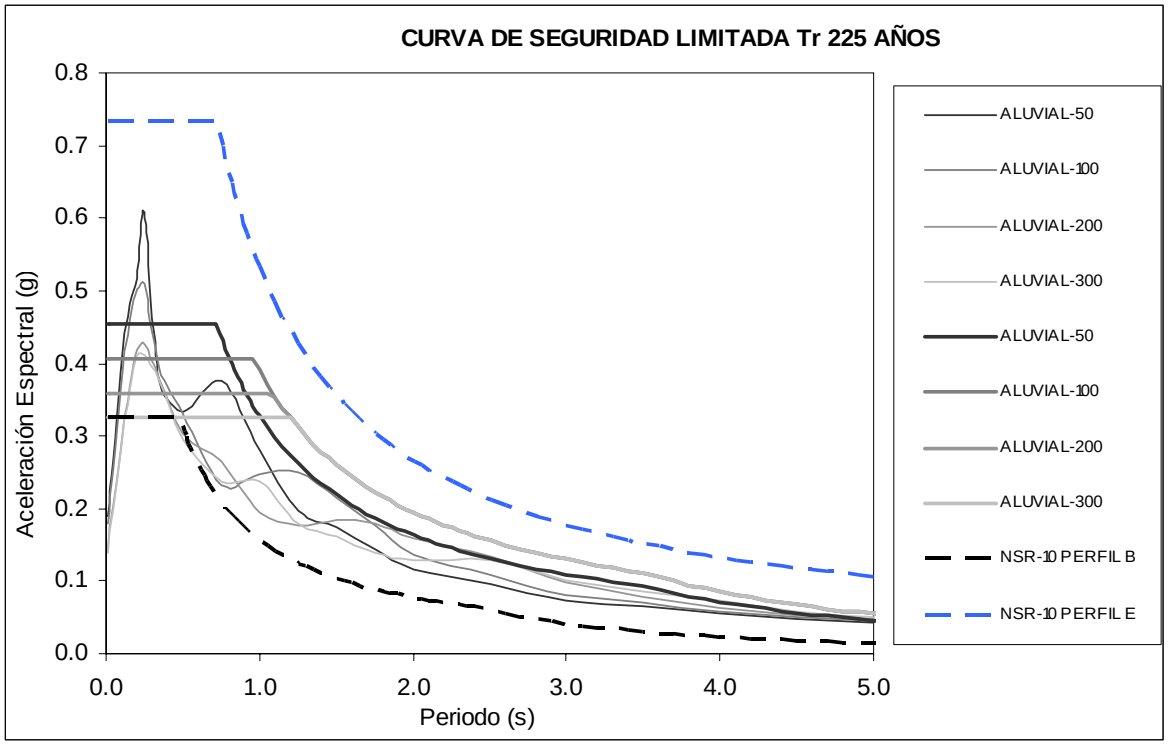


Figura 7.15. Espectro de seguridad limitada de las zonas Aluviales

7.2.3 Espectro de diseño de umbral de daño

Estos espectros son concebidos para una probabilidad de excedencia de 80% para un lapso de 50 años, que corresponde a un período de retorno de 31 años y son dados en función de la aceleración pico efectiva al nivel del umbral de daño, A_d. Los valores de A_d se encuentran consignados en las tablas A.12.2-1 y A.12.2-2 y la Figura A.12.2-1 de la NSR-10.

Para la construcción de estos espectros se empleará la forma espectral de la **Figura 7.16**. En la **Tabla 7.4** se resumen los parámetros espectrales para la construcción y de la **Figura 7.17** a la **Figura 7.20** se muestran las formas espectrales junto con los espectros uniformes de amenaza en superficie y los espectros de referencia de la NSR-10 para un perfil tipo B y un perfil tipo E, todos para un amortiguamiento del 2%.

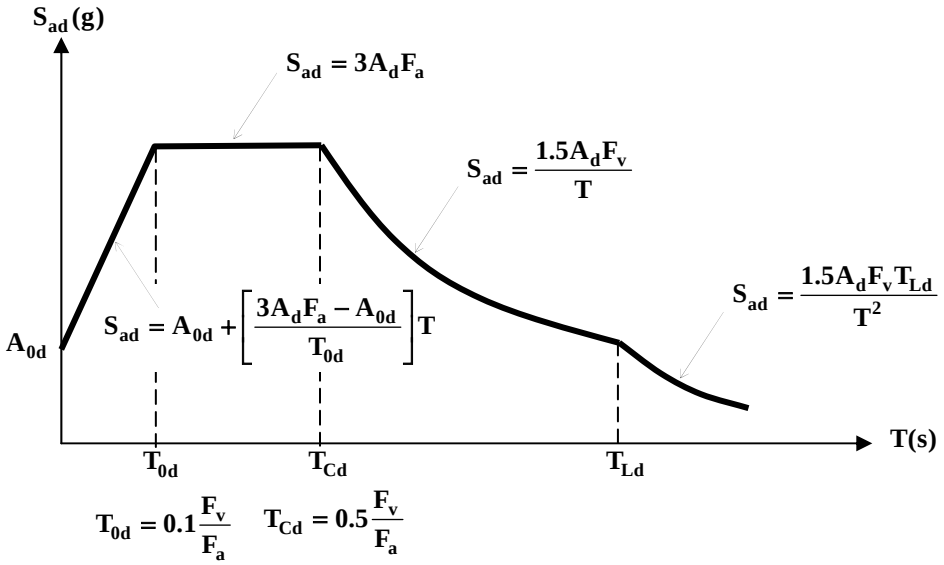


Figura 7.16. Curva de umbral de daño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 2% del crítico

Zona	Fa31 D=5%	Fv31 D=5%	Ao31 (g)	Tl (s)
CERROS	1.50	1.70	0.08	3.0
PIEDEMONTE A	1.90	2.75	0.10	3.0
PIEDEMONTE B	2.20	2.25	0.12	3.0
PIEDEMONTE C	2.05	2.25	0.11	3.0
LACUSTRE-50	1.55	4.00	0.09	4.0
LACUSTRE-100	1.45	4.40	0.09	4.0
LACUSTRE-200	1.35	4.75	0.08	4.0
LACUSTRE-300	1.25	4.00	0.08	5.0
LACUSTRE-500	1.10	3.75	0.07	5.0
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.30	3.85	0.08	4.0
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.20	3.50	0.07	5.0
ALUVIAL-50	1.50	2.50	0.09	3.5
ALUVIAL-100	1.40	2.90	0.08	3.5
ALUVIAL-200	1.20	2.90	0.07	3.5
ALUVIAL-300	1.10	2.90	0.07	3.5
DEPOSITO LADERA	1.90	2.25	0.10	3.0

Tabla 7.4. Parámetros Fa y Fv para espectro de umbral de daño

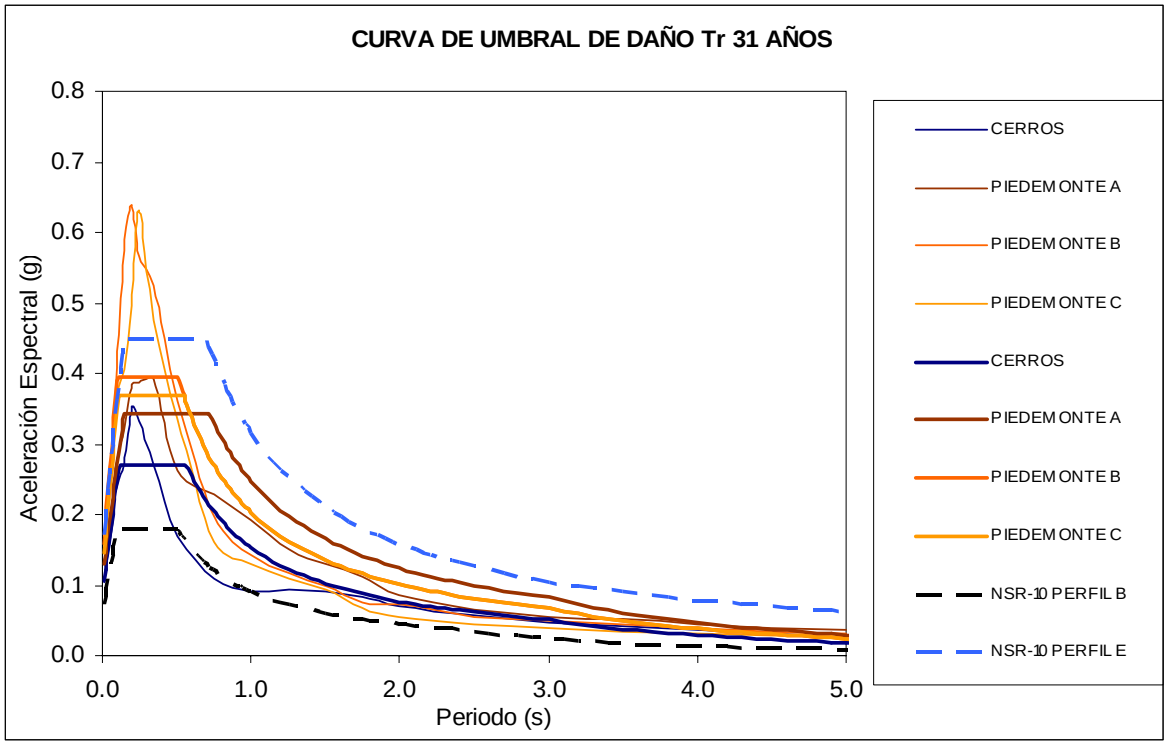


Figura 7.17. Espectro de umbral de daño de la zona Cerros y Piedemontes

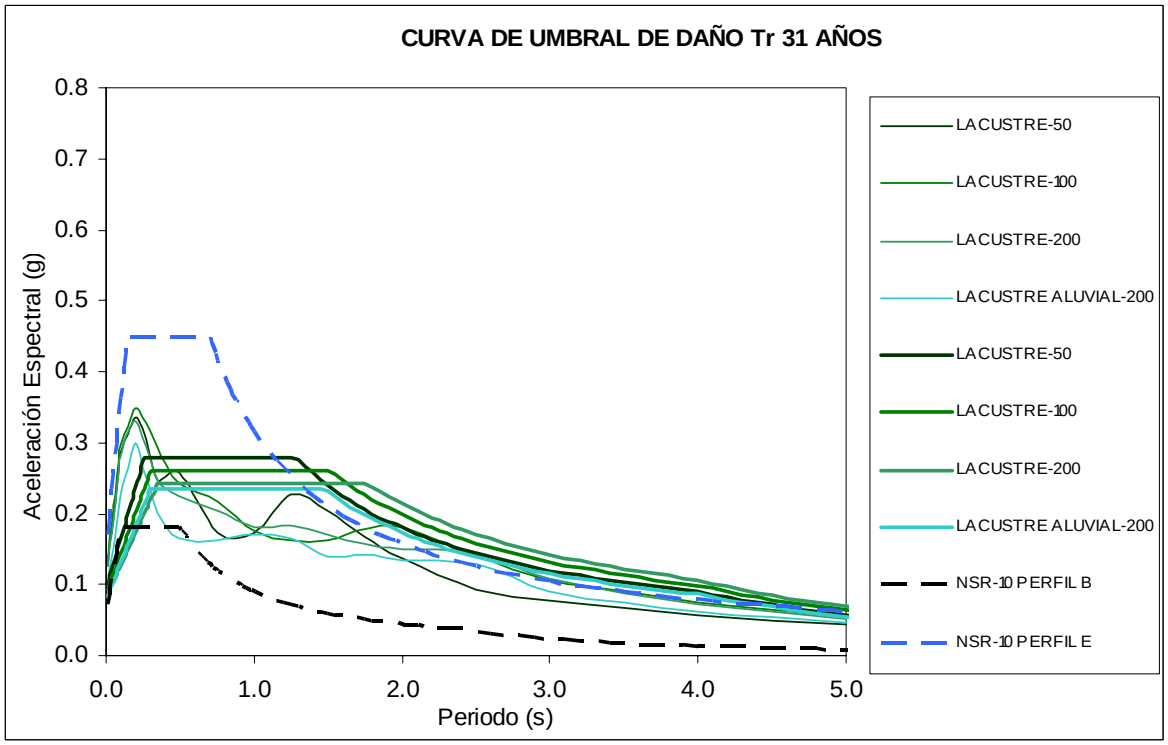


Figura 7.18. Espectro de umbral de daño zonas Lacustre y Lacustre-Aluvial hasta 200 m

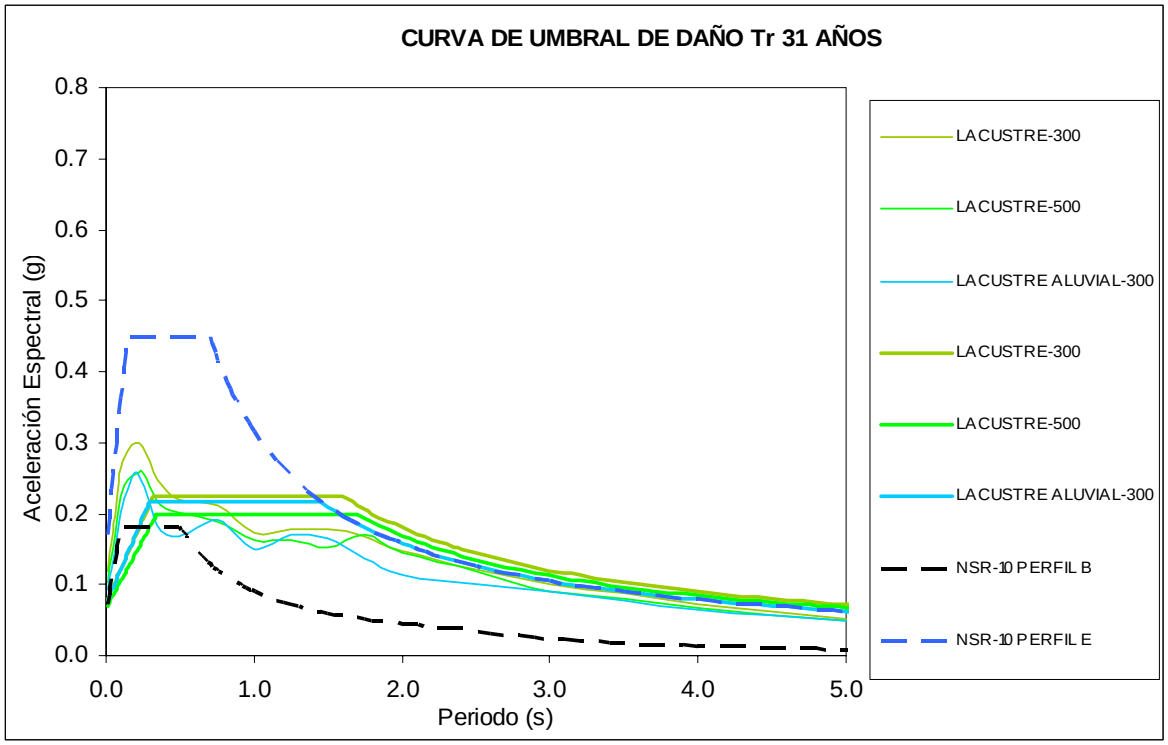


Figura 7.19. Espectro de umbral de daño zonas Lacustre-Aluvial de más de 200 m

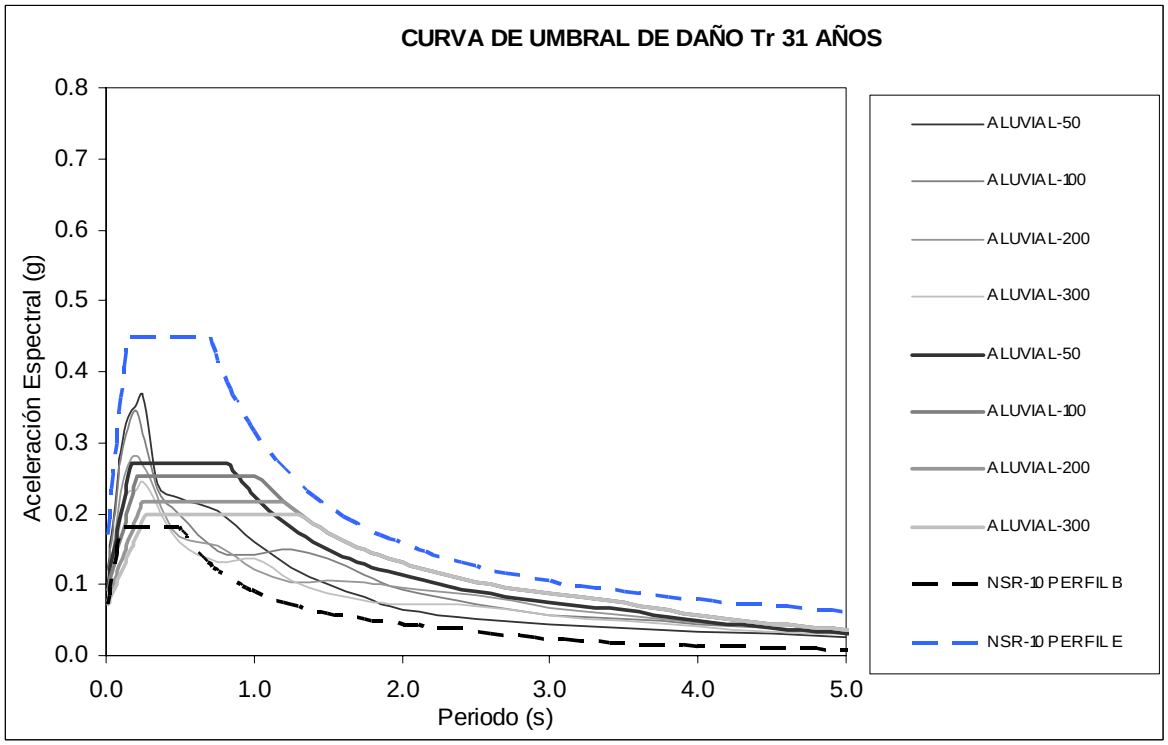


Figura 7.20. Espectro de umbral de daño zonas Aluviales

7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON DEL ESTUDIO DE 1997

Con el fin de observar el cambio entre los espectros de diseño del estudio de microzonificación símica de 1997 (MZSB), los espectros mínimos establecidos en el Decreto 194 de 2006 (DTO 193) y los espectros propuestos, se comparan de la **Figura 7.21** a la **Figura 7.25**.

En estas gráficas es importante mencionar que las zonas que se comparan estrictamente no son espacialmente idénticas, pues su distribución ha cambiado considerablemente, pero para efectos de enfocar los análisis de resultados se presentan las diferencias entre: la zona de cerros y la zona 1, la zonas de piedemonte con la zona 2, las zonas lacustre y lacustre-aluvial contra la zona 3 y la zona 4, las zonas aluviales versus la zona 5.

Es muy importante destacar que los cambios propuestos son el producto de mas de una década del avance del conocimiento en: señales de diseño (se pasó de 3 señales a 16 señales compatibles con la amenaza), información geotécnica (se pasó de 38 exploraciones de mas de 50 m de profundidad a más de 200), modelos de respuesta (se paso de 38 sitios de análisis a mas de 380) y nuevas técnicas para definir las zonas de respuesta sísmica y espectros de diseño (Particularmente, análisis bidimensionales y sensibilización estadística de parámetros). Todo lo anterior es el avance normal del conocimiento técnico acerca de los fenómenos naturales, pues los resultados de la MZSB de 1997 fueron la mejor solución propuesta con el conocimiento e información disponibles en ese momento.

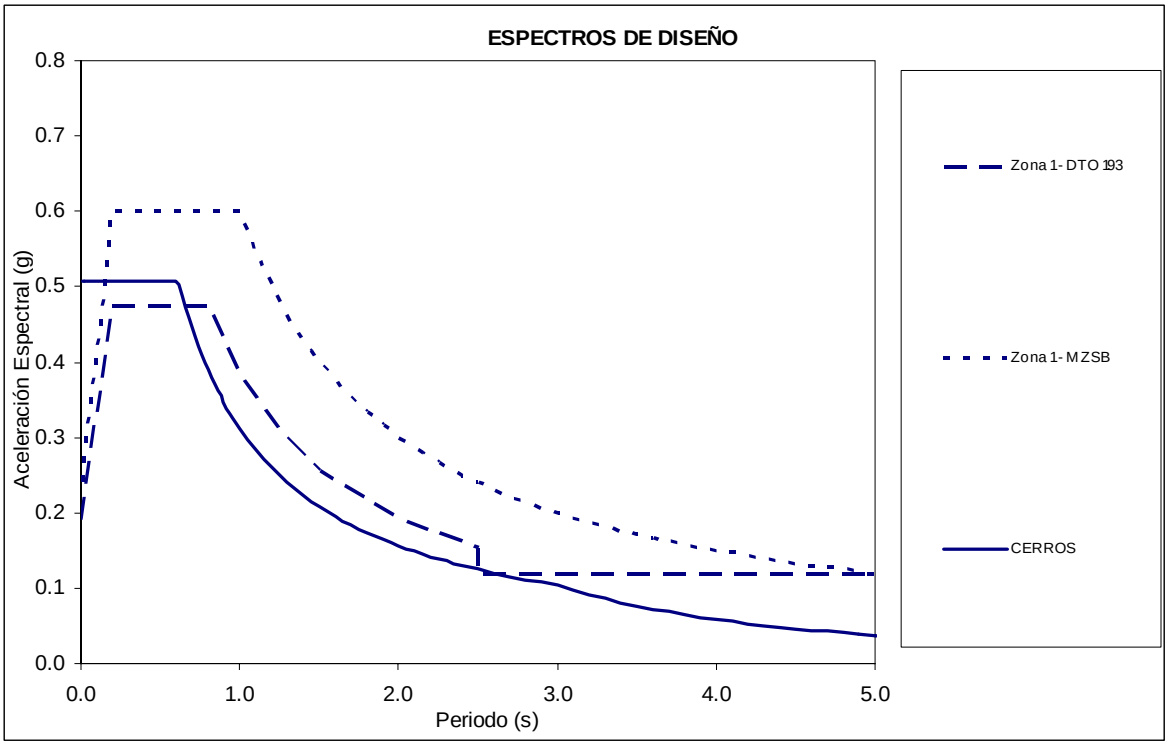


Figura 7.21. Espectro de zona de cerros con la zona 1

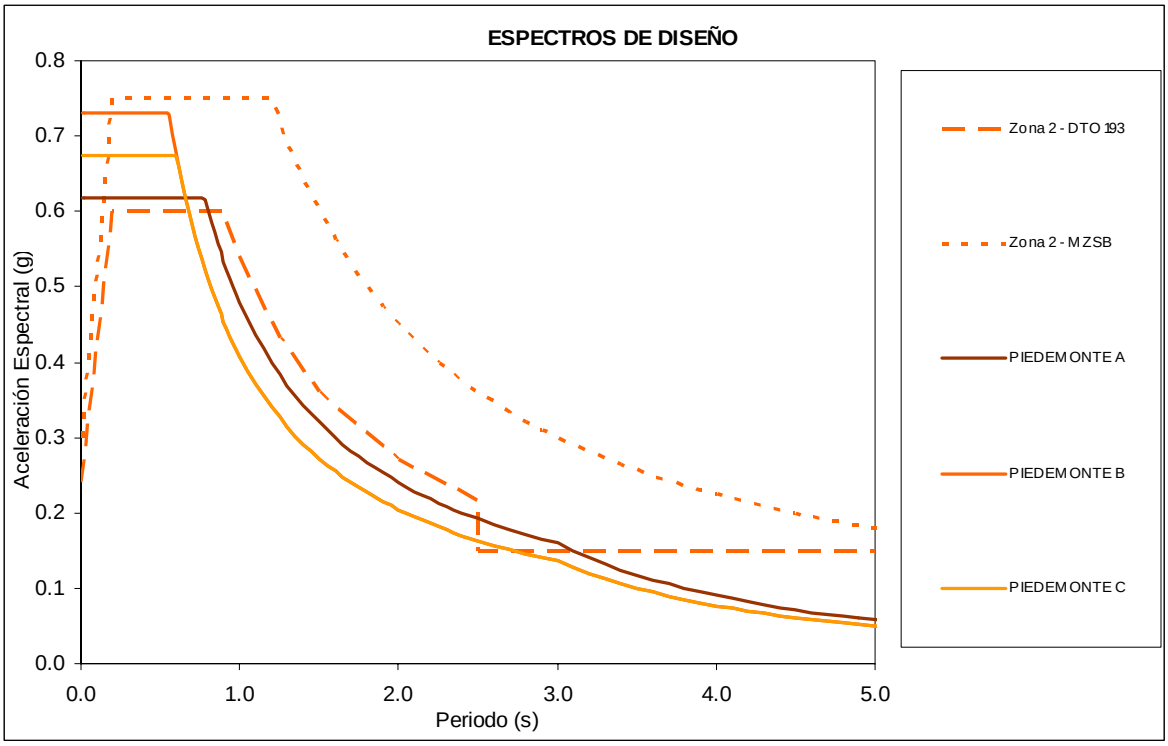


Figura 7.22. Espectro zonas de piedemonte con la zona 2

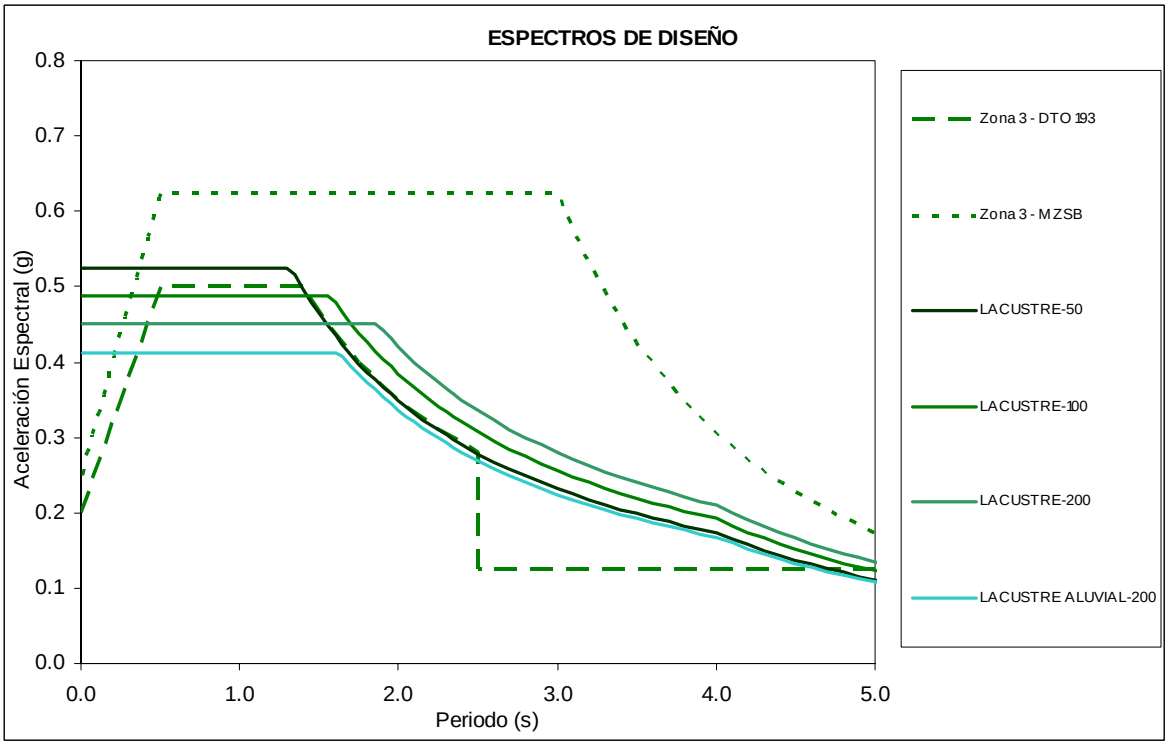


Figura 7.23. Espectros zonas lacustre y lacustre-aluvial con la zona 3

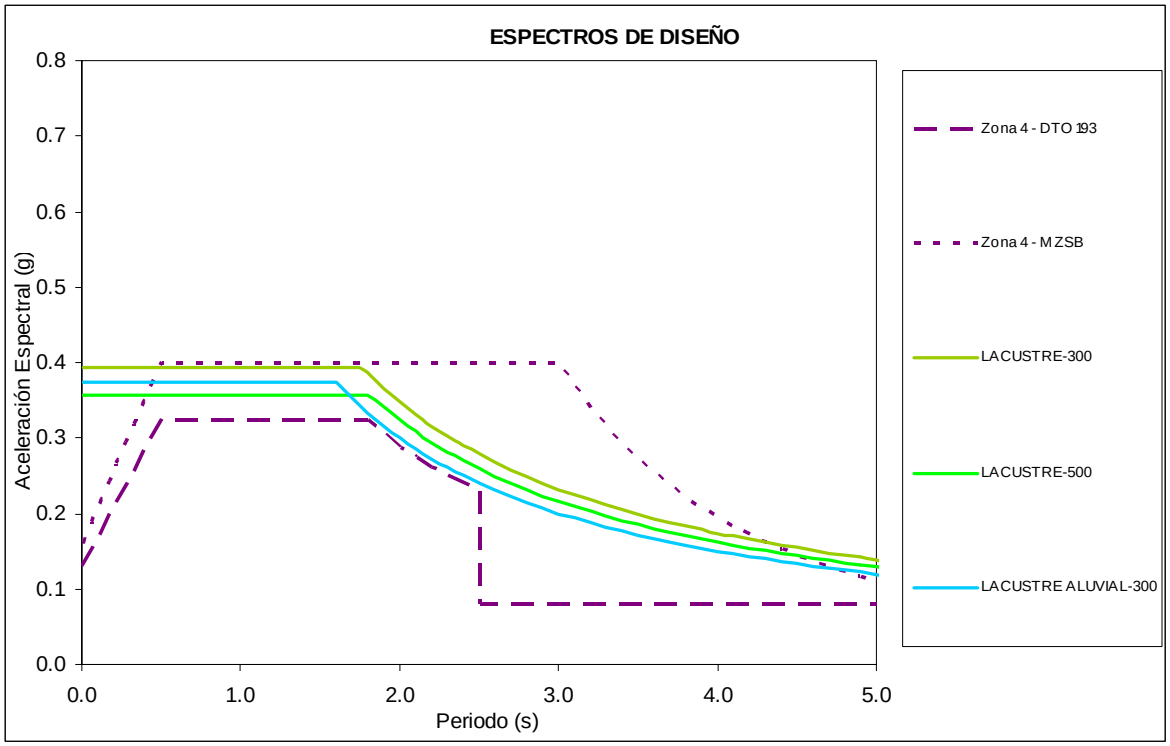


Figura 7.24. Espectros zonas lacustre y lacustre-aluvial con la zona 4

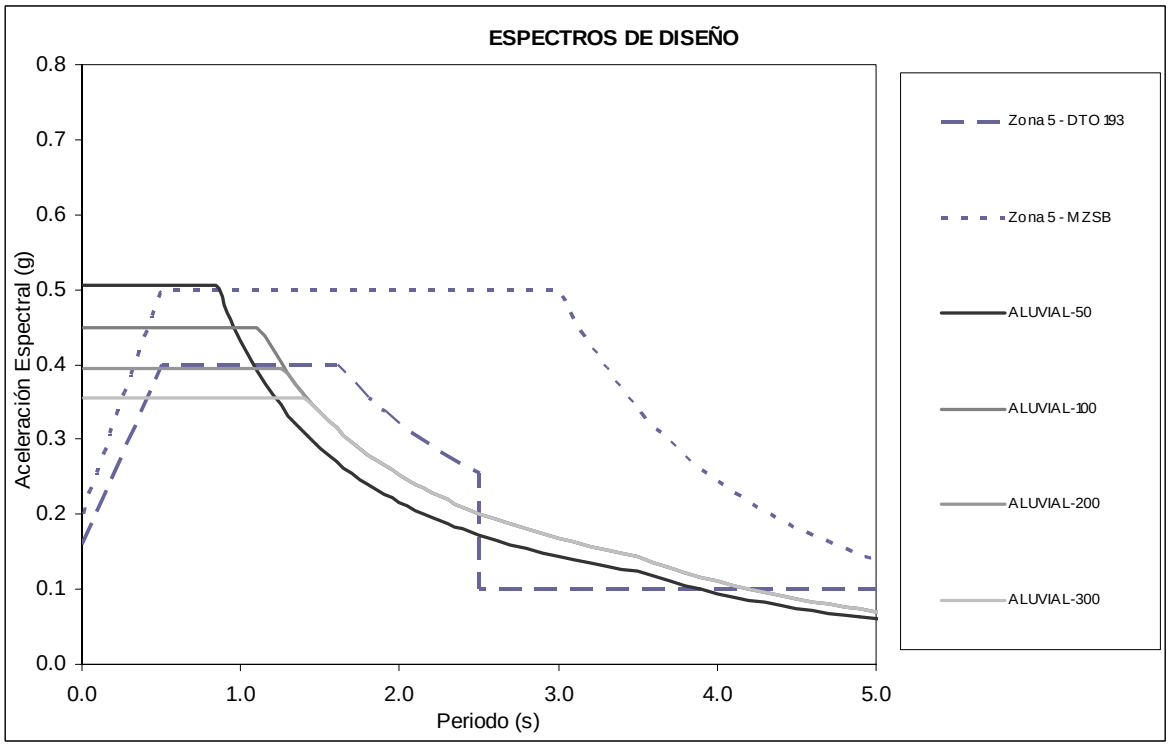


Figura 7.25. Espectros zonas aluviales con la zona 5

7.4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA NORMATIVIDAD

7.4.1 Recomendaciones para el reglamento de sismo resistencia

Que se complemente y modifique de conformidad con las normas de sismo resistencia contenidas en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, expedido de acuerdo con la Ley 400 de 1997 por medio de sus Decretos 926 y 2525 de 2010, que se denominará el Reglamento NSR-10, para cuyo efecto, en el Decreto se actualiza las disposiciones de Microzonificación Sísmica para Bogotá, D.C. No se podrá aplicar el Decreto con la versión del Reglamento NSR-98.

Que se adopten las coberturas geográficas de escala 1:50:000 de Zonificación Geotécnica y Zonificación de Respuesta Sísmica del estudio “Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá”, cuyo proyección corresponde al sistema de coordenadas Magna Sirgas.

Que el modo de consulta oficial de estas coberturas geográficas sea por medio del Geoportal del SIRE (www.sire.gov.co) del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE.

Que las edificaciones cubiertas por el alcance de la Ley 400 de 1997 y el Reglamento NSR-10 que se levanten en Bogotá Distrito Capital o que sean ampliadas, adecuadas, o modificadas en forma tal que conlleven intervención estructural, o que sean objeto de rehabilitación sísmica, deberán diseñarse y construirse dependiendo de la zona en la cual se encuentren según la Zonificación de Respuesta Sísmica, acogiéndose los coeficientes y curvas para el diseño de edificaciones relacionados en la Tabla 7.5 "Coeficientes y curva de diseño", salvo las construcciones de que trata el Título E del Reglamento NSR-10 las cuales se diseñaran de acuerdo con lo dispuesto en él.

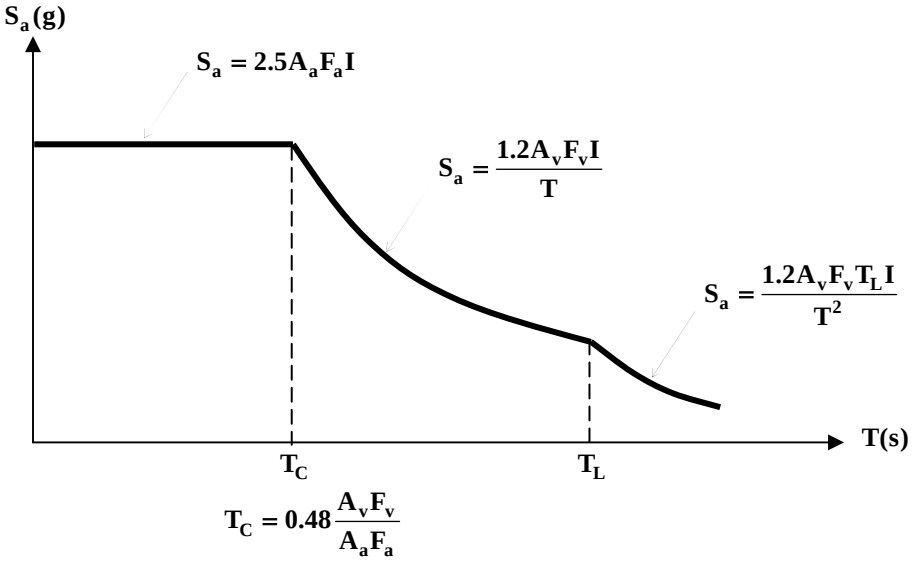
Que cuando se trate de edificaciones que sean objeto del procedimiento de seguridad limitada del Titulo A.10 del Reglamento NSR-10, se acojan los coeficientes y curvas de seguridad limitada para edificaciones relacionado en la Tabla 7.6 “Coeficientes y curvas de seguridad limitada”.

Que cuando se trate de edificaciones cubiertas por los requisitos de umbral de daño según el Titulo A.12 del Reglamento NSR-10, se acojan los coeficientes y curvas de umbral de daño para edificaciones relacionado en la Tabla 7.7 “Coeficientes y curvas de umbral de daño”.

Coeficientes de diseño

Zona	F_a (475)	F_v (475)	T_C (s)	T_L (s)	A_0 (475) (g)
CERROS	1.35	1.30	0.62	3.0	0.18
PIEDEMONTE A	1.65	2.00	0.78	3.0	0.22
PIEDEMONTE B	1.95	1.70	0.56	3.0	0.26
PIEDEMONTE C	1.80	1.70	0.60	3.0	0.24
LACUSTRE-50	1.40	2.90	1.33	4.0	0.21
LACUSTRE-100	1.30	3.20	1.58	4.0	0.20
LACUSTRE-200	1.20	3.50	1.87	4.0	0.18
LACUSTRE-300	1.05	2.90	1.77	5.0	0.16
LACUSTRE-500	0.95	2.70	1.82	5.0	0.14
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.10	2.80	1.63	4.0	0.17
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.00	2.50	1.60	5.0	0.15
ALUVIAL-50	1.35	1.80	0.85	3.5	0.20
ALUVIAL-100	1.20	2.10	1.12	3.5	0.18
ALUVIAL-200	1.05	2.10	1.28	3.5	0.16
ALUVIAL-300	0.95	2.10	1.41	3.5	0.14
DEPÓSITO LADERA	1.65	1.70	0.66	3.0	0.22

Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico



Parámetros

A_a = Aceleración horizontal pico efectiva de diseño. A_a = 0.15 g

A_v = Aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño. A_v = 0.20 g

A_0 = Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (g)

F_a = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos

F_v = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios

I = Coeficiente de importancia

S_a = Aceleración espectral (g)

T = Período de vibración (s)

T_C = Período corto (s)

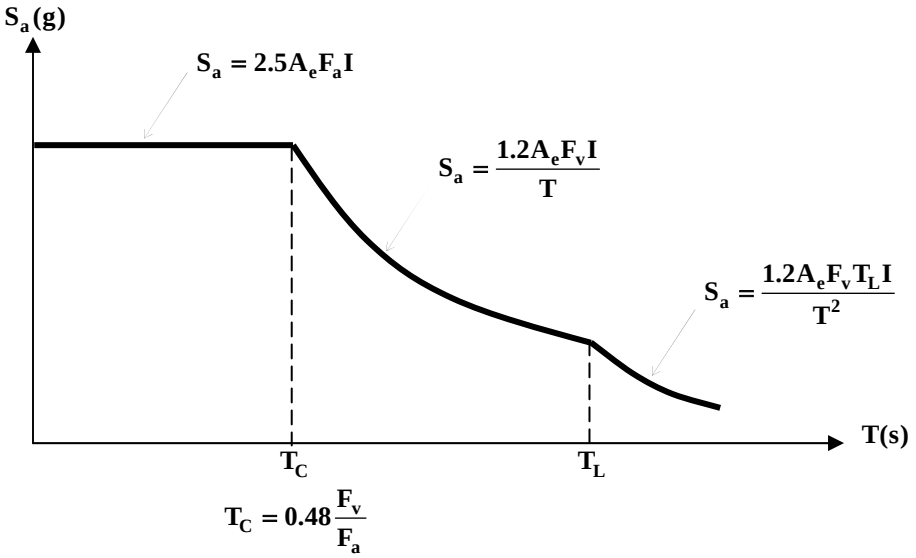
T_L = Período largo (s)

Tabla 7.5. Coeficientes y curva de diseño

Coeficientes de seguridad limitada

Zona	F_a (225)	F_v (225)	T_C (s)	T_L (s)	A_0 (225) (g)
CERROS	1.40	1.50	0.51	3.0	0.16
PIEDEMONTE A	1.70	2.35	0.66	3.0	0.20
PIEDEMONTE B	2.00	1.95	0.47	3.0	0.23
PIEDEMONTE C	1.85	1.95	0.51	3.0	0.22
LACUSTRE-50	1.45	3.40	1.13	4.0	0.19
LACUSTRE-100	1.35	3.70	1.32	4.0	0.18
LACUSTRE-200	1.25	4.00	1.54	4.0	0.16
LACUSTRE-300	1.10	3.40	1.48	5.0	0.14
LACUSTRE-500	1.00	3.10	1.49	5.0	0.13
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.15	3.20	1.34	4.0	0.15
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.05	2.90	1.33	5.0	0.14
ALUVIAL-50	1.40	2.10	0.72	3.5	0.18
ALUVIAL-100	1.25	2.50	0.96	3.5	0.16
ALUVIAL-200	1.10	2.50	1.09	3.5	0.14
ALUVIAL-300	1.00	2.50	1.20	3.5	0.13
DEPÓSITO LADERA	1.70	1.95	0.55	3.0	0.20

Curva de seguridad limitada para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 5% del crítico



Parámetros

A_e = Aceleración horizontal pico efectiva de seguridad limitada. A_e = 0.13 g

A_0 = Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (g)

F_a = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos

F_v = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios

I = Coeficiente de importancia

S_a = Aceleración espectral (g)

T = Período de vibración (s)

T_C = Período corto (s)

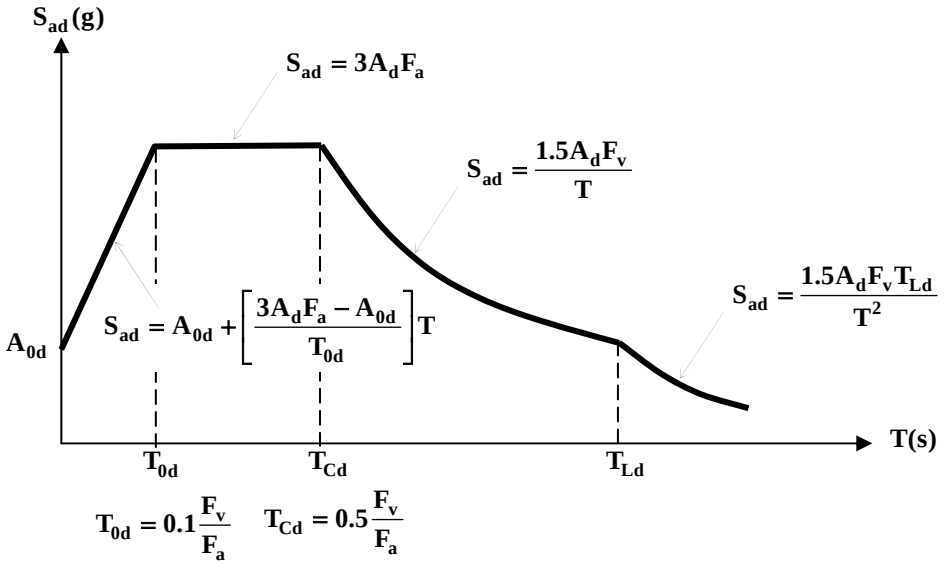
T_L = Período largo (s)

Tabla 7.6. Coeficientes y curva de seguridad limitada

Coeficientes de umbral de daño

Zona	F_a (31)	F_v (31)	T_{0d} (s)	T_{Cd} (s)	T_{Ld} (s)	A_{0d} (31) (g)
CERROS	1.50	1.70	0.11	0.57	3.0	0.08
PIEDEMONTE A	1.90	2.75	0.14	0.72	3.0	0.10
PIEDEMONTE B	2.20	2.25	0.10	0.51	3.0	0.12
PIEDEMONTE C	2.05	2.25	0.11	0.55	3.0	0.11
LACUSTRE-50	1.55	4.00	0.26	1.29	4.0	0.09
LACUSTRE-100	1.45	4.40	0.30	1.52	4.0	0.09
LACUSTRE-200	1.35	4.75	0.35	1.76	4.0	0.08
LACUSTRE-300	1.25	4.00	0.32	1.60	5.0	0.08
LACUSTRE-500	1.10	3.75	0.34	1.70	5.0	0.07
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.30	3.85	0.30	1.48	4.0	0.08
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.20	3.50	0.29	1.46	5.0	0.07
ALUVIAL-50	1.50	2.50	0.17	0.83	3.5	0.09
ALUVIAL-100	1.40	2.90	0.21	1.04	3.5	0.08
ALUVIAL-200	1.20	2.90	0.24	1.21	3.5	0.07
ALUVIAL-300	1.10	2.90	0.26	1.32	3.5	0.07
DEPOSITO LADERA	1.90	2.25	0.12	0.59	3.0	0.10

Curva de umbral de daño para un coeficiente de amortiguamiento (ξ) de 2% del crítico



Parámetros

A_d = Aceleración horizontal pico efectiva de umbral de daño. A_d = 0.06 g

A_{0d} = Aceleración horizontal pico efectiva del terreno para umbral de daño en superficie (g)

F_a = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos

F_v = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios

S_{ad} = Aceleración espectral de umbral de daño (g)

T = Período de vibración (s)

T_{0d} = Período inicial de umbral de daño (s)

T_{Cd} = Período corto de umbral de daño (s)

T_{Ld} = Período largo de umbral de daño (s)

Tabla 7.7. Coeficientes y curva de umbral de daño

Con el fin de dar aplicación a los espectros de diseño, de seguridad limitada y de umbral de daño, se hacen las siguientes aclaraciones y complementaciones.

1) Todas las curvas representan espectros de respuesta elásticos, a nivel de la superficie del terreno, para el cinco por ciento (5%) de amortiguamiento estructural respecto al crítico para diseño y seguridad limitad y para el dos por ciento (2%) de amortiguamiento estructural respecto al crítico para umbral de daño.

2) Cada una de las zonas en que se ha dividido Bogotá Distrito Capital involucra un valor característico de Aceleración Pico del Terreno (A_0 y A_{0d}), el cual corresponde a la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno para dicha zona, los valores de A_0 se indican en la Tabla 7.5 para las condiciones de diseño y en la Tabla 7.6 para seguridad limitada y los valores de A_{0d} en la Tabla 7.7 para umbral de daño. Los valores de aceleración Pico del Terreno adoptados en el presente Decreto se deben emplear en los siguientes tipos de análisis: estabilidad de taludes, potencial de licuación, estructuras de contención, estabilidad de rellenos artificiales y de cimentaciones superficiales y profundas.

3) En aquellos casos en que las normas de construcción sismorresistentes contenidas en el Reglamento NSR-10, hagan referencia al valor de Aceleración horizontal pico efectiva de diseño A_a para Bogotá Distrito Capital A_a es igual a 0.15 g.

4) El coeficiente de disipación de energía R que se debe emplear con las curvas de diseño y seguridad limitada tiene un valor constante e igual al dado en la sección A.2.9.4 y A.3.3.3 del Reglamento NSR-10.

5) Se deberá clasificar el perfil geotécnico del sitio en el cual se ubique una edificación en alguna de las zonas descritas en la Tabla 7.1 de acuerdo a su localización en la zonificación de respuesta sísmica y al estudio geotécnico de clasificación sísmica que se realice para la edificación. Si el estudio geotécnico de clasificación sísmica demuestra que las características del terreno, materiales y espesor del depósito, es diferente al dado en la zonificación de respuesta sísmica para el sitio de interés, se deberá aplicar los parámetros espectrales de la zona de respuesta sísmica que sea consistente con el estudio geotécnico de clasificación sísmica. Esta clasificación sísmica debe coincidir con alguna de las zonas adyacentes a la localización del predio o máximo a una zona de por medio siempre y cuando no supere una distancia de 500 metros, respecto a la localización del predio.

6) En los límites de cada zona se establece una franja de transición de 100 metros, tomando 50 metros a cada lado de los límites definidos. En esta franja de transición se debe tomar, dependiendo del período de vibración de la edificación, la aceleración de diseño promedio que resulte de la aplicación de los espectros de diseño de las zonas adyacentes, a menos que se demuestre por medio de un estudio geotécnico de clasificación sísmica que las características del terreno, materiales y espesor del depósito, corresponde al de una de las zonas adyacentes, en cuyo caso deberá emplearse los parámetros espectrales de la zona de respuesta sísmica que sea consistente con el estudio geotécnico de clasificación sísmica.

7) En las zonas de Cerros, Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C y Depósito Ladera, el estudio geotécnico de clasificación sísmica para la edificación debe determinar el máximo del espesor de los depósitos de suelo bajo la placa de cimentación o

contrapiso, penetrando mínimo 5 metros en el estrato rocoso (entendiéndose la roca como un material con velocidad de cortante V_s igual o superior a 750 m/s, obtenida mediante ensayos geosísmicos de campo en perforaciones o superficiales), de manera tal que si el espesor de depósito es inferior a 6 metros, se debe considerar como zona de Cerros; si el espesor del depósito varia entre 6 y 12 metros, de debe considerar como Depósito Ladera; si el espesor del depósito es superior a 12 metros, se debe clasificar como zona de Piedemonte más cercano (entendiéndose por piedemonte más cercano al Piedemonte A, Piedemonte B o Piedemonte C que por su localización geográfica está a menor distancia del sitio de interés), a menos que se demuestre factores de amplificación diferentes con un estudio de sísmico particular de sitio.

8) En Terrenos con pendiente superior a 10 grados (17%), de las zonas de Cerros, Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C y Depósito Ladera, deben realizarse los estudios pertinentes de estabilidad de taludes y de amenaza por fenómenos de remoción en masa que incluyan los efectos sísmicos. Para este efecto se deben aplicar tanto lo contenido en el Reglamento NSR-10 y las resoluciones que para la materia expida el FOPAE.

9) En las zonas geotécnicas de piedemonte, aluvial, llanura y cauces se debe evaluar el potencial de licuación en los suelos susceptibles a licuarse y el diseño debe considerar el resultado de esta evaluación. Para el efecto puede utilizarse el procedimiento dado en el Titulo H contenido en el Reglamento NSR10. Igual evaluación debe llevarse a cabo si en los perfiles del subsuelo se encuentran suelos susceptibles de licuación, a juicio del responsable del estudio geotécnico, independientemente de la zona donde se ubiquen.

10) Para los estudios geotécnicos mencionados en los numerales 8) y 9) anteriores, así como para estructuras de contención y estructuras térreas que no hagan parte integral de edificaciones, se podrán usar espectros con amortiguamientos respecto al crítico superiores al cinco por ciento (5%) que deben estar debidamente soportados.

11) En las zonas donde se identifiquen rellenos artificiales donde no se ha controlado técnicamente su compactación con espesores superiores a tres (3) metros y en los cuales se decida dejar los rellenos como material de cimentación de edificaciones, deben aumentarse un 20% los factores de amplificación, Fa y Fv, de la zona donde se localice la edificación, a menos que se demuestren factores de amplificación diferentes con un estudio sísmico particular de sitio, según lo establecido en el artículo 7° del presente Decreto, los que de todas maneras no deben ser menores que los valores de $\mathbf{F_a}$ y $\mathbf{F_v}$ de la zona donde se localice la edificación.

12) Para edificaciones con períodos estructurales de vibración con base rígida mayores que 2.5 segundos deben evaluarse los factores de amplificación con un estudio sísmico particular de sitio.

13) Para los efectos de las limitaciones de uso de los diferentes sistemas estructurales a los que hace referencia el Capitulo A.3 del Reglamento NSR-10, Bogotá Distrito Capital se considera ubicada en zona de Amenaza Sísmica Intermedia aun cuando se presenten aceleraciones máximas del terreno superiores a 0.15g.

14) Para efectos de los requisitos especiales que deben cumplir las edificaciones en función del tipo de perfil de suelo donde estén ubicadas que define la sección A.2.4 del Reglamento NSR-10, la zona de Cerros se clasifica como perfil Tipo C, las zonas de

Piedemontes (A, B y C) corresponden a perfil Tipo D y las demás zonas Lacustre, Lacustre – Aluvial y Aluvial corresponden a perfiles Tipo F. La obligación de realizar estudios sísmicos particulares para los perfiles Tipo F que trata la sección A.2.4 del Reglamento NSR-10 queda cubierta con el presente Decreto al adoptar la Microzonificación Sísmica para Bogotá, D.C.

15) Cuando dependiendo del tipo de perfil de suelo y el periodo de vibración de la edificación el Titulo A del reglamento NSR-10 imponga limitaciones a los procedimientos de análisis requeridos u obligue al empleo de procedimientos de interacción suelo – estructura, se deben utilizar las designaciones de los tipos de perfil de suelo para cada una de las zonas de respuesta sísmica dados en el numeral 14) anterior.

16) Para edificaciones con períodos estructurales de vibración con base rígida mayores de 1.0 segundos se deben verificar entre el ingeniero estructural y el geotecnista del proyecto que el periodo fundamental de la edificación calculado de acuerdo a la sección A.4.2 más o menos un 10% no coincida con el periodo fundamental o secundario calculados para el depósito de suelo en el sitio del proyecto con el fin de prever problemas de resonancia suelo-estructura.

Para efecto de lo estipulado, estudio geotécnico de clasificación sísmica, deben cumplir, además de lo prescrito en el Título H del Reglamento NSR-10, que todos los datos de campo deben provenir de mínimo una investigación física con muestreo y ensayos de campo y laboratorio hasta mínimo 50 metros de profundidad para zonas de suelos, o profundidades menores cuando se penetre al menos cinco (5) metros de estrato rocoso y se verifique que no se trata de fragmentos de roca embebidos en suelo no competente.

Para efecto de lo estipulado, los estudios sísmicos particulares de sitio, se deben cumplir, además de lo prescrito en la sección A.2.10 del Reglamento NSR-10, lo siguiente:

1) En los procedimientos de análisis de respuesta dinámica, se deben utilizar como mínimo modelos unidimensionales, excepto cuando se ubique la edificación en las zonas de respuesta sísmica con espesores de suelo inferiores a 50 m, es decir las zonas de Cerros, Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C, Depósito Ladera, Aluvial-50 y Lacustre-50, para las cuales se deben utilizar modelos bidimensionales independientemente de la pendiente del terreno.

2) Con el fin de tener en cuenta la profundidad del nivel de roca o el espesor de los sedimentos en Bogotá, D.C., en los casos en que ésta o éstos superen los 50 metros, se debe consultar el Mapa de Profundidad de Basamento Rocoso, determinado en el estudio “Zonificación de respuesta sísmica de Bogotá” que se puede consultar en el SIRE del FOPAE.

3) Para espesores de sedimentos superiores a 50 metros, según la ubicación estimada de la profundidad de la roca con respecto a la edificación y de acuerdo al alcance de la exploración geotécnica realizada, puede ser necesario complementar la información para poder obtener un perfil de diseño óptimo. Cuando se requiera información adicional, se puede complementar con la información contenida en los volúmenes del Subproyecto 8, Estudio Geotécnico y del Subproyecto 10 y 11, "Ensayos de Laboratorio y Campo" y "Zonificación Geotécnica", del Proyecto Microzonificación Sísmica de Bogotá. Adicionalmente, la contenida en el estudio “Zonificación de respuesta sísmica de Bogotá” disponibles en el Centro de Documentación de Información del FOPAE.

4) Se debe calibrar el modelo de respuesta con base en los registros obtenidos por la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB, dicha calibración del modelo debe reflejar los niveles de amplificación y periodos fundamentales registrados en las estaciones ubicadas en la misma o similar zona de respuesta sísmica, la información de la RAB se puede consultar en el SIRE del FOPAE.

5) Se debe emplear los espectros de amenaza uniforme en roca para Bogotá y las señales sísmicas que se usaron en el estudio "Zonificación de respuesta sísmica de Bogotá", disponible en el Centro de Documentación de Información del FOPAE o que se puede consultar en el SIRE del FOPAE.

6) La definición de la respuesta uniforme en superficie se deberá calcular como el producto del espectro uniforme de amenaza en roca para Bogotá por la relación espectral promedio, o en su defecto se permite trabajar con las funciones de transferencia promedio.

7) Se deben definir para el sitio de interés los factores de amplificación $\mathbf{F_a}$ y $\mathbf{F_v}$ consistentes con las curvas de diseño definidas en la Tabla 7.5, de manera tal que cubran las aceleraciones espectrales en superficie obtenidas. En el caso de que se obtengan aceleraciones espectrales superiores a las establecidas para la zona por el presente Decreto se deben tener en cuenta la definición de los factores de amplificación del sitio, en el caso contrario de que se obtengan aceleraciones espectrales inferiores a las establecidas por el presente Decreto para la zona, los factores de amplificación del sitio no deben ser inferiores a los definidos en el Reglamento NSR-10 en el numeral A.2.10.2.4 ni inferiores al 80% de los establecidos por el presente Decreto para la zona de estudio.

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de la Alcaldía de Bogotá, deberá recibir copia de los estudios de clasificación sísmica y sísmicos particulares de sitio una vez sean revisados y aprobados por la curaduría urbana previo al otorgamiento de licencia de construcción por parte de la curaduría urbana.

7.4.2 Otras recomendaciones

7.4.2.1 Diseño de cimentaciones

En el diseño de la fundación se debe considerar la acción sísmica, en la cual se evalúe tanto la capacidad portante de los cimientos bajo esta consideración como la capacidad a la tensión producida por los momentos inducidos por el posible cabeceo de la estructura al someterse a una acción sísmica, tanto individualmente para cada cimentación como en conjunto para todo el sistema de fundación.

En los análisis seudo estáticos de cimentaciones se debe tomar como solicitación 2/3 de Ao respectivo del sitio de interés.

Los estudios de suelos deben proporcionar la información suficiente para realizar el diseño sismorresistente de la fundación, así como el período fundamental del suelo para verificar posibles problemas de resonancia con la edificación, el cual debe ser consistente con los intervalos establecidos en la leyenda del mapa de respuesta sísmica de Bogotá (Tabla 7.1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica).

7.4.2.2 Análisis de estabilidad de taludes

En los análisis seudo estáticos realizados para evaluar la estabilidad de laderas bajo condiciones sísmicas se debe tomar 2/3 de Ao respectivo del sitio de interés.

7.4.2.3 Diseño de infraestructura

Para el diseño de vías, puentes, canales, presas, jarillones, redes de acueducto, alcantarillado, gas, etc., no son aplicables directamente los resultados de este estudio, la responsabilidad de los diseños de cada infraestructura es responsabilidad de cada entidad a cargo de la misma, es decisión de cada una adoptar o no los resultados de este estudio.

CAPITULO 8

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es presente estudio está soportado en el avance del conocimiento de más de una década en temas de señales de diseño (se pasó de 3 señales a 16 señales compatibles con la amenaza), información geotécnica (se pasó de 38 exploraciones de más de 50 m de profundidad a más de 200), modelos de respuesta (se paso de 38 sitios de análisis a más de 380) y nuevas técnicas para definir las zonas de respuesta sísmica y espectros de diseño (Particularmente, análisis bidimensionales y sensibilización estadística de parámetros). Lo anterior no desconoce el buen trabajo que se realizó en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá que se publicó en el año 1997, el cual fue la mejor solución con base con el conocimiento e información disponibles en ese momento y fue el principal insumo para la elaboración de este estudio.

La participación activa en las reuniones de trabajo y los valiosos aportes de los representantes de la Universidad de los Andes, Sociedad Colombiana de Geotecnia y Asociación de Ingeniería Sísmica, han servido para que la DPAE actualice la MZSB y presente a la sociedad un estudio completo con la participación de las agremiaciones de mayor reconocimiento en el tema.

A continuación se resumen las principales conclusiones y recomendaciones que surgen de cada actividad de acuerdo al marco lógico en el que se desarrollo el proyecto.

8.1 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTER-ADMINISTRATIVOS

Los estudios que se tuvieron en cuenta para la actualización de la zonificación geotécnica y de efectos locales de Bogotá, fueron el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (1997) y los aportes más importantes realizados por Ingeominas en los últimos años sobre este tema, a partir de esta información se definió la necesidad de actualizar la respuesta sísmica del depósito de la cuidad, por ello el FOPAE realizó tres convenios interadministrativos con el propósito aunar esfuerzos para modelar la respuesta de sitio de acuerdo con las distintas metodologías existentes.

Los estudios generales de amenaza sísmica de Colombia realizados por AIS y por Ingeominas – Universidad Nacional fueron los insumos básicos para cubrir los aspectos de amenaza sísmica.

Es importante aclarar que estuvo fuera del alcance en esta etapa de actualización del estudio de MZSB la revisión detallada de la tectónica y sismicidad regional y local, puesto que esta actividad demandaría de mayor recurso y tiempo, además de la participación de entidades como Ingeominas quien es la entidad con mayor competencia en este tema y que en el momento se encuentra adelantando la actualización del mapa nacional de amenaza sísmica.

8.2 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO

Los estudios de amenaza sísmica de Colombia definen espectros uniformes de amenaza con tres tipos de ecuaciones de atenuación Ingeominas-Unal IGM3, AIS Campbell García y AIS Gallego. Los resultados de los modelos IGM3 y AIS Campbell García son muy similares, mientras que el espectro obtenido mediante AIS Gallego genera aceleraciones espectrales más altas para períodos mayores.

Dado que aún el estado del conocimiento en cuanto ecuaciones de atenuación tiene importantes incertidumbre, se optó por trabajar para la ciudad de Bogotá con el promedio más desviación estándar de los tres espectros uniformes de amenaza obtenidos en los estudios generales de amenaza sísmica de Colombia.

La variación de la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida en los estudios de amenaza sísmica son comparativamente muy similares, se destaca que la zona urbana de Bogotá tiene valores de amenaza del orden de 0.15g (localizándose en zona de amenaza sísmica intermedia) que van aumentando hacia el sur del Distrito, donde alcanza en los sectores de Súmapaz a ser superior a 0.2g pasando a amenaza sísmica alta.

Se seleccionaron señales o acelerogramas apropiados de una base de datos reales de movimientos sísmicos registrados, los cuales son compatibles con la amenaza como función de las magnitudes de las fuentes y sus distancias al sitio de estudio. Por tratarse de las señales reales, siempre presentarán efectos de sitio en alguna medida, por lo que optó por emplear la técnica de relaciones espectrales que permite eliminar los efectos propios de las señales y dejar en “limpio” la respuesta del perfil modelado.

8.2.1 Modelo geológico geotécnico

La información que se tiene en este momento, proveniente de diferentes fuentes, como son perfiles geológicos, perforaciones, ensayos de campo, análisis de respuesta por efectos locales, etc., permiten conocer de mejor manera el subsuelo de Bogotá y lograr una refinación importante en la definición de zonas de comportamiento geotécnico homogéneo, información muy útil tanto para respuesta símica como para las evaluaciones, diseños y obras que se adelantan en la ciudad.

Se conservaron en la zonificación geotécnica las mismas unidades geotécnicas identificadas en las zonificaciones anteriores, cerros, piedemonte, lacustre, aluvial y llanura de inundación, los principales aportes de este mapa están en la delimitación precisa de las zonas de piedemonte y en la subdivisión de las unidades de planicie (lacustre, aluvial y llanura de inundación) de acuerdo con criterios geotécnicos más que geológicos.

La zonificación geotécnica para respuesta sísmica tiene cuatro grandes zonas, cerros, piedemonte, lacustre y aluvial, y al subdividirse de acuerdo con la subzona geotécnica y el espesor del depósito se obtienen en total 31 zonas de respuesta sísmica homogénea, lo que garantiza la gradual variación espacial en la respuesta de sitio y de este modo se evitan cambios bruscos entre una unidad a otra contigua.

Dado que el proceso de análisis incorpora varios tipos de información, es necesario estructurar cada temática involucrada en coberturas de información. Para ello, la

información se articuló en un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGis by ESRI) con el fin de poder realizar los análisis de interpolación para observar la variación espacial de algunos de los parámetros geotécnicos.

8.2.2 Interpretación de señales de la RAB

A partir de los datos registrados por la RAB, se procedió a analizar la variación en superficie de algunos parámetros sísmicos y la respuesta espectral de los suelos donde se localizan las estaciones, la información analizada permitió mejorar las hipótesis y modelos que se emplearon para definir las zonas de respuesta sísmica y espectros de respuesta.

Con base en los resultados de las dos estaciones con Down Hole en la zona lacustre, se logra identificar que la respuesta sísmica de los depósitos de esta zona (suelos arcillosos blandos) para los registros obtenidos hasta la fecha por la RAB está en el intervalo elástico lineal, con grandes amplificaciones. En el caso de la estación en la zona aluvial se tienen niveles de amplificación bajos, debidos al comportamiento no lineal importante que presentan los tipos de suelos de esta zona (suelos limosos y arenosos duros).

8.2.3 Respuesta dinámica de los terrenos

Con base en los resultados de la calibración de los perfiles de los sitios CGRAL, localizado sobre una zona aluvial y CBOG1 y CUAGR, que se encuentran ubicados en depósitos lacustres, se conformaron los modelos unidimensionales que se utilizaron para realizar la verificación de los resultados entregados por los diferentes grupos de trabajo. En este caso, y teniendo en cuenta que los modelos arrojan resultados similares, se emplearon las expresiones propuestas por Díaz-Parra, para la determinación de las velocidades de onda de corte y las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento.

Tradicionalmente se ha estudiado la respuesta sísmica a partir de los espectros de respuesta obtenidos de una familia de acelerogramas, cuyo resultado mezcla los efectos propios de las señales empleadas con los efectos del terreno, imposibilitando la definición de espectros uniformes de amenaza o espectros de diseño.

La metodología adoptada para representar la respuesta de sitio permite definir para cada zona la respuesta sísmica a manera de relaciones espectrales para varios niveles de amenaza. De esta forma se logra analizar separadamente el efecto propio de los terrenos, depósitos de suelo o rocas, para calcular posteriormente espectros uniformes de amenaza en superficie.

8.2.4 Zonificación de la respuesta sísmica y espectros de diseño

Se definieron cuatro (5) zonas de respuesta sísmica. Cerros, Piedemonte, Lacustre, Lacustre Aluvial y Aluvial, que por efectos de la variación del espesor del deposito se subdividieron para obtener una transición gradual de la respuesta entre cada zona, logrando de este modo identificar 15 zonas de respuesta sísmica homogénea. Adicionalmente se define una zona especial que corresponde a los depósitos de ladera.

Se definen los parámetros que se requieren para cada zona de acuerdo con la NSR-10, con ellos se puede construir los espectros de diseño, seguridad limitada y umbral de

daño. Así mismo se garantiza que los resultados del estudio son compatibles con los demás requerimientos de la NSR.

El mapa de zonificación de respuesta sísmica y parámetros para la construcción de espectros de diseño de edificaciones propuestos garantizan una gradualidad espacial de la variación de la demanda sísmica consistente con las mediciones de sismos por la RAB y acorde con los resultados de los modelos numéricos.

Se relacionan los aspectos más importantes que se deben considerar en la actualización de la reglamentación del estudio microzonificación sísmica de Bogotá, los cuales son el resultado de varios años de experiencia y reuniones de trabajo sobre la aplicación normatividad.

8.2.5 Recomendaciones para la reglamentación

Es conveniente conformar una base de datos geotécnica con la información recopilada en el estudio, dado que la información aunque se encuentra organizada y digital no está debidamente estructurada en una base de datos que facilite la alimentación y búsqueda de información.

Se debe estudiar la manera como se consideran las acciones sísmicas en el diseño de las cimentaciones de las edificaciones y las implicaciones de la configuración de la cimentación (Cimentación profunda y sótanos) en las solicitaciones sísmicas.

Restringir en la medida de lo posible la construcción de edificaciones con períodos de vibración reales similares al período fundamental del suelo de fundación, puesto que se puede presentar resonancia entre los períodos de la edificación y del suelo, aumentando las amplificaciones cuando ocurra un evento sísmico, de acuerdo con las experiencias ya vistas en otras partes del mundo.

CAPITULO 9

9 REFERENCIAS

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

AIS Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, (2007). Estudio de Amplificación Sísmica en los Sitios Establecidos por la DPAE a través de Análisis Unidimensional, Transportando en un Análisis no Lineal por etapas la Señal desde la Roca a la Superficie. Convenio interadministrativo FOPAE-AIS No 487 de 2006.

Bommer, J.J. & Martínez-Pereira, A., (2000). The effective duration of earthquake strong-motion, Journal of Earthquake Engineering, Vol 3, No 2, 127-172.

Bommer J. J., Scott S. G. & Sarma S. K., (2000). Hazard consistent earthquake scenarios. Soil Dynamics and Earthquaçke Engineering No19, 219-231.

Bommer J. J., (2005). Seismic Hazard analysis for engineering desing and earthquake loss estimation. Congreso Chileno de Sismología e ingeniería Antisísmica.

Díaz-Parra F., (2007). Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Tesis Maestría en Geotecnia Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Gallego M., (2007). Acerca de la Construcción de Edificaciones, Esbeltas, Elevadas, Pesadas y Densamente Pobladas sobre Suelos Blandos de la Ciudad de Bogotá.

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

Hashash Y., Park D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississipi embayment. Engineering geology. Pags185-206.

Hashash Y., Park D. (2002). Site response analysis in the Mississippi embayment. U.S. – Japan seminar on seismic disaster mitigation in urban area. Geotechnical engineering.

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

Hubach, E. (1954). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. Ingeominas Boletín geológico. Vol. V, No. 2, pp. 94-112. Bogotá.

INGEOMINAS, UNIANDES, (1997). Microzonificación Sísmica de Bogotá. Publicación especial Ingeominas. Bogotá.

Julivert, M. (1963). Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander. No.7, pp. 52. Bucaramanga.

Kramer, S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall International.

Krinitzsky E. L., (2002). How to obtain earthquake ground motions for engineering desing. Engineering Geology, No 65, 1-16.

Loboguerrero A., (1994). Geología del subsuelo del nororiente de la ciudad de Bogotá. Tesis Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Martínez A., Alvarado C, Rubiano D. (2002). Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: casos aplicados a Colombia. IX Congreso y IV Seminario Colombianos de Geotecnia. Medellín- Colombia.

Park D., Hashash Y. (2005). Evaluation of seismic site effects in the Mississipi embayment. I. Estimation of dynamic properties. Soil dynamic s and earthquake engineering. Pags 133-144.

SCG Sociedad Colombiana de Geotecnia, (2007). Modelo Geotécnico de La Sabana de Bogotá y Caracterización Dinámica Bidimensional de los Suelos de Bogotá. Convenio interadministrativo FOPAE-SCG No 460 de 2006.

Stokoe K., Darendeli M., Gilber R., Menq F., and Choi W., (2004). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD Dissertation, University of Texas at Austin.

UNIANDES Universidad de los Andes, (2006). Innovación e Investigación Tendientes a la Actualización de la Información Sísmica de la Ciudad De Bogotá. Convenio interadministrativo FOPAE-UNIANDES No 667 de 2005.

Youd, T.L, Idriss, I.M, eds., (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.

Zhang J., Andrus R. and Juang H., (2005). Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 131, No. 4, pp 453-464.