TABLA DE CONTENIDO

1 GENERALIDADES 1-1

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES 1-1
1.2 ANTECEDENTES 1-1
1.3 METODOLOGÍA 1-2
1.3.1 MODELO GEOTÉCNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ 1-2
1.3.2 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA BIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS DE BOGOTÁ 1-5

2 MODELO GEOTECNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ 2-1

2.1 MODELO GENERAL CONCEPTUAL DE LOS SUELOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ 2-3
2.2 RECOPILACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS 2-6
2.3 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE 2-7
2.3.1 RELACIÓN DEL MODULO DE RIGIDEZ EO DE LABORATORIO Y EL DE CAMPO 2-9
2.3.2 CORRELACIÓN DEL TIPO DE SUELO Y SU ESTADO CON EL MÓDULO DE RIGIDEZ DE CAMPO A BAJAS DEFORMACIONES (ENSAYO DOWN HOLE). 2-10
2.3.3 ESTIMACIÓN DEL MODULO DE CORTE MÁXIMO A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTANDAR 2-12
2.3.4 METODOLOGÍA PARA DEFINIR PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA 2-14
2.3.5 SECCIONES A PARTIR DE PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA 2-14
2.4 CURVAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ 2-17
2.4.1 NORMALIZACIÓN DE LAS CURVAS DINÁMICAS RESULTADO DE ENSAYOS TRIAXIALES POR CURVAS DE REFERENCIA (ISHIBASHI Y ZANG) 2-18
2.5 EVALUACIÓN DE LOS ESPESORES DE DEPÓSITO 2-19
2.5.1 MAPAS DE ESPESORES DE LA FORMACIÓN SABANA Y SUBACHOQUE 2-21

3 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA BIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS DE BOGOTÁ 3-1

3.1 REVISIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ. 3-1
3.1.1 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ, MZSB (INGEOMINAS - UNIANDES, 1997) 3-1
3.1.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ (SIRE) 3-2
3.1.3 REGISTROS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOTÉCNICO SISGEO DE LA EAAB 3-2
3.1.4 MODELO GEOTÉCNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ (NUMERAL 2) 3-2
3.1.5 PROYECTO METRO 3-2
3.1.6 ESTUDIOS REALIZADOS POR EMPRESAS DE CONSULTORÍA PRIVADAS 3-2
3.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA 3-3
3.3 SECCIONES DE ANÁLISIS 3-3
3.3.1 SECCIÓN 1 CALLE 162 3-3
3.3.2 SECCIÓN 2 CALLE 72 3-4
3.3.3 SECCIÓN 3 CALLE 34 3-4
3.3.4 SECCIÓN 4 RÍO TUNJUELO 3-5
3.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS ESTÁTICOS 3-5
3.5 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DINÁMICOS 3-6
3.5.1 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE, VS 3-6
3.5.2 MODULO DE CORTE MÁXIMO, $G_{MÁX}$ 3-7
3.5.3 VARIACIÓN DEL MODULO DE CORTE NORMALIZADO ($G/G_{MÁX}$) Y EL AMORTIGUAMIENTO (B) CON LA DEFORMACIÓN POR CORTE (γ) 3-8
3.6 ACELEROGRAMAS REPRESENTATIVOS 3-8
3.6.1 FUENTE CERCANA 3-8

3.6.2 FUENTE FRONTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL 3-9
3.6.3 FUENTE LEJANA 3-9

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 4-1

4.1 SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA UNIDIMENSIONAL 4-1
4.1.1 INFLUENCIA DEL ESPESOR Y NÚMERO DE ESTRATOS 4-1
4.1.2 INFLUENCIA EN LA VARIACIÓN DE LAS CURVAS DINÁMICAS 4-1
4.1.3 INFLUENCIA EN LA VARIACIÓN DEL MODULO DE CORTE. 4-2
4.2 SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA BIDIMENSIONAL 4-4
4.2.1 INFLUENCIA DE LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL EN DIFERENTES PROGRAMAS DE COMPUTADOR 4-4
4.2.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA 4-6
4.2.3 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL BASAMENTO ROCOSO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS 4-7
4.2.4 INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS EN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA 4-8

5 ANÁLISIS DE RESPUESTA DINÁMICA BIDIMENSIONAL 5-1

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE 5-1
5.1.1 MODELO GID - DSUN 5-1
5.1.2 QUAD4M 5-1
5.1.3 GEOSLOPE – QUAKE/W 5-2
5.1.4 FLAC3D 5-2
5.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO 5-3
5.2.1 ESPECTROS DE ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTO 5-4
5.3 RELACIONES ESPECTRALES 5-4
5.4 COMPARACION DE LA RESPUESTA DE AMPLIFICACIÓN DE LOS PROGRAMAS QUAKE Y QUADAM CON BASE EN DATOS MEDIDOS EN CAMPO. 5-6
5.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA 5-7
5.6 ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE. RESULTADOS DE QUAD4M 5-7
5.7 ESPECTROS DE ACELERACIÓN. QUAD4M 5-8

6 ESPECTROS DE DISEÑO PROPUESTOS 6-1

6.1 ESTIMACION DE ESPECTROS DE DISEÑO A PARTIR DE ANÁLISIS DE RESPUESTA Y REGISTROS DE ACELERACIÓN 6-1
6.1.1 APROXIMACIÓN A LOS ESPECTROS DE DISEÑO 6-5
6.1.2 DEFINICIÓN DE ZONAS 6-7
6.2 PROPUESTA APARTIR DE UN METODO RACIONAL DE COMBINACION DE ESPECTROS 6-9
6.2.1 METODOLOGÍA 6-10
6.2.2 AMENAZA AGREGADA Y PERIODOS DE RETORNO 6-16
6.2.3 AMENAZA DESAGREGADA Y PERIODO DE RETORNO 6-17
6.2.4 ESPECTRO DE DISEÑO POR ZONA Y POR FUENTE 6-20
6.2.5 COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO Y CONCLUSIONES 6-23
6.2.6 LIMITACIONES 6-31

7 CONCLUSIONES 7-1

8 LIMITACIONES 8-1

9 RECOMENDACIONES 9-1

10 REFERENCIAS 10-1

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Puntos de Análisis Zona 1
Tabla 2.2 Puntos de Análisis Zona 2
Tabla 2.3 Puntos de Análisis Zona 3
Tabla 2.4 Puntos de Análisis Zona 4
Tabla 2.5 Puntos de Análisis Zona 5
Tabla 2.6. Puntos de Análisis. Transición 1 y 2
Tabla 2.7. Puntos de Análisis. Transición 2 y 3
Tabla 2.8. Puntos de Análisis. Transición 3 y 4
Tabla 2.9. Puntos de Análisis. Transición 2 y 5
Tabla 2.10. Puntos de Análisis clase A, B, C por zonas.
Tabla 2.11. Total Puntos de Análisis
Tabla 2.12. Procedimiento para hallar el Modulo Eo
Tabla 2.13. **Valores obtenidos por medio del ajuste dado por la expresión 4. Tomado de Hardin y Drnevich (1972)
Tabla 2.14 Procedimiento para hallar los perfiles de Vs supuestos
Tabla 2.15. Puntos de la línea de Tendencia de la Normalización.
Tabla 2.16. Ecuaciones de los cuatro tramos de la Línea de Tendencia según el rango de deformaciones.
Tabla 2.17. Parámetros del modelo de ajuste del semivariograma para la profundidad de roca.
Tabla 2.18. Parámetros del modelo de ajuste del semivariograma para el espesor de la formación Sabana.
Tabla 3.1. Propiedades dinámicas de los materiales
Tabla 3.2. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 1
Tabla 3.3. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 2
Tabla 3.4. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 3
Tabla 3.5. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 4
Tabla 3.6. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 5
Tabla 3.7. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 6
Tabla 3.8. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 7
Tabla 3.9. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 8
Tabla 3.10. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 9
Tabla 3.11. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 10
Tabla 3.12. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 11
Tabla 3.13. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 12
Tabla 3.14. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 13
Tabla 3.15. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 14
Tabla 3.16. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 15

Tabla 3.17. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 16
Tabla 3.18. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 17
Tabla 3.19. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 18
Tabla 3.20. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 19
Tabla 3.21. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 20
Tabla 3.22. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 21
Tabla 3.23. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 22
Tabla 3.24. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 23
Tabla 3.25. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 24
Tabla 3.26. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 25
Tabla 3.27. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 26
Tabla 3.28. Variación del modulo de corte normalizado y el amortiguamiento con la deformación por corte – Material 27
Tabla 3.29. Parámetros a cumplir por sismos según la Fuente Sismogénica
Tabla 3.30. Acelerogramas utilizados en la modelación
Tabla 4.1. Incrementos y rangos de velocidad de onda
Tabla 5.1. Discretización de las mallas de las secciones de análisis para QUAD4M y FLAC3D
Tabla 5.2. Discretización de las mallas de las secciones de análisis para QUAKE
Tabla 6.1. Registros del sismo de Sativasur
Tabla 6.2 Localización de estaciones
Tabla 6.3. Parámetros de los espectros de diseño propuestos.
Tabla 6.4. Número de Espectros por Fuente y por Zona
Tabla 6.5. Características de Fuentes
Tabla 6.6. Amenaza Sísmica- Registro Histórico RH y EGASC-1996
Tabla 6.7. Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones y Fuentes Agregadas
Tabla 6.8. Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones y Fuentes Agregadas
Tabla 6.9. Parámetros Gutenberg-Richter para las Fuentes Sismogénicas
Tabla 6.10. Períodos de Retorno para Magnitudes Generadoras de Aceleraciones
Tabla 6.11. Períodos de Retorno y Factores con Magnitudes Ms
Tabla 6.12. Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones y Fuentes Agregadas
Tabla 6.13. Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones y Fuentes Desagregadas
Tabla 6.14. Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones
Tabla 6.15. Períodos de Retorno y Factores
Tabla 6.16. Períodos de Retorno y Factores de Proporción Finales
Tabla 6.17. Espectros procesados para la Zona 1
Tabla 6.17. Espectros procesados para la Zona 2
Tabla 6.18. Espectros procesados para la Zona 3
Tabla 6.19. Espectros procesados para la Zona 4
Tabla 6.20. Espectros procesados para la Zona 5
Tabla 6.21. Parámetros de Espectros Propuestos
Tabla 6.22. Parámetros Espectrales Propuestos para Reglamentación
Tabla 6.23. Comparación de Parámetros Espectrales- Zona 1- Cerros
Tabla 6.24. Comparación de Parámetros Espectrales- Zona 2- Piedemonte
Tabla 6.25. Comparación de Parámetros Espectrales- Zona 3- Lacustre A
Tabla 6.26. Comparación de Parámetros Espectrales- Zona 4- Lacustre B

Tabla 6.27. Comparación de Parámetros Espectrales- Zona 5- Terrazas y Conos
Tabla 6.28. Sismos Históricos con Intensidad IMM > VI
Tabla 6.29. Sismos Históricos con Intensidad IMM > VI
Tabla 6.30. Sismos Históricos con aR > 0.05g

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Geomorfología y origen de los suelos de la Sabana. Bloque Diagrama de las fases de depositación en la Sabana inferidas de los cambios estratigráficos en la perforación Funza 2 (Torres et al, 2005)
Figura 2.2 Geomorfología y origen de los suelos de la Sabana. Bloque Diagrama de las fases de depositación en la Sabana inferidas de los cambios estratigráficos en la perforación Funza 2 (Torres et al, 2005)
Figura 2.3 Propiedades de suelos típicas en el norte de Bogotá. De izquierda a derecha y de arriba abajo. Límites de consistencia, índice de plasticidad y humedad natural. Índice de recompresión (a partir de correlaciones y ensayos de consolidación), Módulo edométrico en KPa para presión de referencia de 100 kPa, relación de vacíos, Índice de recompresión (a partir de correlaciones y ensayos de consolidación), peso unitario total (kN/m3).
Figura 2.4 Resultados de down hole. Se aprecia de izquierda a derecha la variación del perfil de VS a medida que se aleja del piedemonte de los cerros de Suba hacia la parte mas profunda del valle. Se aprecia la presencia de los suelos más rígidos superficiales, y como se va profundizando el comienzo de los suelos arenosos más rígidos de la formación Subachoque.
Figura 2.5. Variación típica de las propiedades índice con la profundidad (zonas 3 y 4)
Figura 2.6. Variación típica de la humedad y del índice de plasticidad con la profundidad (zonas 3 y 4)
Figura 2.7. Variación típica de la relación de vacíos con la profundidad (zonas 3 y 4)
Figura 2.8. Variación del peso unitario con la profundidad (zonas 3 y 4)
Figura 2.9. Correlaciones entre las propiedades índice y el índice de plasticidad (zonas 2, 3 y 4)
Figura 2.10. Correlación entre la relación de vacíos y el índice de plasticidad
Figura 2.11. Elab / Ecam normalizado por el Ecam, por zonas de la microzonificación sísmica
Figura 2.12. Elab / Ecam normalizado por el Ecam, por clasificación usc
Figura 2.13. Eo (lab)/Eo (campo) contra Eo (campo) de los ensayos triaxiales cíclicos realizados para estudios de respuesta local en Bogotá, comparación con las tendencias encontradas por Kokoshu (1987).

Figura 2.14. Correlación entre K y el índice de plasticidad (Tomada de Rodriguez y Escallón, 2006 a)

Figura 2.15. Correlación de los ensayos down hole y SPT
Figura 2.16. Datos de Vs obtenidos de ensayos down hole (rombos), datos de Vs correlación suelos granulares zona de piedemonte (cuadrados), y datos de Vs correlación GEC (triángulos).
Figura 2.17.Perfil de Vs supuesto del punto de análisis Z3.20
Figura 2.18 Comparación curva teórica (Ishibashi y Zang) y curva resultado del ensayo triaxial; para la muestra 3 del punto de análisis.
Figura 2.19 Comparación curva teórica (Ishibashi y Zang) y curva resultado del ensayo triaxial; para la muestra 3 del punto de análisis.
Figura 2.20. Normalización Curvas de Rigidez. Ensayos triaxiales Universidad Javeriana.
Figura 2.21. Normalización Curvas de Rigidez. Ensayos triaxiales Universidad de los Andes.
Figura 2.22. Normalización Curvas de Rigidez. Todos los Ensayos
Figura 2.23. Normalización Curvas de Rigidez.Tendencia
Figura 2.24. Normalización Curvas de la Relación de Amortiguamiento. Ensayos triaxiales Universidad de los Andes.
Figura 2.25..Normalización Curvas de la Relación de Amortiguamiento. Ensayos triaxiales Universidad Javeriana.
Figura 2.26. Normalización Curvas de la Relación de Amortiguamiento. Todos los Ensayos
Figura 2.27. Variación de los espesores total y de la formación Sabana en dirección norte
Figura 2.28. Variación de los espesores total y de la formación Sabana en dirección este

Figura 2.29. Semivariogramas experimentales de la profundidad de roca y su respectivo modelo de ajuste. a) Dirección NS b) Dirección N30E c) Dirección N60E d) Dirección EW

Figura 2.30. Semivariogramas experimentales de la profundidad de roca y su respectivo modelo de ajuste. a) Dirección NS b) Dirección N30E c) Dirección N60E d) Dirección EW

Figura 2.31. Mapa de profundidad de roca para la ciudad de Bogotá.
Figura 2.32. Mapa de espesor de la formación Sabana para la ciudad de Bogotá.
Figura 3.1. Esquema de localización de las secciones de análisis

Figura 3.2. Curvas de Reducción del Modulo de Corte

Figura 3.3. Curvas de Amortiguamiento

Figura 3.4. Acelerograma Sismo Oroville Fuente Cercana
Figura 3.5. Acelerograma Sismo Coyote Fuente Cercana
Figura 3.6. Acelerograma Sismo Mamoth Fuente Cercana
Figura 3.7. Acelerograma Sismo Coalinga Fuente Cercana
Figura 3.8. Acelerograma Sismo Umbría Fuente Cercana
Figura 3.9. Acelerograma Sismo La Uribe Fuente Cercana
Figura 3.10. Acelerograma Sismo Yerbabuena Fuente Frontal
Figura 3.11. Acelerograma Sismo Mt. Baldy Fuente Frontal
Figura 3.12. Acelerograma Sismo Deer Canyon Fuente Frontal
Figura 3.13. Acelerograma Sismo Newport Fuente Frontal
Figura 3.14. Acelerograma Sismo Okayama Fuente Frontal
Figura 3.15. Acelerograma Sismo México CU01 Fuente Lejana
Figura 3.16. Acelerograma Sismo México CUIP Fuente Lejana
Figura 3.17. Acelerograma Sismo México CUMV Fuente Lejana
Figura 3.18. Espectros Tripartita para los Sismos de Fuente Cercana
Figura 3.19. Espectros Tripartita para los Sismos de Fuente Frontal
Figura 3.20. Espectros Tripartita para los Sismos de Fuente Lejana
Figura 4.1. Perfil de Propiedades índice y de velocidad de onda. Calle 46 con calle 140a
Figura 4.2. Ilustración de la configuración del número y espesor de estratos supuestos. Modelo 1
Figura 4.3. Ilustración de la configuración del número y espesor de estratos supuestos. Modelo 2 al 9
Figura 4.4. Ilustración de la configuración del número y espesor de estratos supuestos. Modelo 10 al 15
Figura 4.5. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.6. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.7. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.8. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.9. Perfil de propiedades índice típico de la formación Sabana y Chia
Figura 4.10. Curva promedio, promedio más desviación estandar y promedio menos desviación de la degradación de la rigidez y el amortiguamiento
Figura 4.11. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.12. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.13. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.14. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.15. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.16. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.17. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.18. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.19. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.20. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.21. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.22. Sección de prueba para el análisis de sensibilidad Bidimensional
Figura 4.23. Espectros de Aceleración en la componente en X

Figura 4.24. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.25. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.26. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.27. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.28. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.29. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.30. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.31. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.32. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.33. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.3. Espectros de Aceleración en la componente en X
Figura 4.35. Variación de la relación de amortiguamiento versus la frecuencia natural del sistema
Figura 4.36. Secciones de análisis de sensibilidad a las condiciones de frontera en los Cerros de Suba Modelo de análisis sección (arriba), modelo de análisis sección con el perfil hacia el occidente (abajo)
Figura 4.37. Comparación de espectros para un mismo punto en dos modelos analizando las condiciones de frontera en los Cerros de Suba
Figura 4.38. Sección de Análisis de Sensibilidad a las condiciones de frontera para los cerros orientales
a. Modelo de análisis sección 1 (arriba). b. Modelo de análisis extendido
Figura 4.39. Comparación de espectros para dos puntos iguales en dos modelos de los cerros orientales analizados
Figura 4.40. Modelo de análisis 1
Figura 4.41. Modelo de análisis 2
Figura 4.42. Modelo de análisis 3
Figura 4.43. Espectros de respuesta para los modelos de análisis 1 y 2
Figura 4.44. Espectros de respuesta para los modelos de análisis 2 y 3
Figura 4.45. Punto en zona de piedemonte. Sismo campo cercano
Figura 4.46. Punto en zona de piedemonte- Sismo campo intermedio
Figura 4.47. Punto en zona de piedemonte. Sismo campo lejano
Figura 4.48. Punto en zona lacustre. Sismo campo cercano
Figura 4.49. Punto en zona lacustre. Sismo campo cercano
Figura 4.50. Punto en zona lacustre. Sismo campo intermedio
Figura 5.1 Materiales Sección 1. Cerros Orientales
Figura 5.2 Materiales Sección 1. Zona Lacustre
Figura 5.3 Materiales Sección 1. Cerros Suba
Figura 5.4. Materiales Sección 2. Cerros Orientales
Figura 5.5. Materiales Sección 2. Zona Lacustre
Figura 5.6. Materiales Sección 2. Zona Lacustre Occidental
Figura 5.7. Materiales Sección 3. Cerros Orientales
Figura 5.8. Materiales Sección 3. Zona Lacustre
Figura 5.9. Materiales Sección 4. Cerros Orientales
Figura 5.10 Materiales Sección 4. Zona de Trasición
Figura 5.11. Materiales Sección 4. Zona de Terrazas y Conos aluviales del Tunjuelo
Figura 5.12a. Malla Sección 1 Cerros Orientales. Quad4M y Flac3D
Figura 5.12b. Malla Sección 1 Cerros Orientales. Quake
Figura 5.13a. Malla Sección 1 Zona Lacustre. Quad4M y Flac3D
Figura 5.13b. Malla Sección 1 Zona Lacustre. Quake
Figura 5.14a. Malla Sección 1 Cerros de Suba. Quad4M y Flac3D
Figura 5.14b. Malla Sección 1 Cerros de Suba. Quake
Figura 5.15a. Malla Sección 2 Cerros Orientales. Quad4M
Figura 5.15b. Malla Sección 2 Cerros Orientales. Quake
Figura 5.16a. Malla Sección 2 Zona Lacustre. Quad4M
Figura 5.16b. Malla Sección 2 Zona Lacustre. Quake
Figura 5.17a. Malla Sección Zona Lacustre Occidental. Quad4M
Figura 5.17b. Malla Sección Zona Lacustre Occidental. Quake
Figura 5.18a. Malla Sección 3 Zona Cerros Orientales. Quad4M
Figura 5.18b. Malla Sección 3 Zona Cerros Orientales. Quake

Figura 5.19a. Malla Sección 3 Zona Lacustre. Quad4M
Figura 5.19b. Malla Sección 3 Zona Lacustre. Quake
Figura 5.20. Para T< 0.5 seg para sismos cercanos e intermedios en todas las zonas. Zonas de cerros y piedemonte
Figura 5.21. Para T< 0.5 seg para sismos cercanos e intermedios en todas las zonas
Zonas de cerros y piedemonte. Ver Figura 5.21
Figura 5.22. Para T< 2.0 seg para sismos intermedios en la zonas 3 y 4. Ver Figura 5.22
Figura 5.23. Para T< 1.5 seg para sismos cercanos en las zonas 3 y 4. Ver Figura 5.23
Figura 5.24. Para T< 1.3 seg para sismos lejanos en las zonas 3 y 4. Ver Figura 5.24
Figura 5.25. T > 0.5 seg para sismos cercanos en la zona de piedemonte. Ver Figura 5.25
Figura 5.26. Para T > 1.5 - 2.0 para sismos cercanos e intermedios (último pico respuesta del deposito); en la zonas 3 y 4 . Ver Figura 5.26
Figura 5.27. Para todo T en las zonas de piedemonte.
Figura 5.28. Sección de Análisis para Validación de Resultados
Figura 5.29 Acelerograma instrumentado
Figura 5.30 Modelo de análisis
Figura 5.31 Comparación de resultados de SI, articulo, quad4M y Quake
Figura 6.1. Localización de las estaciones de registro acelerográfico de la red de Bogotá
Figura 6.2. Registros de Aceleración Norte – Sur. Colegio San Bartolomé
Figura 6.3. Registros de Aceleración Vertical. Colegio San Bartolomé
Figura 6.4. Registros de Aceleración Este – Oeste. Colegio San Bartolomé
Figura 6.5. Componentes de Aceleración Norte – Sur V. Colegio San Bartolomé
Figura 6.6. Componentes de Aceleración Este – Oeste V. Colegio San Bartolomé
Figura 6.7. Registros de Aceleración Norte – Sur. Academia de Policía Suba
Figura 6.8. Registros de Aceleración Vertical. Academia de Policía Suba
Figura 6.9. Registros de Aceleración Este – Oeste. Academia de Policía Suba
Figura 6.10. Componentes de Aceleración Norte – Sur V. Academia de Policía Suba
Figura 6.11. Componentes de Aceleración Este – Oeste V. Academia de Policía Suba
Figura 6.12. Registros de Aceleración Norte – Sur. Universidad de La Salle
Figura 6.13. Registros de Aceleración Vertical. Universidad de La Salle
Figura 6.14. Registros de Aceleración Este – Oeste. Universidad de La Salle
Figura 6.15. Componentes de Aceleración Norte – Sur V. Universidad de La Salle
Figura 6.16. Componentes de Aceleración Este - Oeste V. Universidad de La Salle
Figura 6.17. Registros de Aceleración Norte – Sur. Universidad Corpas
Figura 6.18. Registros de Aceleración Vertical. Universidad Corpas
Figura 6.19. Registros de Aceleración Este – Oeste. Universidad Corpas
Figura 6.20. Componentes de Aceleración Norte – Sur V. Universidad Corpas
Figura 6.21. Componentes de Aceleración Este – Oeste V. Universidad Corpas
Figura 6.22. Registros de Aceleración Norte – Sur. Escuela Colombiana de Ingeniería
Figura 6.23. Registros de Aceleración Vertical. Escuela Colombiana de Ingeniería
Figura 6.24. Registros de Aceleración Este – Oeste. Escuela Colombiana de Ingeniería
Figura 6.25. Componentes de Aceleración Norte - Sur V. Escuela Colombiana de Ingeniería
Figura 6.26. Componentes de Aceleración Este – Oeste V. Escuela Colombiana de Ingeniería
Figura 6.27. Registros de Aceleración Norte – Sur. Avianca
Figura 6.28. Registros de Aceleración Vertical. Avianca
Figura 6.29 Registros de Aceleración Este – Oeste. Avianca
Figura 6.30 Componentes de Aceleración Norte - Sur V. Avianca
Figura 6.31. Componentes de Aceleración Este – Oeste V. Avianca
Figura 6.32. Amplificación del depósito en las diferentes estaciones para los tres componentes y el valor absoluto total, en términos de los valores característicos de amplitud de la señal
Figura 6.33. Amplificación del depósito en las diferentes estaciones para los tres componentes y el valor absoluto total en términos de amplificación con respecto al valor en roca
Figura 6.34. Espectros de respuesta elásticos de aceleración para 5% amortiguamiento
Figura 6.35. Espectros de respuesta elásticos de desplazamientos para 5% amortiguamiento
Figura 6.36. Relación de ordenadas espectrales con respecto a los valores de la estación San Bartolomé
Figura 6.37. Información disponible para los espectros de las zonas 1 y 2

Figura 6.38. Información disponible para los espectros de la zona 3
Figura 6.39. Información disponible para los espectros de la zona 4
Figura 6.40. Información disponible para los espectros de la zona 5
Figura 6.41. Resumen de los espectros obtenidos en esta sección.
Figura 6.42. Resultados de análisis y envolvente estimada con los datos de la zona 1
Figura 6.43. Resultados de análisis y envolvente estimada con los datos de la zona 2
Figura 6.44. Resultados de análisis y envolvente estimada con los datos de la zona 3
Figura 6.45. Resultados de análisis y envolvente estimada con los datos de la zona 4
Figura 6.46. Resultados de análisis y envolvente estimada con los datos de la zona 5
Figura 6.47. Datos de Vs medidos en ensayos de Down Hole para la zona 3
Figura 6.48. Datos de Vs medidos en ensayos de Down Hole para la zona 4
Figura 6.49. Datos de Vs medidos en ensayos de Down Hole para la zona 5
Figura 6.50. Calibración Aproximada- Sismo de Tauramena (1995)
Figura 6.51. Registro Histórico- Amenaza Sismica para Bogotá
Figura 6.52. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica Agregada
Figura 6.53. Registro Histórico- Amenaza Sismica Cercana para Bogotá
Figura 6.54. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica - Períodos de Retorno Ms Fuentes
Figura 6.55. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica Desagregada
Figura 6.56. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica - Períodos de Retorno Aceleraciones
Figura 6.57. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica - Valores Finales Anuales
Figura 6.58. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica - Valores Finales a 50 años
Figura 6.59. Bogotá- Proporción de Amenaza Sismica - Valores Finales Adoptados
Figura 6.60. Bogotá- Espectros de Velocidades de Diseño- Parámetros
Figura 6.61. Bogotá- Espectros de Aceleraciones de Diseño- Parámetros
Figura 6.62. Zona 1- Espectros en Diagrama Tripartita
Figura 6.63. Zona 1- Espectros de Aceleración- Promedio y Promedio+Estándar
Figura 6.64. Zona 1- Espectros de Aceleración- Promedio y Diseño
Figura 6.65. Zona 2- Espectros en Diagrama Tripartita
Figura 6.66. Zona 2- Espectros de Aceleración- Promedio y Promedio+Estándar
Figura 6.67. Zona 2- Espectros de Aceleración- Promedio y Diseño
Figura 6.68. Zona 3- Espectros en Diagrama Tripartita
Figura 6.69. Zona 3- Espectros de Aceleración- Promedio y Promedio+Estándar
Figura 6.70.
Figura 6.71. Zona 4- Espectros en Diagrama Tripartita
Figura 6.72. Zona 4- Espectros de Aceleración- Promedio y Promedio+Estándar
Figura 6.73. Zona 4- Espectros de Aceleración- Promedio y Diseño
Figura 6.74. Zona 5- Espectros en Diagrama Tripartita
Figura 6.75. Zona 5- Espectros de Aceleración- Promedio y Promedio+Estándar
Figura 6.76. Zona 5- Espectros de Aceleración- Promedio y Diseño
Figura 6.77. Espectros de Aceleración Propuestos
Figura 6.78. Espectros de Velocidad Propuestos
Figura 6.79. Espectros de Velocidad Propuestos
Figura 6.80. Espectros de Desplazamiento- Aceleración Propuestos
Figura 6.81. Comparación de Espectros- Zona 1- Cerros
Figura 6.82. Comparación de Espectros- Zona 2- Piedemonte
Figura 6.83. Comparación de Espectros- Zona 3- Lacustre A
Figura 6.84. Comparación de Espectros- Zona 4- Lacustre B
Figura 6.85. Comparación de Espectros- Zona 5- Terrazas y Conos
Figura 6.86. Aceleraciones Máximas Anuales y Sismos Significativos
Figura 6.87. Localización de Epicentros de Sismos Significativos (INGEOMINAS, 2000)
Figura 6.88. Evento Cercano Reciente- 01-Oct-2005 (INGEOMINAS, 2005)
Figura 6.89. Zona de Subducción de Guerrero (Manea, 2004)
Figura 6.90. Zona de Subducción del Pacífico Colombiano (Taboada et al, 2000)
Figura 6.91. Atenuación Sismo de Michoacán -1985 (UNAM, 1987)
Figura 6.92. Atenuación Sismos de Tumaco -1906 y 1979 (Dimaté et al, 2005)
Figura 6.93. Modelo de Placas de Colombia (Taboada et al, 2000)

Figura 6.94. Modelo de Placas de Colombia (Corredor et al, 2000)

1 GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias suscribió un convenio de cooperación interinstitucional con la Sociedad Colombiana de Geotecnia denominado "Modelo Geotécnico y Caracterización Dinámica Bidimensional de los suelos de Bogotá"

Los objetivos planteados son:

- Proponer un modelo geotécnico para la ciudad, que integre la información de las características estáticas y dinámicas recopiladas por la DPAE y de estudios adicionales de respuesta dinámica de que disponga la SCG.

- Evaluar mediante análisis bidimensionales la respuesta sísmica del suelo en secciones representativas que se extiendan desde la Zona 1 hasta la Zona 5 de la Microzonificación Sísmica.

- Hacer la revisión de la Microzonificación Sísmica vigente para la ciudad de Bogotá y presentar una propuesta sustentada de actualización de la misma considerando espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento.

1.2 ANTECEDENTES

Durante los años 1993 a 1997 se desarrolló el proyecto de Microzonificación Sísmica, cuyos resultados fueron adoptados mediante el Decreto 074 de Enero de 2001. En los últimos 6 años, compañías de consultoría, universidades y algunas entidades públicas, han realizado estudios aislados del comportamiento dinámico del suelo que constituyen un insumo importante para la actualización de los espectros de diseño requeridos para las diferentes zonas de la ciudad de Bogotá. La DPAE mediante resolución No 058 del 11 de marzo de 2005, conformó un grupo de trabajo con especialistas altamente reconocidos en el tema, a partir del consenso de dicho grupo se han propuesto las actividades necesarias para la actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, dentro de las cuales se incluye el presente trabajo. Como primer resultado del grupo de trabajo, la DPAE presentó a la Comisión del Código de Construcciones de Bogotá una propuesta de modificaciones al Decreto 074 de 2001, las cuales fueron aprobadas y se establecieron en el Decreto 193 de 2006.

De acuerdo con el estado del arte la modelación numérica del fenómeno sísmico, es un proceso complejo con limitaciones e incertidumbres derivadas del nivel de información del subsuelo, las hipótesis del evento sísmico, las metodologías y los modelos matemáticos, entre otros. Por ello

la revisión de los espectros de diseño exige una aproximación desde diferentes enfoques metodológicos y modelos matemáticos a efectos de contar con resultados comparables que permitan realizar un análisis de sensibilidad y sobre ello tomar decisiones finales de actualización.

Para tal efecto la DPAE ha celebrado convenios con la Asociación de Ingeniería Sísmica para realizar análisis unidimensionales, y con la Universidad de Los Andes que utilizará la metodología de amenaza uniforme para el análisis de respuesta dinámica. La Sociedad Colombiana de Geotecnia llevará a cabo análisis bidimensionales para la caracterización de la respuesta.

1.3 METODOLOGÍA

La metodología que se planteó se basa en utilizar de la mejor manera posible la información que se logró recuperar de estudios realizados en la ciudad e información de referencia reportada en la literatura técnica internacional pertinente. El alcance de los trabajos no contempló la realización de exploración o ensayos adicionales, ni el desarrollo de nuevas teorías o enfoques.

1.3.1 Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá

El modelo geotécnico tiene como propósito establecer un marco de referencia común para los estudios de respuesta dinámica a realizar con las tres metodologías relacionadas en el numeral anterior. Este modelo requiere por lo tanto de definición de valores de rigidez dinámica a bajas deformaciones en términos de la velocidad de propagación de ondas de corte (Vs) para todo el perfil de suelos en profundidad hasta la roca. Como no existe información a profundidades mayores de 50 m o en muy pocos casos 100m, y los depósitos pueden alcanzar profundidades de hasta 500 m o más, se requieren de criterios para poder definir el espesor de las principales formaciones y evaluar sus propiedades de rigidez. Para lograr definir criterios de extrapolación se utilizó un modelo conceptual general basado en consideraciones geomorfológicas y geológicas y los datos se evaluaron a partir de la información disponible de la ciudad y valores de referencia.

Por otra parte es necesario establecer criterios para definir las curvas de variación de rigidez y amortiguamiento con la deformación. Dado que se debía trabajar con al información disponible de ensayos ya realizados el enfoque utilizado fue el de comparar todos los datos disponibles con respecto a una formulación empírica reportada en al literatura técnica que relaciona la variación de la rigidez y el amortiguamiento con al deformación en función del tipo de suelos expresado en términos del índice de plasticidad y del esfuerzo de confinamiento. Estos son los aspectos internacionalmente reconocido s como los principales factores que determinan la rigidez al corte de los suelos. Posteriormente se analizaron los resultados normalizados con el fin de establecer su consistencia con las funciones previstas, buscando identificar posibles causas para las diferencias que se obtuvieron. Finalmente se adoptaron recomendaciones empíricas conservadoras de orden práctico para la definición de las curvas de rigidez y amortiguamiento. Esta selección se hizo en el marco del trabajo del comité creado por la

resolución No 058 del 11 de marzo de 2005. Esta información fue adoptada y suministrada por la DPAE para la realización de los estudios de respuesta por parte de la Universidad de los Andes, AIS y la SCG.

1.3.1.1 Modelo general conceptual de los suelos de la sabana de Bogotá

El modelo general conceptual se basa en la consideración de que los suelos en la zona plana de la Sabana, donde las profundidades de suelos son mayores a 50m donde no se tiene información de perforaciones, en general corresponde a dos formaciones claramente diferenciables por su origen, tipo y estado de materiales a saber: la Formación Sabana que se encuentra superficialmente, formada por depósitos de suelos finos blandos de alta plasticidad y origen lacustre, y la Formación Subachoque formada por suelos de origen aluvial conformados por estratos de mezclas de arcillas y arenas predominantemente. Los valores de Vs se pueden correlacionar con variables de estado según el origen (y tipo) de los suelos. El trabajo buscó establecer estas correlaciones con diferente grado de detalle de acuerdo con la información disponible con el fin de poder estimar la variación y rangos de valores de Vs, en particular con la profundidad (o niveles de esfuerzos), y tipo de materiales.

Por otra parte, es necesario estimar la profundidad o espesor de las dos formaciones. Con respecto a esto se consideró el hecho de que por su origen los depósitos aluviales presentan pendientes características a lo largo de las cuencas de depositación. A partir de los datos disponibles de profundidad de las formaciones en algunos puntos de control se estimaron las pendientes características del depósito aluvial y con base en esto se estimaron los espesores, o la profundidad del tope de la formación Subachoque como una proporción de la profundidad total de los depósitos. La profundidad a la roca se había estimado en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá. Esta información se utilizó como base de referencia pero se complementó con datos recopilados de estudios geológicos e hidrogeológicos y con la información disponible de los estudios de respuesta local. A partir de esta información se utilizaron técnicas de geoestadística para producir planos para la profundidad de la roca y de la formación sabana que se pueden utilizar como indicativos para la realización de estudios de respuesta dinámica en donde no se tenga información de perforaciones profundas.

Las anteriores consideraciones como ya se dijo se hicieron para definir criterios de extrapolación en las zonas de suelos profundos. En las zonas perimetrales del antiguo lago de la sabana, donde predominan depósitos de ladera o torrenciales y aluviales de alta variabilidad tanto en profundidad como lateralmente, y donde los espesores de suelos no son muy grandes, las anteriores consideraciones no son aplicables. No se considera que sea factible desarrollar criterios de extrapolación con base en al información disponible. Sería necesario tener estudios muy detallados de paleo-micro-cuencas para pretender una zonificación más detallada para lo cual no existe suficiente información. Para estas zonas de piedemonte se deben considerar las condiciones locales particulares en los sitios donde se tiene información y se considera que se deben adoptar valores de envolventes para diseño general con al posibilidad de que estudios locales particulares con suficiente información para establecer las variaciones locales puedan ser utilizados para ajustar los valores de diseño para proyectos específicos.

1.3.1.2 Recopilación y clasificación de la información de suelos con base a estudios ya realizados

La información recopilada incluyó los estudios de respuesta dinámica local realizados por consultores y revisados por la DPAE, información de estudios geotécnicos recopilada y suministrada por la DPAE y otros estudios de respuesta local, estudios geotécnicos, geológicos e hidrogeológicos recopilados por la SCG. Se realizó una base de datos que fue depurada y organizada para realizar los siguientes estimativos:

- Estratigrafía y caracterización de Vs (ensayos de Down Hole)

Estratigrafía por zonas (perfiles típicos)

Rangos y Variabilidad de los valores de Vs

Variación de Vs con la profundidad (efecto de los niveles de esfuerzos)

Relación entre Vs y otros parámetros de clasificación básica de suelos (tipo de suelos, plasticidad, estado : peso unitario y humedad – relación de vacíos)

- Caracterización de los ensayos de laboratorio (curvas de degradación dinámica de rigidez y amortiguamiento)

Recopilación de datos de rigidez dinámica (Go o Eo) y deformación en función del número de ciclos, presión de confinamiento y niveles de deformación.

Evaluación de representatividad de los ensayos: relación Go campo – Go Lab.

Validación de la consistencia de datos de los ensayos Triaxial y Bender Element

Evaluación de variación de G/Go con la presión de confinamiento

Validación de datos con respecto a referentes internacionales

Valores de G o G/Go para los rangos de deformaciones de interés.

1.3.1.3 Zonificación espacial

- Criterios para zonificación. Como ya se indicó en la descripción del modelo conceptual general, la zonificación espacial se puede hacer en función de la profundidad estimada de las formaciones principales para lo cual se presentan los planos de profundidad de la formación Sabana y de la roca.

- Identificación de la distribución espacial de las zonas: límites y limitaciones (zonas de incertidumbre). Con respecto a los resultados de los análisis de respuesta estos se refieren a las zonas vigentes de los decretos reglamentarios de la zonificación sísmica de Bogotá. Las secciones de análisis se definieron con el análisis de toda la información disponible para las secciones específicas que se discuten más adelante. Los resultados son característicos de las secciones analizadas y pueden ser representativas de zonas con características similares. Sin embargo las condiciones particulares de topografía de las formaciones y en particular de los estratos dentro de las formaciones principales pueden ser sustancialmente diferentes en otras zonas de la ciudad. Esto se debe tener en cuenta en la formulación de espectros generales de diseño para toda la ciudad. Los alcances de este estudio no incluían la evaluación de cualquier posible situación en al ciudad ya que esto requeriría información que no existe y recursos prácticamente ilimitados de tiempo y personal.

1.3.2 Caracterización Dinámica Bidimensional de los Suelos de Bogotá

1.3.2.1 Recopilación de Información

Con el fin de obtener la mayor cantidad de información geotécnica de la ciudad en lo que respecta a parámetros geotécnicos estáticos y dinámicos, así como también los acelerogramas de diseño, se revisaron los siguientes estudios:

- Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá (numeral 1.3.1)
- Microzonificación Sísmica de Bogotá, MZSB (INGEOMINAS-UNIANDES, 1997)
- Sistema de Información para Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (SIRE)
- Registros del sistema de información geotécnico SISGEO de la EAAB
- Proyecto Metro
- Estudios realizados por Empresas de Consultoría Privadas

1.3.2.2 Caracterización geotécnica estática y dinámica

La información geotécnica, geológica e hidrogeológica recopilada se analizó con técnicas geoestadísticas para establecer los modelos de profundidad de la roca y de la formación Sabana.

Por otra parte la información de perfiles de Vs se estudió estadísticamente para establecer valores representativos de Vs para las diferentes zonas y estimar y sugerir límites de valores promedio de Vs para diferenciar la caracterización de suelos en las diferentes zonas de la zonificación.

Finalmente, con base en la información geotécnica (estática y dinámica) recopilada, se establecieron 4 modelos bidimensionales del subsuelo. Estos modelos se extendieron en sentido oriente – occidente, desde los cerros orientales hasta los cerros de suba en el caso de la sección 1 y 2, y de los cerros orientales hasta el Río Tunjuelo en la sección 3 y 4. Estos modelos permitieron plasmar la secuencia estratigráfica y las propiedades geomecánicas estáticas y dinámicas, representativas de cada material para acometer posteriormente el análisis dinámico.

1.3.2.3 Análisis de sensibilidad

Dado el alto grado de incertidumbre en cuanto a condiciones geológicas, parámetros dinámicos, modelos matemáticos, discretización de los modelos, condiciones de frontera, software, entre otros, se procedió a realizar análisis de sensibilidad para cada una de estas condiciones con el fin de aportar elementos de juicio para la toma de decisiones finales.

1.3.2.4 Modelación bidimensional

Se realizó la discretización del medio continuo del subsuelo con la variación estratigráfica en las secciones de estudio empleando un modelo bidimensional de elementos finitos en el programa QUAD4M (Universidad de California, 1994), el programa QUAKE/W y un modelo tridimensional de diferencias finitas en el programa FLAC3D, para el análisis de la respuesta dinámica local.

1.3.2.5 Análisis de respuesta sísmica local

Con los acelerogramas escogidos para representar la amenaza sísmica, los modelos espaciales del subsuelo, los parámetros geotécnicos (estáticos y dinámicos) y los programas de modelación mencionados, realizaron los respectivos análisis de respuesta dinámica, evaluando las aceleraciones máximas en el perfil y espectros de respuesta.

Los resultados de los modelos se validaron con base en el análisis de señales reales registradas por al red de acelerógrafos de la ciudad para eventos de baja intensidad. A partir de

estos registros se estimó cualitativa y cuantitativamente la respuesta de los depósitos en diferentes zonas de la ciudad. Esto se encontró en coincidencia general con los resultados de los análisis, aunque evidenció resultados exagerados en algunos de los resultados de los análisis. Los resultados registrados son a muy bajas deformaciones y por lo tanto muy altos niveles de amplificación. Para extrapolar estos resultados a condiciones de sismos de diseño de alta intensidad, en los que el efecto del comportamiento no lineal es muy fuerte, se estimó este efecto a partir de los modelos realizados y se corrigieron las funciones de relación espectral obtenidas para sismos pequeños. Esto permitió obtener un estimativo independiente de la repuesta de los suelos para las condiciones de diseño los cuales se utilizaron para estimar una envolvente de respuesta como referencia para la definición de la propuesta de diseño que se hizo como resultado de este trabajo.

2 MODELO GEOTECNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

El primero objetivo del presente estudio correspondió a la elaboración de un modelo geotécnico para la ciudad de Bogotá con el fin de contar con información geotécnica para poder hacer una revisión de la respuesta dinámica de los depósitos de suelos en la ciudad. La DPAE suministró la información disponible de estudios geotécnicos y de respuesta dinámica local. El estudio se realizó con base en esta información; no se hizo ningún tipo de trabajo de campo ni laboratorio adicional.

Con el fin de poder realizar análisis de respuesta dinámica en un sitio se debe contar con la siguiente información:

- Perfil de velocidad de onda de corte Vs, de todo el espesor del depósito
- Perfil de densidad de los materiales en el perfil
- Conocer la variación de la rigidez dinámica y el amortiguamiento con la deformación para los suelos del perfil.

El objetivo del estudio fue dar recomendaciones para determinar tanto el perfil de Vs como la variación de las propiedades dinámicas con la deformación para los sitios donde se tiene información geotécnica en la base de datos de la que se dispuso para el estudio. Para que pueda ser útil de manera general, la determinación de las propiedades dinámicas se debe poder hacer a partir de información geotécnica básica del perfil de suelos en términos del tipo de suelos y el estado inicial de esfuerzos. Esto requiere que se establezcan relaciones entre los parámetros dinámicos de interés y los parámetros básicos de clasificación y estado de los suelos, así como con otros ensayos no dinámicos. Por lo tanto es importante establecer las recomendaciones y limitaciones para el uso de la información geotécnica con el fin de poder definir las propiedades dinámicas.

La información disponible en general se limita a profundidades entre 50 y 100 m, mientras que los perfiles de suelos en general tienen profundidades mayores, llegando a alcanzar hasta 450 m en el área de la ciudad. Esto implica que es necesario extrapolar los parámetros dinámicos en profundidad. Por lo tanto uno de los objetivos particulares del estudio fue el de dar recomendaciones para poder hacer esta extrapolación, lo cual se enfocó desde el punto de vista geomorfológico y mediante calibración de tendencias con base en la información disponible. Se consideró que las propiedades dinámicas deben estar relacionadas con el origen y por lo tanto el tipo de materiales presentes en el perfil de suelos. Desde este punto de vista se diferenciaron las propiedades de los depósitos de piedemonte, depósitos lacustres de la formación Sabana, y depósitos de origen aluvial de la formación Subachoque, que subyacen a

los depósitos lacustres en buena parte del área urbana. Los criterios para este análisis se discutieron en la introducción.

Para poder determinar los perfiles en profundidad es necesario conocer el contacto entre las diferentes unidades de suelos. Para esto se evaluó la variación de los niveles superiores de la formación Subachoque con base en los datos disponibles y se hizo una interpolación espacial en el resto del área considerando que este nivel corresponde al producto de una depositación aluvial.

La información disponible permitió determinar con razonable precisión las tendencias de los parámetros dinámicos de los suelos en el sector norte de la ciudad donde las condiciones de suelos son relativamente uniformes y es donde se encuentra la mayor cantidad de información. A lo largo del piedemonte de los cerros orientales, a partir de la calle 26 aproximadamente, se tiene un buen número de estudios, los cuales sin embargo evidencian la alta variabilidad espacial de las condiciones de suelos en este sector. Los datos permiten tener criterios de caracterización de estos suelos, y tendencias de comportamiento. La variabilidad espacial se debe reflejar también en una alta variabilidad local de la respuesta dinámica. Esto es algo que se debe tener en cuenta en la evaluación de dicha respuesta.

La revisión de la información evidenció una carencia casi completa de información en grandes áreas de la ciudad, en particular al occidente de los cerros de Suba donde se encuentran depósitos de suelos blandos, y en el sur-occidente (zona 5 de la microzonificación), donde los depósitos de suelos son de origen aluvial asociados con los abanicos de deyección de los ríos Fucha y Tunjuelo. Por su origen en estos sectores los suelos son altamente variables y por lo tanto existe una gran incertidumbre en la determinación de sus propiedades, lo cual se debe tener en cuenta en la determinación de la respuesta dinámica.

Para la determinación de la variación de las propiedades dinámicas con la deformación se analizaron los datos de ensayos dinámicos de laboratorio disponibles con el objetivo específico de definir recomendaciones para la definición de las curvas de respuesta dinámica del suelo.

El análisis de los datos de laboratorio mostró una alta variabilidad la cual se puede deber por una parte a problemas o limitaciones tanto en la calidad de las muestras como en la realización de los ensayos, o a características particulares o especiales del comportamiento de los suelos de Bogotá.

Con el propósito de discernir estos factores se hizo un análisis de tendencias de comportamiento considerando por un aparte los factores básicos que han sido identificados como determinantes de este comportamiento de los suelos, en particular el tipo de suelo representado por su índice de plasticidad, y su estado representado por la relación de vacíos y el nivel de esfuerzos. Por otra parte se contrastaron las tendencias de comportamiento observadas en ensayos de campo con las encontradas en el laboratorio. Se consideraron dos hipótesis. Una en la que se asume que el comportamiento de los suelos de la ciudad se puede normalizar con tendencias de comportamiento similares a las reportadas para otros suelos en la literatura técnica internacional, y otra en la que se considera que estos suelos sean especiales y

que respondan a otro tipo de comportamiento. El análisis de los datos mostró que si se consideran los resultados de ensayos de campo (down hole) se encuentra buena correspondencia entre el comportamiento normalizado esperado de los suelos con base en referentes internacionales, lo cual sustenta firmemente la primera hipótesis. Por otra parte en el caso de los resultados de ensayos de laboratorio se pudieron identificar índices de calidad de las muestras según los cuales se aprecia una degradación importante de la rigidez en el laboratorio con respecto a la condición de campo, indicativo de la afectación de las muestras en el proceso de muestreo y ensayo. Por otra parte, el comportamiento normalizado de los datos con respecto a los valores de referencia también evidenció en general una degradación importante de la rigidez de las muestras con respecto a las condiciones de campo. Estos resultados tienen dos implicaciones. Por una parte, si el suelo realmente tienen una rigidez sustancialmente menor que la de otros suelos reportados en la literatura, su respuesta dinámica será mucho más baja lo cual es algo favorable para la amenaza sísmica de la ciudad. Sin embargo, si se utiliza una rigidez reducida, y este efecto se debe sólo a efectos de muestreo y ensayo de los suelos blandos de la ciudad, cuando se produzca un sismo real la respuesta sería más alta que la calculada lo cual redunda en condiciones de riesgo no previstas. Existe además evidencia de que en general la calidad de las muestras que se trabajan en la ciudad no es la mejor, y que los suelos blandos de la ciudad son bastante sensibles a efectos de remoldeo, y de tasa de carga, lo cual hace que la respuesta de las muestras cambie sustancialmente en función del tiempo en que se haga el ensayo después de la toma de la muestra.

Teniendo en cuenta los resultados se considera que la primera hipótesis es más plausible, y con base en esto se da una recomendación para determinar curvas de variación de la rigidez en función de la deformación ajustando de manera conservadora las curvas de referencia internacional con la tendencia general encontrada de los ensayos de laboratorio realizados.

En resumen, los resultados del estudio han permitido definir tendencias de variación de la velocidad de onda de corte Vs y definir criterios para obtener las curvas dinámicas de respuesta del suelo en función de parámetros geotécnicos básicos para los suelos de la ciudad. De esta forma se pueden definir de manera completa los parámetros de respuesta dinámica para cualquier sitio de la ciudad en el que se tenga información geotécnica. Se identificaron también las zonas de la ciudad donde la variabilidad de los suelos es grande o no se cuenta con información suficiente de estudios de respuesta local, de manera que no se tiene información suficiente para estimar con confianza al respuesta dinámica. En estos sectores se debe buscar favorecer la realización de este tipo de estudios, y en la definición de los espectros de respuesta trabajar con valores conservadores para considerar esta incertidumbre.

2.1 MODELO GENERAL CONCEPTUAL DE LOS SUELOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Con respecto al origen y paleo-geomorfología de la Sabana se han realizado estudios muy detallados y de alto nivel científico dentro de los que se cuentan los de Andriessen et al, 1993, Cleef y Hooghiemstra, 1984, Helmens, 1990, Hooghiemstra, 1984, Hooghiemstra, 1989, Hooghiemstra, H., Cleef, A.M., 1995, Hooghiemstra y Ran. 1994, Hooghiemstra, y Sarmiento, 1991, Hooghiemstra et al 1993, Marchant et al., 2002, Torres, V., 1995 , Van der Hammen, y González, 1963, Van der Hammen y Hooghiemstra, 1997, Van der Hammen et al 1973, Torres

et al 2005, entre otros. Estos estudios permiten establecer la cronología y las condiciones ambientales y geomorfológicas en la Sabana de Bogotá en los últimos 3,5 millones de años. Esta información permite tener un marco de referencia en el cual enmarcar las observaciones de comportamiento de los suelos de Bogotá para su caracterización mecánica. Ver **Figura 2.1**

Las condiciones típicas del perfil de suelos en las zonas 3 y 4 de la Ciudad de Bogotá corresponden a tres formaciones. Un espesor pequeño de suelos superficiales desecados del orden de 5 m, seguido por una secuencia de suelos arcillosos de origen lacustre de la formación Sabana. Posteriormente se encuentra una secuencia de suelos de origen predominantemente aluvial con presencia de arenas que corresponde a la formación Subachoque. Estas formaciones tienen espesor variable que aumenta desde los piedemontes de los cerros que bordean la Sabana hacia la parte central de los valles que se forman entre las cadenas montañosas, y además en dirección sur y sur occidental en la misma dirección general de flujo del río Bogotá (H-MV, 2003, Ingeominas, 2005). En el sector del norte de Bogotá, entre los cerros de Suba y orientales el espesor máximo es del orden de 200m (Microzonificación Sísmica de Bogotá, 1997). Hacia el sur de la calle 80 aproximadamente, donde termina el cerro de Suba los espesores de los depósitos aumenta, posiblemente por efectos tectónicos. En el sector de Funza, se obtienen los máximos espesores del orden de 480 m.

Las formaciones Sabana y Subachoque tienen una composición relativamente uniforme en cuanto a tipos de materiales y su comportamiento mecánico está influenciado por la variación de los esfuerzos de confinamiento con la profundidad. Sin embargo localmente existen variaciones en la estratigrafía relacionados con el origen e historia de los suelos desde su formación. En el caso de la formación Subachoque las variaciones se deben a la dinámica deposicional de las antiguas corrientes de agua que formaron los depósitos aluviales y por lo tanto pueden presentar variaciones locales significativas. Esto es similar a lo que se observa a poca profundidad en el sector sur occidental de la ciudad correspondiente a los abanicos de los ríos Tunjuelo y Fucha. Los antiguos cauces y valles aluviales tuvieron una pendiente longitudinal del orden de 0,8%, la cual fue variando en función de los levantamientos tectónicos de la cordillera y la tasa de denudación, relacionada a su vez con las variaciones del clima.

En el caso de los suelos arcillosos de la Formación Sabana estos se formaron en un ambiente lacustre. Por lo tanto la pendiente de los depósitos estacionales es muy baja y los materiales son finos (arcillas y limos) Sin embargo durante el periodo de formación de esta formación, del orden de 1.200.000 años (Torres et al, 2005, Ingeominas, 2004), se presentaron variaciones importantes del clima, en particular periodos glaciares e interglaciares que hicieron variar la profundidad del lago y por lo tanto permitieron la formación de depósitos de suelos orgánicos así como perfiles de variación por desecación de los suelos depositados por debajo de estos niveles de manera similar a lo que ocurre actualmente en la Sabana de Bogotá. Estos paleo-suelos fueron subsecuentemente cubiertos por nuevos depósitos en períodos húmedos sucesivos. La **Figura 2.2**, tomada de Ingeominas (2004), muestra la variación climática representada en la variación del polen de diferentes especies halladas en el perfil de suelos. En dicha Figura también se indica la variación estratigráfica y de contenido de minerales de los suelos asociados con este proceso de formación. Se puede apreciar como en la parte inferior del depósito se encuentran depósitos arenosos de la formación Subachoque y en la parte superior arcillas de la formación Sabana, con la presencia de 4 niveles de turba o paleo suelos orgánicos.

Existe otro factor importante que afecta la composición, comportamiento y la estratigrafía de los suelos de la formación Sabana y es el aporte de cenizas volcánicas provenientes de erupciones de los volcanes de la Cordillera Central. Estas cenizas fueron aportadas en cantidades importantes y se sedimentaron sobre el lago de la Sabana durante diferentes épocas en el cuaternario. El aporte de cenizas volcánicas confiere alta plasticidad y junto con la presencia de diatomeas la posibilidad de estructuración particular a los suelos blandos de la Sabana.

El origen de los suelos define su mineralogía y estructura inicial. Cambios ambientales subsecuentes dan lugar a cambios de estado, en particular a lo que tiene que ver con la sobre-consolidación que en el caso de los suelos de la Sabana de Bogotá se debe a variaciones de nivel del agua en el lago por cambios climáticos y por efectos de desecación. Todos estos factores son los que finalmente determinan las propiedades mecánicas de los suelos. Con base en la información de la formación e historia geológica de los suelos de la Sabana de Bogotá, es de esperarse una tendencia de comportamiento característica para los suelos de la formación Sabana y otra para los de la Formanción Subachoque, aunque posiblemente las diferencias no sean muy marcadas. Dentro de esta tendencia se deben apreciar variaciones locales debidas a eventos particulares de depositación y cambios climáticos generales, los cuales deben ser consistentes en diferentes zonas de la Sabana, y cambios locales particulares de carácter puntual por cambios en las condiciones locales.

Estas hipótesis se deben verificar con base en ensayos confiables que permitan evaluar con suficiente resolución los parámetros y los cambios que se produzcan. Una primera aproximación a este ejercicio se presenta a continuación.

Para evaluar la relación entre el origen y los parámetros mecánicos se puede hacer un análisis de sensibilidad alrededor de casos típicos representativos. Por lo tanto para el presente estudio se considera un caso típico del sector norte de la ciudad. Los parámetros básicos de clasificación de suelos se presentan en la Figura 2.3. En esta figura se aprecia la variación de las propiedades en los primeros 50 m de profundidad, correspondiente a suelos de la Formación Sabana.

Los resultados de la **Figura 2.3** permiten observar el comportamiento de los parámetros en la capa superficial desecada, y luego la variación con la profundidad debido al aumento de la presión de confinamiento de los suelos de la formación Sabana con variaciones puntuales dentro de un rango del 10% al 20% dependiendo de los parámetros considerados.

Los valores de rigidez a bajas deformaciones para un perfil de suelos se obtienen a partir de ensayos de Down Hole. La **Figura 2.4** presenta los resultados de ensayos de down hole en la zona de interés.

En la **Figura 2.4** se aprecia que en toda la zona los ensayos de down hole son bastante consistentes entre sí, y muestran un rango de variación que está relacionado con la variabilidad intrínseca del suelo, el aumento de la presión de confinamiento con la profundidad y con las limitaciones de precisión (posibilidad de medir tiempos de arribo) y de resolución (diferencia entre mediciones sucesivas y distancia entre mediciones) del ensayo de down hole. Se puede

apreciar que los resultados de la **Figura 2.4** presentan similitud con los datos de variación climática que se muestra en la **Figura 2.2** Esta relación es de esperarse de acuerdo con los factores que determinan el comportamiento de los suelos arcillosos y forma la base de las consideraciones que se hacen mas adelante para estudiar la información del presente estudio.

2.2 RECOPILACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS

La información de los puntos de análisis ubicados en la Sabana de Bogotá con los que se realiza el presente estudio fue proporcionada por la DPAE (Dirección de Prevención y Atención de Desastres) y corresponde principalmente a información recopilada de estudios de suelos y estudios de respuesta sísmica local.

Los puntos de análisis se clasifican en tres grupos dependiendo del tipo de información de cada uno de éstos:

- Puntos clase A: con información geotécnica.
- Puntos clase B: con información geotécnica y perfil de velocidad de onda cortante.
- Puntos clase C: con información geotécnica, perfil de velocidad de onda cortante y curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento.

Los puntos con información de velocidad de onda cortante, tienen una clasificación adicional de la siguiente manera:

- Puntos con perfiles de velocidad de onda cortante provenientes de ensayos down hole.
- Puntos con perfiles de velocidad de onda cortante provenientes de correlaciones realizadas con base en información geotécnica.

Las **Tablas 2.1** a **2.9** muestran el consolidado de los puntos de análisis organizados según zonas de la microzonificación sísmica y teniendo en cuenta la clasificación planteada interiormente.

En la *columna No 1*, se encuentra la denominación de éste, es decir, el punto llamado Z3.04, será el punto 4 de la zona 3 y el punto Z2_Z3.07, será el punto 7 de la zona de transición entre las zonas 2 y 3

La *columna No 2*, está dividida en tres subcolumnas las cuales para cada punto de análisis tienen o no una letra X dependiendo del tipo de información con que cuente dicho punto teniendo en cuenta el numeral 4.1.

La **Tabla 2.10** muestra el total de puntos A, B, C para cada una de las zonas

La **Tabla 2.11** muestra el total de puntos A, B, C y el total de puntos de análisis para todo el estudio.

2.3 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE

El comportamiento mecánico de los suelos, tanto bajo carga monotónica como dinámica, está relacionado con su origen, estructura y estado, en particular su relación de vacíos, sobreconsolidación, y nivel de esfuerzos. En general también depende de la velocidad de carga, en especial en los suelos finos que presentan un comportamiento viscoso. El entendimiento y formulación racional de las relaciones esfuerzo-deformación-resistencia de los suelos, también llamadas relaciones constitutivas, ha sido el objeto de la mecánica de suelos desde mediados del siglo XIX hasta el presente. En particular el estudio del comportamiento dinámico de los suelos ha tenido un desarrollo marcado desde los años sesenta, con los trabajos de Hardin y Richart (1963) que establecieron la relación entre la velocidad de propagación de ondas de corte (Vs) y la presión de confinamiento, Hardin y Black (1968), quienes establecieron la relación entre el módulo de corte (G) y la relación de vacíos de los suelos finos, Hardin y Drnevich (1972) quienes identifican la relación entre el módulo de corte y la relación de sobreconsolidación en los suelos finos, y Drnevich et al (1967), Seed e Idriss (1970), Hardin y Drnevich (1972) y otros, quienes identificaron la variación con el nivel de deformación tanto del módulo de corte como de la relación de amortiguamiento de los suelos en la forma como se utilizan mas comúnmente estas propiedades hoy en día. Posteriormente ha habido muchos otros trabajos en esta línea entre los que se destacan los de Dobry y Vucetic (1987) sobre el comportamiento de suelos finos y el de Ishibashi y Zhang, (1997) que hace una recopilación de datos reportados y los analiza para establecer ecuaciones de correlación entre las propiedades dinámicas y las variables básicas que determinan el comportamiento de los suelos, como son el tipo de suelos, representado por el índice de plasticidad; su estado, representado por la relación de vacíos y la relación de sobreconsolidación; y los niveles de esfuerzo de confinamiento y de deformación. En todos estos trabajos se presentan relaciones claras entre estos parámetros, respaldadas por amplia evidencia experimental de alta calidad. La influencia de estas variables de forma similar a como se han identificado empíricamente se puede establecer a partir de consideraciones teórica como las de la mecánica de suelos del estado crítico.

Es claro que como en cualquier problema que involucre materiales naturales hay variaciones en los diferentes parámetros que se quieran determinar. Si se logran establecer funcionalmente las relaciones entre los parámetros que describen el comportamiento, entonces es posible con base en un buen número de datos establecer la variabilidad estadística de los parámetros y las propiedades que de ellos se deriven. Por otra parte es necesario tener en cuenta la variabilidad que se puede introducir en los resultados debidos a los procedimientos de muestreo, ensayo e interpretación de pruebas de campo y laboratorio. Por lo tanto hay al menos tres fuentes de

incertidumbre en la caracterización de los materiales térreos a saber: la incertidumbre epistémica que se origina en no conocer con certeza las relaciones entre los parámetros (limitaciones de la teoría que se utilice para estudiar el problema), la variabilidad natural de los parámetros debida al origen y composición de los materiales, y la incertidumbre en la determinación de los parámetros debida a limitaciones en los procedimientos de muestreo y ensayo. La combinación de estas tres fuentes de incertidumbre produce variabilidad en los resultados que es muy importante tener en cuenta en análisis de ingeniería, en particular en el estudio de la amenaza sísmica en la que se hace un gran esfuerzo por evaluar la incertidumbre que se incorpora en la evaluación de las características de los movimientos sísmicos que pueden afectar un sitio al nivel de la base de los depósitos de suelos.

En este trabajo se pretende estudiar los aspectos básicos del comportamiento de los suelos especialmente de las zonas 2, 3 y 4 de la microzonificación sísmica de Bogotá con base en la información disponible de ensayos de campo y laboratorio en su mayoría de los primeros 50 m de profundidad. Estos suelos corresponden principalmente a suelos originados en depósitos de ladera o depósitos aluviales en el borde del antiguo lago de la Sabana en la zona 2; y suelos de origen lacustre en las zonas 3 y 4, con ocasionales intercalaciones de abanicos de deyección en la zona 3. Los suelos de ladera y aluviales son suelos arenosos o limos orgánicos, mientras que los suelos aluviales son arcillas y limos ocasionalmente orgánicos (turbas), de consistencia blanda, alta humedad y ligeramente sobreconsolidados a normalmente sobreconsolidados. Se pretende verificar si las observaciones reportadas en la literatura sobre el comportamiento dinámico de los suelos efectivamente aplican para los suelos blandos de Bogotá, establecer que tan similar es dicho comportamiento con el reportado en la literatura, y finalmente hacer una exploración sobre la confiabilidad de los datos de ensayos de campo y laboratorio de los que se dispone actualmente en la ciudad. Se pretende que esta información sea útil para la revisión del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad.

A partir de la información geotécnica de los estudios de suelos realizados en diferentes sitios de Bogotá, donde se realizaron estudios de respuesta sísmica local, se ha caracterizado la zona lacustre de Bogotá en términos de la variación de propiedades índice con la profundidad. En las Figuras 5 a 8 se ilustran resultados típicos.

Se aprecia que en la zona lacustre de Bogotá, el limite plástico varía entre 30 y 60 y el limite liquido varía entre 150 y 200 en gran parte del perfil hasta 50 m de profundidad (Ver **Figura 2.5**), la humedad natural y el índice de plasticidad (Ver **Figura 2.6**) tienen rangos de valores similares entre 50 y 100 para la capa sobreconsolidada, entre 100 y 190 para los siguientes 25 m y entre 40 y 125 de 35 a 50 m de profundidad. Sin embargo, localmente se pueden presentar variaciones importantes en estratos del perfil. Los valores de relación de vacíos (Ver **Figura 2.7**) correspondientes a la capa superficial sobreconsolidada varían entre 1 y 1.5, en los siguientes 25 m se encuentran valores de relación de vacíos entre 2.5 y 3.75, mientras que a mayores profundidades el valor es del orden de 2. Correspondientemente el peso unitario (Ver **Figura 2.8**) está entre 15 y 17 KN/m3 para la capa sobreconsolidada, entre 12 y 14 KN/m3 para los siguientes 25 m, y entre 14 y 16 KN/m3 entre 35 y 50 m de profundidad.

Rodriguez y Escallón, (2006 a) exploraron las tendencias de comportamiento de los suelos arcillosos y limosos de las zonas 2, 3 y 4 por medio de la relación entre los parámetros de

estado (humedad natural o relación de vacíos) y su clasificación en función del índice de plasticidad (Ver **Figura 2.9**). Tales propiedades se obtuvieron de la información geotécnica básica de 16 sitios en la ciudad de Bogotá. Se trabajó sobre la hipótesis de que el índice de plasticidad es un parámetro básico que depende de la mineralogía (tipo) de suelo, mientras que la relación de vacíos depende básicamente del estado del suelo en relación con su proceso de preconsolidación. Se encontró que dentro de los suelos ensayados había suelos en toda la gama de valores de IP entre 10 y 190. Además se encontró que existe una relación entre el índice de plasticidad y la relación de vacíos, indicativa de que el estado y el origen de los suelos en el perfil están correlacionados (Ver **Figura 2.10**). Se observa de las **Figuras 2.9 y 2.10** que las arcillas y limos de las zonas 2, 3 y 4 presentan un comportamiento que se ajusta a una única tendencia, mientras que las turbas presentan una tendencia diferente con valores más altos.

2.3.1 Relación del Modulo de Rigidez Eo de laboratorio y el de Campo

Se recopiló la información de ensayos triaxiales cíclicos de muestras tipo Shelby donde se han realizado estudios de respuesta local, adicionalmente se recopilaron datos de ensayos tipo bender elements y columna resonante sobre muestras de turbas (Moreno y Rodríguez, 2004).

Para este análisis, se tuvieron en cuenta los mismos puntos de análisis con ensayo Bender Element y los respectivos valores de velocidad de onda cortante obtenidos de los ensayos geofísicos de Down Hole. La **Tabla 2.12** muestra el procedimiento para hallar el valor del Modulo Eo partiendo del peso unitario de las muestras y los valores de Vs medidos en campo.

La **Figura 2.11** muestra el valor de Elab / Ecam, normalizado por el Ecam, discriminado por zonas de la microzonificación sísmica; a su vez, la **Figura 2.12** muestra los mismos datos, pero discriminados por tipos de materiales. Cabe notar que el esfuerzo de confinamiento al cual se sometió las muestras sobre las cuales se realizaron los ensayos de velocidad de onda (bender elements), corresponden con los esfuerzos de confinamiento estimados en el terreno a las profundidades a las cuales se obtuvieron las muestras. Por lo tanto el estado de esfuerzos en el terreno y en el laboratorio es similar.

En las graficas anteriores se plantean 5 tendencias que acogen a la mayoría de los puntos. Se observa una clara diferencia entre los puntos correspondientes a materiales distintos y zonas de la microzonificación diferentes.

La tendencias reportada por Kokushu (1980, 1987) de variación de la relación módulo de elasticidad máximo de laboratorio (Eo(lab)) en función del módulo de elasticidad máximo de campo (Eo(campo)), se expresó en términos del módulo de elasticidad utilizando una relación de poisson de 0.4 típica de los suelos arcillosos de la Sabana de Bogotá, a fin de comparar dicha tendencia con los datos de la relación Eo(lab)/Eo(campo) contra Eo(campo) obtenida de los ensayos dinámicos tanto de campo (down hole) como de laboratorio (Triaxial cíclico, columna resonante, bender elements, etc.) (Ver **Figura 2.13**) realizados para estudios de respuesta local en Bogotá. Se observa que la gran mayoría de las muestras quedan por debajo del límite inferior dado por Kokoshu, (1987). Esto es indicativo de que las muestras se degradan sustancialmente pro efecto de muestreo y ensayo.

La dispersión de los datos y los bajos valores son indicativos de problemas que pueden estar relacionados con varios aspectos a saber: mala calidad de las muestras o el proceso de muestreo y ensayo en el laboratorio que produce cambios importantes de esfuerzos que se traducen en deformaciones principalmente de tipo volumétrico de las muestras. Estas deformaciones a su vez producen disminución de la rigidez y dependen del tiempo que transcurre entre la toma de la muestra y el momento de ensayo así como de las condiciones de confinamiento de la muestra durante este tiempo. Dado que la realización de ensayos depende de la disponibilidad de los pocos equipos que hay en el país para hacer ensayos dinámicos, dicho tiempo puede llegar a ser de varias semanas. Finalmente, los resultados dependen del procedimiento de ensayo que es susceptible a detalles de manipulación, montaje, esfuerzos aplicados y aún de detalles en el procesamiento de la información y cálculo. Un aspecto particular relacionado con el estado de esfuerzos es el hecho de que en el terreno el estado de esfuerzos es anisotrópico, presumiblemente geostático, con un valor de coeficiente de empuje de tierras en reposo (Ko) que no se conoce y que debe depender del tipo de material y de la relación de sobreconsolidación. El esfuerzo efectivo de confinamiento depende también de la presión de poros, sobre lo cual también hay incertidumbre. Es necesario consolidar las muestras al estado de esfuerzos del terreno debido a que el efecto del confinamiento causa una disminución en el valor de Eo en caso de que la muestra se consolide a un confinamiento menor que el dado in-situ en proporción aproximadamente proporcional a la diferencia de presiones entre el terreno y el laboratorio.

Por lo general se ha observado que los ensayos de mejor calidad son los realizados en materiales de la transición de las zonas 2 y 3, debido a que tienden a ser suelos de menor plasticidad y mayor rigidez, menos susceptibles a los problemas mencionados.

2.3.2 Correlación del tipo de suelo y su estado con el módulo de rigidez de campo a bajas deformaciones (ensayo down hole).

La rigidez dinámica del suelo a bajas deformaciones de acuerdo con la información de laboratorio dada por (Kokoshu, 1980; Humphries y Wahls, 1968; Hardin y Black, 1968 y 1969) depende de la relación de vacíos y el estado de esfuerzos de la siguiente manera:

$$Go = K \times F(e) \times \left(\frac{\sigma_c^{'}}{\sigma_{ref}} \right)^m \times RSC^k \qquad (1)$$

Donde:

K = Constante que depende del tipo de material dada en kPa

□'c = Esfuerzo de confinamiento efectivo

□$_{ref}$ = Esfuerzo de referencia (usualmente 100 kPa)

m = Exponente de la relación de esfuerzos

RSC = Relación de sobreconsolidación

k = Exponente de la relación de sobreconsolidación

F (e) esta dado por la siguiente expresión (Hardin, 1978)

$$F(e) = \frac{1}{(0.3 + 0.7e^2)} \qquad (2)$$

Estas expresiones se utilizaron para normalizar los valores del módulo de elasticidad máximo medidos en el terreno a partir de los ensayos de Down Hole (Vs) y obtener de esta forma el valor de K en la ecuación (1). Los valores normalizados se correlacionaron con el índice de plasticidad (Ver Figura 14). Como se aprecia en la **Figura 2.14**, tanto las arcillas sobreconsolidadas, como las arcillas y limos de baja y alta plasticidad de las zonas 3 y 4 presentan una correlación clara de los valores normalizados (K) con el índice de plasticidad. Es interesante ver que a pesar de que los suelos del área de transición entre las zonas 2 y 3, pueden tener un origen diferente a los de las zonas 3 y 4, los valores de K se ajustan a la tendencia de las zonas 3 y 4. Igualmente las arcillas aluviales depositadas por el río Tunjuelo (zona 5) se ajustan a esta tendencia.

Al revisar los datos todas las muestras se conformaron a las tendencias ya encontradas. Se encontró que el valor de K en los suelos arcillosos de la Sabana que están por debajo de la capa sobreconsolidada presentan una correlación lineal con el índice de plasticidad del tipo:

$$K = 3056.4 * IP + 31031 \pm \bar{\sigma} \qquad (3)$$

Donde:

$\bar{\sigma}$ = desviación estándar = 85638

En el caso de las arcillas sobreconsolidadas, se encontró que los valores normalizados, que incluyen el factor de sobreconsolidación RSC^k (Ver expresión 1) se ajustan a la siguiente expresión:

$$y = K * RSC^k \qquad (4)$$

Donde:

K = 324500

RSC = 3

k = Función del índice de plasticidad dado por la siguiente expresión

$$k = -0.00004 * IP^2 + 0.0145 * IP \qquad (5)$$

Para el caso de las arcillas sobreconsolidadas la desviación estándar calculada de los datos de $K*RSC^k$ es de 71492.

La expresión 5 es consistente con la tendencia de los valores de k en función del índice de plasticidad dados por Hardin y Drnevich (1972) (Ver **Tabla 2.13**), aunque con valores mayores.

Adicionalmente se observa que los valores de K de las turbas se ajustan a una relación exponencial en función del índice de plasticidad, dada por la siguiente expresión:

$$K = 216853e^{0.0087*IP} \qquad (6)$$

Para la normalización se hizo un análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en la ecuación para identificar los que producen un mejor ajuste a los datos disponibles. Se encontró que los parámetros de la función de la relación de vacíos propuestos por Drnevich se mantienen iguales y el exponente de la variación de la rigidez con la presión de confinamiento que dio mejor ajuste es del orden de 0,75. Este valor es consistente con los valores típicos para suelos arcillosos.

2.3.3 Estimación del Modulo de Corte Máximo a partir del ensayo de Penetración Estandar

La **Figura 2.15** muestra los datos de las correlaciones entre los valores de SPT y Vs obtenidos en estudios de respuesta local en el piedemonte de Bogotá. Se encontró una relación de tipo polinomial para los suelos granulares de la zona de piedemonte descrita por la siguiente ecuación:

$$Vs = 127 + 3.67\mathrm{N}_{\mathrm{cam}} - 0.017N_{cam}^{2} \quad (7)$$

Donde:

N_{cam} es el valor de campo del ensayo SPT

Se compararon los valores de Vs calculados con la ecuación (7) a partir de valores de N de campo en dos sitios de la zona 2 con valores de Vs obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones (GEC, 2002). Ver **Figura 2.16**.

$$G_{\max} = 15560(\mathrm{N}_1)_{60}^{0.68} \quad (8)$$

$$Vs = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}} \quad (9)$$

Donde

$(N_1)_{60}$: es el valor de N normalizado a una presión de 100 kPa y corregido a una relación de energía del 60%, y

ρ: es la densidad de masa del medio

La **Figura 2.16** se puede observar que los valores de Vs calculados usando la correlación encontrada para los suelos granulares de la zona de piedemonte de Bogota son similares a los reportados por el (GEC, 2002) pero ligeramente superiores. Adicionalmente se observa que los valores de Vs calculados usando la correlación encontrada para los suelos granulares de la zona de piedemonte de Bogota están dentro del rango de variación de la velocidad de onda de corte (down hole). Estos valores son muy similares a los obtenidos por medio del ensayo down hole cuando los valores de SPT corresponden a suelos predominantemente granulares.

Esta correlación es de gran ayuda para determinar perfiles de Vs a partir de la vasta información disponible de ensayos de penetración estándar, sin embargo cabe notar que el rango de variación de los valores de Vs en la zona 2 es superior al de las zonas 3 y 4, debido a la alta heterogeneidad de los suelos en el piedemonte compuestos principalmente por suelos granulares (gravas y arenas) envueltos en una matriz limo arcillosa.

2.3.4 Metodología para definir Perfiles de Velocidad de Onda

Los resultados de la presente sección se utilizaron para obtener estimativos de Vs a partir de información geotécnica en los casos donde no había datos de Down hole. La **Tabla 2.14** ilustra el procedimiento para hallar los perfiles de velocidad de onda de corte supuestos y la **Figura 2.17** muestra el perfil obtenido.

- Las columnas No 1, 2, 4 y 7 muestran valores de profundidad, peso unitario, humedad natural e índice de plasticidad, respectivamente. Estos valores corresponden a información proporcionada por la DPAE.

- Las columnas No 3, 5 y 6 muestran valores de peso unitario, peso especifico de sólidos y relación de vacíos, respectivamente, hallados en función de la humedad natural por medio de relaciones planteadas anteriormente en el numeral 2.

- La columna No 8 muestra el esfuerzo vertical efectivo (S'v).

- La columna No 9 muestra el esfuerzo de confinamiento efectivo (S'c)

- La columna No 10 muestra el módulo Eo. Dicho módulo se halló a partir de las correlaciones planteadas en la sección anterior.

- La columna No 11 muestra la velocidad de onda cortante.

2.3.5 Secciones a partir de Perfiles de Velocidad de Onda

En el numeral 2.2 se muestra el total de puntos B (con información de velocidad de onda cortante). Basados en esta información y sus respectivos perfiles de velocidad de onda se realizaron secciones longitudinales y transversales sobre toda la Sabana de Bogotá buscando que dichos trazos atravesaran la mayor cantidad de zonas de la microzonificación con el objetivo de analizar la variación existente entre estas teniendo en cuenta la rigidez de los materiales y su variación con la profundidad.

El análisis de las secciones permite establecer las siguientes conclusiones relevantes para la definición y extrapolación de los perfiles de Vs.

En los perfiles de la zona 2 se aprecia una gran variabilidad de los valores de Vs en el perfil. Estas variaciones pueden ser muy importantes aún en sitios localizados a corta distancia entre sí. Los valores de Vs en general son altos, por encima de 150 y alcanzan valores de 300 a 500 m/s, indicativos de la presencia de estratos de materiales granulares densos intercalados con limos o arcillas de menor rigidez. La profundidad a la roca es también altamente variable, desde

pocos metros hasta espesores de más de 30 m. Estas condiciones son características del carácter que les confiere el origen a estos depósitos ya que se trata de depósitos torrenciales o de ladera, depositados en los piedemontes de los cerros en zonas de alta pendiente y energía de depositación. Se considera que en esta zona se deben realizar estudios geotécnicos y de respuesta local con base en las condiciones particulares del sitio, teniendo en cuenta además las posibles variaciones con el fin de estimar la respuesta dinámica.

Las condiciones de suelos en el área implican la posibilidad de grandes contrastes de impedancia y espesores de suelos no muy gruesos, lo cual resulta en grandes amplificaciones en la respuesta dinámica especialmente a periodos cortos. Existe también la posibilidad de que en el perfil de suelos se encuentren capas de baja rigidez (limos orgánicos o turbas), de espesor importante y con suficiente continuidad como para que en esos sitios puedan actuar como aisladores sísmicos. En este caso la situación es totalmente contraria a la anteriormente descrita y en vez de amplificaciones importantes la respuesta sísmica puede ser atenuada significativamente.

Debido a la variabilidad de las condiciones de suelos resulta muy difícil pretender hacer generalizaciones o extrapolaciones a partir de datos puntuales. Para efectos de la normatividad se hace necesario asumir envolventes de diseño para las condiciones típicas desfavorables, con la oportunidad de revisar los espectros con base en información del sitio mas detallada.

En los perfiles de la zona 3 se aprecian secuencias de interdigitaciones de arenas en perfiles predominantemente arcillosos que se hacen mas finos a medida que se alejan de los cerros. Los suelos presentan rigidez variable, pero en general son suelos con valores de Vs típicamente mayores de 150 m/s, con intercalaciones de estratos de mayor velocidad, la cual además aumenta con la profundidad. Esta situación corresponde también de manera similar con el comportamiento de los estratos arenosos de la formación Subachoque que corresponde a suelos de origen aluvial.

En los perfiles de la zona 4, por debajo de la capa preconsolidada que se encuentra en la mayor parte de los sitios en los primeros 5 a 10 m de profundidad, se aprecian valores de Vs bastante bajos, menores a 150 m/s, y en algunos sectores incluso menores a 100 m/s, que presentan muy poca variación con la profundidad. Estos suelos corresponden a arcillas y limos de origen lacustre con altas relaciones de vacíos, alta plasticidad y humedad y bajos pesos unitarios. Además corresponden a suelos que presentan una resistencia inalterada relativamente alta y alta sensibilidad por lo que pierden resistencia de manera importante con la deformación (Rodriguez, 2006b). Son también los suelos más sensibles a los efectos de muestreo y ensayo que ya se discutieron. Estas condiciones hacen que los valores de Vs sean relativamente bajos y que varíen poco con la profundidad.

Se hizo un análisis de la tendencia de los valores de Vs en la forma $Vs=AoZ^m$ (Rodríguez, 1994). A continuación se presenta el marco teórico de referencia para la obtención de dicha relación:

Seed et al. (1984) propusieron la siguiente expresión para suelos no cohesivos:

$$G = 1000 K_2 \sqrt{\sigma'_m} \qquad (10)$$

Donde el esfuerzo efectivo medio □'$_m$ esta dado en libras por pulgada cuadrada, y K_2 es un coeficiente que depende primordialmente del tamaño de grano, la densidad relativa y la deformación por corte. K_2 es máximo para valores bajos del nivel de deformación. La ecuación anterior se puede escribir de manera general (Rodríguez, 1994) como:

$$G = F_1 \sqrt{\sigma'_m} \qquad (11)$$

Donde F_1 es función del tipo de suelo.

El modulo de corte se relación con la velocidad de onda de corte por medio de la siguiente ecuación:

$$Vs = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (12)$$

Donde □ es la densidad de masa (□=□/g). Adicionalmente, el esfuerzo efectivo medio en condiciones geoestáticas es:

$$\sigma'_m = \frac{(1 + 2\mathrm{K}_0)}{3} \sigma'_v \qquad (13)$$

Donde K_0 es el coeficiente de presión de tierras en reposo, el cual es función del tipo de suelo y la historia geológica, y □'$_v$ es el esfuerzo vertical efectivo dado por:

$$\sigma'_v = \gamma_{prom} z \qquad (14)$$

Donde □$_{prom}$ es el peso unitario efectivo promedio desde la superficie hasta la profundidad considerada, al sustituir las ecuaciones 12 a 14 en la ecuación 11, tenemos que:

$$Vs = \sqrt{\frac{g}{\gamma}} F_1 \sqrt{\frac{1 + 2\mathrm{K}_0}{3} \gamma_{prom} z} = F_2 z^{0.25} \qquad (15)$$

La ecuación 15 muestra que la velocidad de onda de corte es una función de la profundidad. Para un suelo granular uniforme, depositado recientemente F_2 es aproximadamente constante. Sin embargo, F_1, Ko y □ varían en función de la profundidad y por lo tanto la ecuación 15 se escribe de manera más general como:

$$Vs = A_0 Z^m \qquad (16)$$

Donde el parámetro m de la ecuación 16 tiene en cuenta la variación de Vs con la presión de confinamiento y la variación de los parámetros del suelo con la profundidad. Si los parámetros del suelo no cambian con la profundidad, el único efecto a tener en cuenta es la variación del esfuerzo de confinamiento con la profundidad y por lo tanto m debe ser cercano a 0.25. Sin embargo, cuando se presentan variaciones con la profundidad de parámetros tales como la relación de vacíos y el peso unitario, el valor de m es diferente de 0.25. Asumiendo que los efectos combinados de los diferentes parámetros involucrados en F_2 son proporcionales a la raíz cuadrada de z, entonces el valor de m será de 0.5. En caso de que el efecto combinado sea proporcional a z, m seria de 0.75. Los valores típicos de m están en el rango de 0.25 a 0.5 (Rodríguez, 1994).

Un análisis de la tendencia de los valores de Vs en la forma $Vs=Ao\ Z^m$, permite hacer extrapolaciones razonables en profundidad de los valores de Vs. Estos valores también se pueden comparar con el comportamiento observado en materiales naturales en otras regiones (Rodriguez, 1994). Para los suelos arcillosos lacustres de la zona 4 y algunos sectores de la zona 3, los valores de Ao son del orden de 100 y m del orden de 0,14 a 0,2. Los bajos valores de m indican la poca variación de Vs con la profundidad. Para los suelos aluviales de la formación Subachoque se obtuvieron valores de Ao del orden de 23 y valores de m alrededor de 0,6, lo cual es el valor típico de los suelos aluviales naturales.

En todos los casos se debe tener en cuenta que los valores de Vs varían localmente en profundidad. Para los suelos lacustres de la formación Sabana esta variación puede ser de más o menos 10 a 20 m/s. En los suelos arenosos de la formación Subachoque o de la zona 3, se pueden tener variaciones en un rango del orden de 80 a 100 m/s alrededor de la tendencia general. Es importante que en los análisis de respuesta siempre se tenga en cuenta esta variabilidad para identificar los posibles rangos de resultados.

2.4 CURVAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ

En el numeral 2.2 se muestra el total de puntos C (con información dinámica) Se analizó la respuesta dinámica de la totalidad de las muestras de los puntos de análisis teniendo en cuenta los siguientes puntos

2.4.1 Normalización de las Curvas Dinámicas resultado de ensayos triaxiales por curvas de referencia (Ishibashi y Zang)

Con el fin de contar con un marco de referencia para la evaluación de las tendencias de comportamiento y calidad de la información de ensayos disponible, se utilizaron las curvas de variación de la rigidez dinámica y el amortiguamiento con al deformación en función de los parámetros de tipo (índice de plasticidad), y estado de esfuerzos en los suelos finos reportadas por Ishibashi y Zang, (1993). Estas ecuaciones se transcriben a continuación.

$$\frac{G}{G\max} = K(\gamma, IP)(\sigma_m^{'})^{m(\gamma,IP)-m_o}$$

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

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

$$n(IP) = \begin{cases} 0.0 & para \quad IP = 0 \\ 3.37x10^{-6}\,IP^{1.404} & para \quad 0 < IP \le 15 \\ 7.0x10^{-7}\,IP^{1.976} & para \quad 15 < IP \le 70 \\ 2.7x10^{-5}\,IP^{1.115} & para \quad IP > 70 \end{cases}$$

$$\xi = 0.333\frac{1+\exp(-0.0145IP^{1.3})}{2}\left[0.586\left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^2 - 1.547\frac{G}{G_{\max}} + 1\right]$$

Donde el esfuerzo efectivo promedio (σ'_m) debe estar dado en kPa, el índice de plasticidad (IP) en porcentaje, y la deformación por corte (γ) en tanto por uno.

De los 43 puntos de análisis tipo C, 26 cuentan con información correspondiente al ensayo dinámico Bender Elements. Debido a esto, y con el fin de realizar la normalización de las curvas de rigidez y amortiguamiento por las curvas de referencia (Ishibashi y Zang), se hizo inicialmente un análisis con los puntos que contaban con el valor de Eo, tomando a este como

el valor más certero a partir del cual se igualarían las curvas resultado de triaxiales y las de referencia.

En las **Figuras 2.18 y 2.19** se visualiza un ejemplo (punto de análisis Z3.03), de la variación existente entre la respuesta dinámica de la muestra obtenida por medio del ensayo triaxial y la curva de referencia correspondiente a las propiedades índice de dicha muestra.

En las **Figuras 2.20 y 2.21** se observa el resultado de realizar el mismo procedimiento de normalización en todos los puntos de análisis con ensayo de Bender Element teniendo en cuenta la zona de la microzonificación sísmica de donde se extrajo la muestra y el laboratorio donde fue realizado el ensayo triaxial. Las graficas que en su titulo tienen una letra (J) corresponden a ensayos triaxiales realizados en la Universidad Javeriana y en las que aparece una (A), corresponden a ensayos triaxiales realizados en la Universidad de los Andes.

En la **Figura 2.22**, se observa la normalización de todos los puntos de análisis con ensayos Bender Element, los correspondientes a ensayos triaxiales de la Universidad javeriana y la Universidad de los Andes. En la **Figura 2.23**, se observa la misma **Figura 2.22** con la línea de tendencia propuesta que relaciona la variabilidad de los datos de las curvas dinámicas resultado de los triaxiales con las curvas teóricas.

Del análisis hecho teniendo en cuenta la normalización realizada que se observa en las graficas anteriores, se obtiene una línea de tendencia, (Ver **Tabla 2.15 y 2.16**), que modifica las curvas de referencia (Ishibashi y Zang), y arroja un factor de corrección que modifica el valor de la rigidez en función de la deformación. Las ecuaciones de dichas tendencias son las siguientes:

Con el propósito de evaluar la tendencia de comportamiento de la relación de amortiguamiento con la deformación se utilizó un esquema de normalización similar al utilizado para la rigidez dinámica. Se utilizaron los valores de referencia de Ishibashi y Zang (1993) para normalizar los datos de todos los ensayos disponibles, tanto realizados en el laboratorio de la Universidad de Los Andes, como en la Javeriana. (Ver **Figuras 2.24 a 2.26**). Los resultados de las figuras muestran una gran dispersión, sin ninguna tendencia específica, con la mayoría de los datos entre 0,7 y 1,5 alrededor de los valores de referencia. Ante esta situación se considera que es prudente considerar los valores de referencia y evaluar el efecto de la variación del amortiguamiento en el rango mencionado.

2.5 EVALUACIÓN DE LOS ESPESORES DE DEPÓSITO

Para la definición de los modelos de respuesta dinámica es necesario definir la variación de las propiedades dinámicas con la profundidad desde la superficie del terreno hasta el nivel de la roca. Esto implica la necesidad de extrapolar la información disponible debido a que hay muy pocos datos de más de 50 m de profundidad y mucho menos a más de 100 m de profundidad.

La información geológica nos permite saber que en el depósito de la Sabana se encuentran dos formaciones. Una superficial de arcillas lacustres, la formación Sabana, y una de origen aluvial caracterizada por secuencias de arenas, limos y arcillas denominada formación Subachoque. El comportamiento dinámico de las dos formaciones es relativamente uniforme, pero diferente entre si. El análisis de las tendencias generales de variación de la rigidez con la profundidad como consecuencia fundamentalmente del incremento en la presión de confinamiento ya se discutió. Esta permite tener un estimativo de los parámetros de rigidez con la profundidad.

Para definir los perfiles es necesario por lo tanto definir la profundidad del contacto entre las formaciones Sabana y Subachoque. Existen algunos datos de perforaciones en las que se ha podido observar el contacto entre dichas formaciones. Además los procesos de formación son determinantes de la geometría del depósito. Por lo tanto es de esperarse una correlación entre la pendiente del fondo del valle y la del contacto entre las formaciones, y una proporcionalidad entre los espesores totales y los del espesor de las formaciones.

Para poder evaluar las tendencias y poder estimar los espesores de las formaciones en función de la localización espacial en las **Figuras 2.27 y 2.28** se presentan los datos disponibles de espesor total del depósito y espesor de la formación Sabana, en función de la distancia en dirección norte y este. El espesor de los depósitos aumenta en el sentido longitudinal del valle en dirección sur y en dirección aproximadamente transversal en dirección oeste como se aprecia en las figuras, la pendiente longitudinal general es del orden de 1,5% y la pendiente en dirección oeste es del orden de 0,75%.

La mayoría de los datos disponibles se encuentran en el sector norte de la ciudad entre los cerros de orientales y de Suba. En este sector el valle es relativamente estrecho y va aumentando en profundidad hacia el sur. Aproximadamente hacia la altura de la calle 80, coincidiendo con el límite sur de los cerros de Suba, el valle se amplía y la dirección general del mismo es hacia el sur occidente. Los mayores espesores del depósito se encuentran hacia el sector de Funza, en donde se tienen datos de una perforación hasta la roca que se encuentra a 585 m de profundidad (Torres et al, 1995). Se aprecia que en el sector del norte de la ciudad hay una proporcionalidad entre el espesor de la formación Sabana y la del espesor total de depósito del orden del 25%. En el sector de Funza esta relación se aumenta aproximadamente al 50%. En zonas intermedias se espera que la proporción varíe de manera aproximadamente proporcional. Estas observaciones permiten estimar de manera razonable los espesores de la formación Sabana a partir de los espesores totales de suelos que se obtienen del plano de espesores de sedimentos de la ciudad que fue parte de los resultados del estudio de microzonificación sísmica de la Ciudad.

Con el propósito de complementar la información del mapa de espesores de sedimentos del estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá, se hizo una recopilación de información y se utilizaron técnicas geoestadísticas con el fin de producir una nueva versión de los mapas de espesor total de sedimentos y un mapa nuevo de espesor de la Formación Sabana. En el siguiente numeral se describe este trabajo y sus resultados.

2.5.1 Mapas de Espesores de la Formación Sabana y Subachoque

La elaboración de los mapas de los espesores de la formación Sabana y Subachoque se realizó teniendo en cuenta la siguiente metodología

- **Recolección de la información**

En esta etapa se consolidó una base de datos con la información disponible de espesores de la formación Sabana y profundidad de roca, tanto de fuentes primarias como secundarias. Las fuentes primarias corresponden a datos de perforaciones realizadas por diferentes consultores en geología e ingeniería e información de los diferentes sondeos realizados para estudios geotécnicos y que se incluyeron en el capítulo 2. Por otra parte la información secundaria corresponde al mapa de profundidad de roca elaborado por INGEOMINAS para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá, cortes geológicos elaborados por LoboGuerrero-Saénz (1994), y cortes geológicos digitalizados por Fragala, Obregón y García (2002). Para elaborar los mapas requeridos en el presente estudio es importante diferenciar que la información primaria va a recibir un peso mayor que la secundaria, ya que esta última tiene un mayor grado de incertidumbre pero un mayor cubrimiento areal.

- **Análisis de calidad de la información**

En esta etapa se realizó un análisis preliminar de la información con el fin de determinar si existían datos anómalos, así como errores en los valores de los espesores y profundidades obtenidos en la etapa anterior. Así mismo se calcularon valores promedios tanto de espesores como de profundidades para sondeos que estuvieran muy cercanos, con el fin de evitar inestabilidades numéricas en el procedimiento de mapeo posterior.

- **Estudio de correlación espacial de la información**

Se calcularon los semivariogramas del espesor de la formación Sabana y de la profundidad de la roca teniendo en cuenta los datos recolectados usando el paquete SURFER®. La **Figura 2.29** muestra los resultados obtenidos de la profundidad de la roca. En ésta se incluyen los semivariogramas calculados para 0°, 30°,60° y 90° de azimuth, con una tolerancia angular de 30º y de los cuales es evidente que la dirección de mayor continuidad espacial corresponde a N30E (Azimuth 30º) el cual se encuentra directamente relacionada con el tren estructural predominante de las fallas y plieques presentes en la Sabana de Bogotá. El rango de influencia en esta dirección es igual a casi 8 km, lo cual indica la presencia de un fenómeno estructurado a nivel espacial; los rangos de influencia en las otras direcciones son menores.

El modelo de ajuste empleado para el semivariograma fue de tipo esférico dado por la expresión

$$\gamma(h)=\begin{cases} c_0+c\left(\dfrac{3h}{2a}-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{h}{a}\right)^3\right), & si\ h\le a \\ c, & si\ h>a \end{cases} \qquad (5.2)$$

donde h es la distancia de separación, a es el rango de influencia, c0 es el efecto pepita y c es la contribución a la varianza. En este caso particular el semivariograma queda dado por:

$$\gamma(h)=0.2+0.8\left(\frac{3h}{16000}-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{8000}\right)^3\right) \qquad (5.3)$$

Los valores de los parámetros del semivariograma para las diferentes direcciones aparecen consignados en la **Tabla 2.17** y los modelos de ajuste aparecen representados en las **Figura 2.29** cómo una línea azul continúa. Los semivariogramas experimentales presentan muchas fluctuaciones, lo cual en este caso particular corresponde al hecho que haber utilizado conjuntos de datos con calidades diferentes.

En el caso del espesor de la formación Sabana, los semivariogramas se calcularon en las mismas direcciones y usando la misma tolerancia angular y los resultados se presentan en la **Figura 2.30.** Estos semivariogramas muestran una tendencia similar a la mostrada por los semivariogramas de profundidad de roca, lo cual se explica por el hecho que a nivel regional los depocentros de toda la cuenca están definidos por la configuración estructura de las formaciones asociadas a la roca. El mayor rango de influencia determinado para la información del espesor de ésta formación corresponde a 8 km en la dirección N30E, mientras que en las otras direcciones los rangos de influencia fueron menores. En la **Figura 2.30** es evidente que los semivariogramas presentan fluctuaciones en todas las direcciones, como resultado de incluir conjuntos de datos de diferentes fuentes.

El modelo ajustado en este caso corresponde a uno esférico del tipo:

$$\gamma(h)=0.2+0.8\left(\frac{3h}{12000}-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{6000}\right)^3\right) \qquad (2.3)$$

y los parámetros se presentan en la **Tabla 2.18**

- **Estimación espacial**

Para elaborar los mapas de espesor y profundidad se empleó el método denominado krigeaje con deriva externa, el cual se aplica cuando se tiene información de una variable primaria (valores medidos de espesores o profundidades) y una variable secundaria (valores de espesor o profundidad obtenidos de interpretación geológica y por lo tanto información con un grado apreciable de incertidumbre). Una suposición fuerte que hace este método es que la relación entre las dos variables es de tipo lineal. Este procedimiento se realizó en el programa Krig3D desarrollado por el Geólogo Oscar García (2006) y en el cual se incorporaron los modelos de correlación espacial determinados en la etapa anterior.

El mapa de profundidad de la roca se presenta en la **Figura 2.31**. Al analizar los mapas obtenidos es claro que la tendencia observada en el semivariograma, en cuanto a que los valores de profundidad tienen una orientación preferencial de N30E, es reproducida en el mapa obtenido lo cual permite la delimitación de estructuras geológicas claras en el subsuelo: Hacia la parte NE del mapa se aprecia una zona de color amarillo/blanco y forma alargada que se puede interpretar como un anticlinal el cual aflora en superficie (Cerros de suba), mientras que la zona de color rojo corresponde a un sinclinal. Es importante resaltar que esta zona correspondería al depocentro de la cuenca en donde se depositaron los materiales de edad paleoceno-holoceno y por lo tanto se podría relacionar con el paleorelieve presente hacia finales del cretácico en la cuenca. También es importante mencionar algunas irregularidades presentes en el mapa, que corresponden a zonas en donde las curvas de los contornos aparecen como círculos pequeños cerrados. Esto es producto de la estimación obtenida con el krigeaje, ya que este método se basa en la minimización del error local de estimación y su objetivo no es producir una superficie suave. Esto se ve en varios sectores del mapa, especialmente en donde hay muestras aisladas y eventualmente se puede corregir mediante un procedimiento de filtrado en el dominio espacial, lo cual es muy sencillo de aplicar. A pesar de esto, el mapa aparece mucho más regular y estructurado que el obtenido mediante interpolación con inverso de la distancia ponderada. Esto se interpreta como el resultado de la incorporación de la estructura de correlación espacial de la información, aspecto que resulta de vital importancia en estudios de este tipo.

El mapa de espesor de la formación Sabana aparece en la **Figura 2.32** En este mapa se puede apreciar una correlación clara entre los rasgos positivos y negativos del mapa de la **Figura 2.32** y el presentado en la **Figura 2.33**. Esto es una consecuencia directa del hecho que los depósitos fluvio-lacustres de la formación Sabana se depositaron sobre un paleorelieve conformado por las rocas de las formaciones Guaduas y Guadalupe, las cuales fueron afectadas por los 3 pulsos de levantamiento de la Cordillera Oriental. El mapa de espesor de la Fm. Sabana presenta una tendencia hacia el N30E, pero menos acentuada que en el caso del mapa de profundidad de roca, debido a que se observa la ocurrencia de procesos de depositación localizados y otros controlados estructuralmente por la paleotopografía, y lo cual se ve reflejado por la ocurrencia de curvas de nivel cerradas de poca extensión áreal

.

3 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA BIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS DE BOGOTÁ

Con el fin de optimizar los recursos disponibles en cuanto a información geotécnica y bibliográfica, se realizó la siguiente recopilación de información:

3.1 REVISIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ.

Se consultó la bibliografía referente a los modelos geológicos y geotécnicos de la Sabana de Bogotá, realizados por diversos autores (Van Der Hammen y Hooghiemstra, 1997, Torres et al 2005, y Rodríguez J.A. (numeral 2). Esta información permitió tener un marco de referencia, en el cual se incluyeron las observaciones del comportamiento de los suelos de Bogotá para su caracterización mecánica y posterior agrupación orientada hacia la elaboración de los modelos geotécnicos de las secciones de análisis.

En la actividad de recopilación y análisis de información geotécnica para el proyecto, se tomaron como referencia varios estudios existentes disponibles para la ciudad de Bogotá. A continuación se relacionan los más importantes:

3.1.1 Microzonificación Sísmica de Bogotá, MZSB (INGEOMINAS - UNIANDES, 1997)

Dentro de la información disponible del estudio MZSB se empleó la siguiente:

- Profundidad de la roca dentro del mapa de espesor de sedimentos
- Secuencia estratigráfica del subsuelo en diferentes sectores de la ciudad
- Curvas dinámicas de degradación de módulo de corte
- Amortiguamiento con la deformación por corte.

3.1.2 Sistema de Información para Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (SIRE)

Los registros de los acelerogramas de análisis fueron recopilados del sitio WEB preparado por el SIRE y corresponde a catorce (14) representativos de la amenaza sísmica de la ciudad.

Los registros corresponden a los sismos de:

- Fuente Cercana: Oroville, Coyote, Mamoth, Coalinga, Umbria y La Uribe
- Fuente Regional - Falla Frontal: Yerbabuena, Mt. Baldy, Deer Canyon, Newport y Okayama.
- Fuente Lejana – Zona de Subducción: México CU01, México CUIP y México CUMV.

3.1.3 Registros del sistema de información geotécnico SISGEO de la EAAB

Esta información consiste en perforaciones con profundidades variables entre 10m y 50m, las cuales incluyen descripción geotécnica y eventualmente propiedades mecánicas estáticas y dinámicas.

3.1.4 Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá (numeral 2)

De este estudio se extrajo la información correspondiente a los registros de perforaciones que se encuentran en cercanías de las secciones de análisis, las cuales se describirán posteriormente. En estos registros se pudo obtener información de la caracterización de los suelos con propiedades índice y complementada en muchos casos con caracterización dinámica por medio de mediciones de velocidades de onda de corte realizadas en ensayos de Down Hole. Para la Sección 1 se emplearon veintiocho (28) perforaciones, para la Sección 2, se tuvieron en cuenta cuarenta y ocho (48) perforaciones, para la Sección 3 se emplearon once (11) perforaciones y para la sección 4

3.1.5 Proyecto Metro

Se tomó la información de dos (2) perforaciones con una profundidad mayor a 40m, de donde se obtuvieron caracterizaciones para la elaboración del modelo geotécnico de la Sección 3.

3.1.6 Estudios realizados por Empresas de Consultoría Privadas

Entre ellos se pueden citar los siguientes:

- Estudio de respuesta sísmica local para el Manhattan Centro Internacional, realizado por Ingeniería y Georiesgos, 2005.

- Estudios y diseños para la regulación vial y adecuación de la calle 80 al sistema Troncal, realizado por el Consorcio entre las firmas Restrepo y Uribe Ltda. y Sesac Ltda, en el año 1997, con 2 perforaciones de 45m de profundidad en el puente de la calle 80 con avenida Boyacá.

- Estudio de respuesta sísmica local para el trayecto entre el puente peatonal del apogeo y el puente vehicular de la Av. Villavicencio x Autopista Sur, realizado por Ingeniería y Georiesgos, 2004.

- Estudio de respuesta sísmica e interacción dinámica del suelo-tubería y diseño de las soluciones en las líneas Wiesner-Suba y Silencio-Casablanca, en ejecución por parte de la firma HMV Ingenieros

De los anteriores, se extrajo información sobre registros de perforación y, en la medida que fue posible, modelos geotécnicos de algunos tramos de las secciones.

3.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

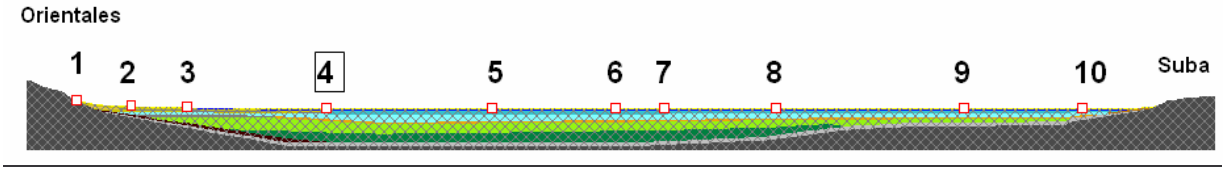
3.3 SECCIONES DE ANÁLISIS

Para llevar a cabo el estudio, se determinó trazar cuatro (4) secciones transversales (**Figura 3.1**) en distintos puntos de la ciudad, con el objeto de abarcar todas las zonas previamente definidas en el estudio de MZSB. En estas secciones se efectuó una caracterización geotécnica, estática y dinámica, con el fin de realizar una posterior modelación numérica utilizando programas de elementos finitos bidimensionales como QUAKE/W, QUAD4M, y FLAC3D, en los cuales, además de representar la geometría de los depósitos cuaternarios, fue posible involucrar la geometría de los Cerros Orientales y Cerros de Suba, junto con la variación en profundidad del basamento rocoso.

A continuación se describe cada una de las secciones de análisis:

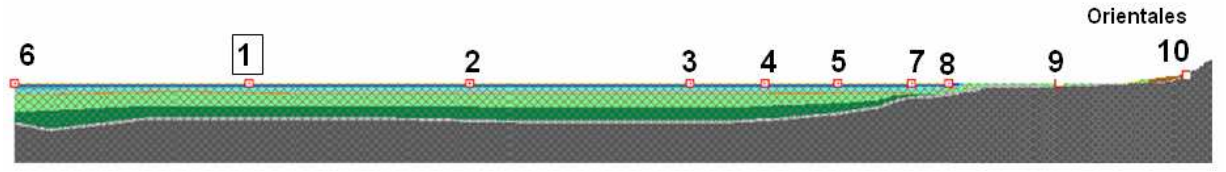
3.3.1 Sección 1 Calle 162

Orientada en sentido oriente-occidente; empieza en los Cerros Orientales con Calle 162 y avanza en dirección occidental hacia los Cerros de Suba, pasando por el Centro Comercial Cedritos, atravesando la Autopista Norte (por la Calle 146), pasando por el Canal Córdoba en la Calle 144A, y terminando aproximadamente en la Carrera 95 x Calle 131A, sector de Suba.



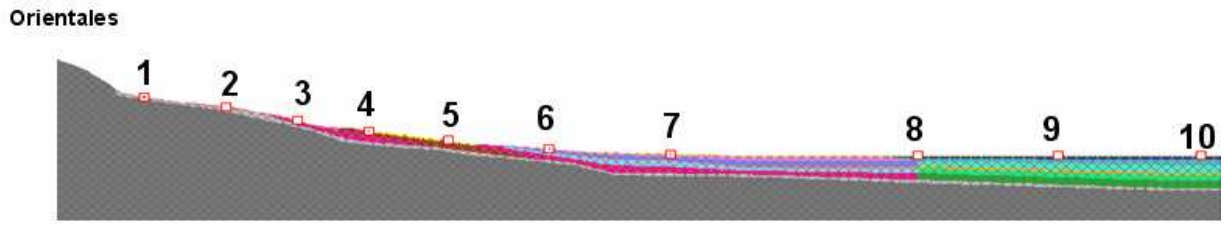
3.3.2 Sección 2 Calle 72

Orientada en sentido oriente-occidente; empieza en los Cerros Orientales, aproximadamente en la cota de 3000 msnm, siguiendo el alineamiento de la Calle 72. Avanza en dirección Noroccidental, pasando por la Calle 71 con Transv. 1E., luego atraviesa la Carrera 7ª por la Calle 71, sigue el alineamiento de la Avenida Chile, pasando por la Porciúncula, por el Centro Comercial Granahorrar, por la Universidad Pedagógica hasta llegar a la Avenida Ciudad de Quito, sitio en el cual se aparta de la misma para tomar la Calle 70 hacia el occidente. Posteriormente, atraviesa la Avenida Ciudad de Cali, aproximadamente por la Calle 69, para finalmente terminar en el Río Bogotá, en cercanías del Aeropuerto El Dorado.



3.3.3 Sección 3 Calle 34

Debido a la ausencia de información en la zona sur de la ciudad, se optó por trazar dos secciones en las que engloban la información disponible. La primera de ellas avanza en sentido oriente-occidente; empieza a una cota de 2800 msnm, en cercanías del barrio La Perseverancia (cerros orientales), avanza en dirección noroccidental siguiendo aproximadamente el alineamiento de la calle 34, pasando por el Colegio San Bartolomé La Merced, y cruzando por la intersección de la Av. Jorge Eliécer Gaitán con Av. de Las Américas.



3.3.4 Sección 4 Río Tunjuelo

La cuarta sección, descrita en sentido sur occidente - nororiente, comienza en el cerro del tanque Casablanca, pasa por la intersección vial de la Autopista Sur con Avenida Villavicencio, atraviesa el Río Tunjuelo en cercanías del Almacén Makro de Villa del Río, y termina en la intersección de la Avenida Boyacá con Diag 43S.

3.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS ESTÁTICOS

Las condiciones típicas del perfil de los suelos lacustres de Bogotá, corresponden a tres formaciones, cuyas características se pueden describir de la siguiente manera. Un espesor pequeño de rellenos y suelos superficiales desecados y sobreconsolidados del orden de 5 m, seguido por una secuencia de suelos arcillosos de origen lacustre de la formación Sabana, los cuales han sido divididos para considerar la variación en su rigidez por efectos de confinamiento. Posteriormente se encuentra una secuencia de suelos de origen predominantemente aluvial con presencia de arenas que corresponde a la formación Subachoque. Estas formaciones tienen espesor variable que aumenta desde los piedemontes de los cerros que bordean la Sabana hacia la parte central de los valles que se forman entre las cadenas montañosas, y además en dirección sur y sur occidental en la misma dirección general de flujo del río Bogotá (H-MV, 2003, Ingeominas, 2005).

En el sector del norte de Bogotá, entre los cerros de Suba y orientales el espesor máximo es del orden de 200m (Microzonificación Sísmica de Bogotá, 1997). Hacia el sur de la calle 80 aproximadamente, donde termina el cerro de Suba los espesores de los depósitos aumentan, posiblemente por efectos tectónicos. En el sector de Funza, se obtienen los máximos espesores del orden de 480 m.

Las formaciones Sabana y Subachoque tienen una composición relativamente uniforme en cuanto a tipos de materiales y su comportamiento mecánico está influenciado por la variación de los esfuerzos de confinamiento con la profundidad. Sin embargo localmente existen variaciones en la estratigrafía relacionados con el origen e historia de los suelos desde su

formación. En el caso de la formación Subachoque las variaciones se deben a la dinámica deposicional de las antiguas corrientes de agua que formaron los depósitos aluviales y por lo tanto pueden presentar variaciones locales significativas.

Esto es similar a lo que se observa a poca profundidad en el sector sur occidental de la ciudad correspondiente a los abanicos de los ríos Tunjuelo y Fucha. Los antiguos cauces y valles aluviales tuvieron una pendiente longitudinal del orden de 0,8%, la cual fue variando en función de los levantamientos tectónicos de la cordillera y la tasa de denudación, relacionada a su vez con las variaciones del clima (Rodríguez J.A. et al 2006).

3.5 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DINÁMICOS

En este numeral se describe el proceso de selección de los parámetros dinámicos y en la **Tabla 3.1** se presenta un resumen de los materiales utilizados, especificando la sección en la que fueron usados y su fuente. Las **Tablas 3.2 a 3.28** y las **Figuras 3.2 y 3.3** muestran las curvas de reducción de modulo de corte y el amortiguamiento de los 27 materiales modelados en las cuatro secciones transversales.

3.5.1 Velocidad de onda de corte, Vs

La velocidad de propagación de ondas de corte es un parámetro básico para la obtención de la respuesta dinámica del subsuelo, depende principalmente de la rigidez del material depositado y es el principal insumo para la caracterización de las cuatro secciones de análisis que están definidas en el numeral 3.1 a las cuales en el presente estudio, se les realiza un análisis de respuesta bidimensional. Las consideraciones tenidas en cuenta para caracterizar los materiales en profundidad de las secciones de análisis fueron los siguientes:

Para la caracterización de los materiales correspondientes a las zonas 3 y 4 de la microzonificación sísmica de Bogotá para profundidades menores a 50 m, se contó con información disponible de perforaciones y ensayos geofísicos de down hole ubicados en cercanías al trazado de las secciones definidas. La mayoría de ésta información se encontró recopilada en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá.

Para puntos de las secciones en los cuales no se contó con información de Vs medida en campo, se procedió a estimar un perfil de velocidad de onda a partir de la definición de un perfil geotécnico en función del índice de plasticidad y el peso unitario; lo anterior se realizó teniendo en cuenta la correlación presentada en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá (numeral 2) entre la rigidez dinámica in situ a bajas deformaciones (ensayo down hole) y los parámetros de tipo de material (índice de plasticidad) y su estado (relación de vacíos, relación de sobreconsolidación y presión de confinamiento); dicho estudio plantea una relación de tipo lineal entre la rigidez dinámica en función del parámetro de normalización K definido por Rodriguez y Escallón (2006 a) y el índice de plasticidad de los suelos arcillosos para un rango de IP de 30 a 190 con el fin de estimar los valores de Vs a partir de parámetros geotécnicos básicos. A

continuación se referencia lo anterior y se muestra el procedimiento para la definición de los perfiles de Vs.

Para la caracterización de los puntos de las secciones donde no se contaba información de Vs proveniente de ensayos de down hole ni con un perfil de propiedades de estado detallado que posibilitara la estimación de un perfil de velocidad de onda según la metodología planteada anteriormente, se extrapoló dicho perfil con base en las tendencias generales obtenidas de variación de Vs con la profundidad en la formación Sabana y Subachoque ($Vs=AoZ^m$, Rodríguez, 1994) que se reportaron en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá.

Habiéndose caracterizado la variación de la rigidez con la profundidad, posteriormente se definió la profundidad de contacto entre las formaciones Sabana y Subachoque, teniendo en cuenta información geomorfológica y las tendencias planteadas en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá (numeral 2).

Los tramos de las secciones que atraviesan partes de la zona 2 presentan una gran variabilidad de los valores de Vs en el perfil así como la profundidad de la roca; estas variaciones pueden ser considerables aún en sitios localizados a corta distancia entre sí e implican una alta posibilidad de grandes contrastes de impedancia y espesores de suelos no muy gruesos, lo cual resulta en grandes amplificaciones en la respuesta dinámica especialmente a periodos cortos. También se presentan capas de baja rigidez (limos orgánicos o turbas), de espesores considerables y en algunos casos continuos lo cual produce un efecto de disminución de la

Para analizar las zonas de piedemonte, y considerando su gran variabilidad, se realizó una agrupación con base en los sondeos localizados en estas zonas de la ciudad de manera que se obtuvieran capas de suelo con similares características dinámicas. Igualmente se recurrió a algunos modelos previamente elaborados y analizados (e.g. Ingeniería y Georiesgos, 2004 y 2005), con el objeto de complementar las secciones a modelar.

Debido a la variabilidad de las condiciones de suelos resulta muy difícil pretender hacer generalizaciones o extrapolaciones a partir de datos puntuales.

3.5.2 Modulo de Corte máximo, $G_{máx}$

Los valores del modulo de corte máximo $G_{máx}$ se determinan con la ecuación

$G_{\max} = \rho \cdot V_s^{\,2}$

Donde :

ρ : Densidad del material, $\rho = \gamma / g$

γ : Peso unitario del material

g : Aceleración de la gravedad

V_S : Velocidad de propagación de la onda de corte en el material

3.5.3 Variación del modulo de corte normalizado ($G/G_{máx}$) y el amortiguamiento (β) con la deformación por corte (γ)

La selección de curvas de degradación de la rigidez y el amortiguamiento en función de la deformación por corte se realizó según lo recomendado en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá (numeral 2). En dichas recomendaciones se plantea que el comportamiento de los materiales de las zonas 3 y 4 de la microzonificación sísmica de Bogotá puede ser normalizado teniendo en cuenta un criterio conservador con base en una envolvente de la tendencia general encontrada en sus curvas dinámicas y datos de referencia de la literatura técnica internacional. En el numeral 4.1.2, se muestra el análisis de sensibilidad de la respuesta unidimensional que se realizó con el fin, entre otros, de definir las curvas dinámicas que caracterizarían los depósitos de los tramos de las secciones que atraviesan las zonas 3 y 4 de la MZSB

Para los materiales característicos de las zonas 1 y 2, los principales criterios de escogencia de las curvas de comportamiento dinámico fueron la clasificación USCS, contenido de finos e índices de plasticidad, esfuerzo de confinamiento, módulo de rigidez inicial de los ensayos de velocidad de onda de corte Vs en campo provenientes de ensayos aledaños a las secciones definidas.

3.6 ACELEROGRAMAS REPRESENTATIVOS

Teniendo en cuenta que la evaluación de la respuesta dinámica del subsuelo requiere que la amenaza sísmica se exprese como señales en el dominio del tiempo (aceleración vs. tiempo), se emplearon los acelerogramas relacionadas en el informe *Revisión de la Amenaza Sísmica y Señales Sísmicas para la Actualización de la Microzonificación de Bogotá y Estudios de Efectos Locales* elaborado por la Subdirección de Investigación y Desarrollo, Coordinación de Estudios y Conceptos de la DPAE.

3.6.1 Fuente Cercana

Para obtener las señales que representan un evento sísmico originado por las fallas que constituyen la Fuente Local se revisó el inventario disponible de acelerogramas históricos, nacionales e internacionales localizados entre 15 y 20 Km registrado en roca o suelo muy firme (para evitar efecto de sitio). Los acelerogramas que cumplieron estas condiciones se muestran en la **Figura 3.4 a 3.9** y sus parámetros en la **Tabla 3.29 y 3.30**

La forma de los correspondientes espectros tripartita de los acelerogramas considerados para Fuente Cercana, para un amortiguamiento del 5% se presenta en la **Figura 3.18**

3.6.2 Fuente Frontal de la Cordillera Oriental

Para obtener las señales que representan un evento sísmico originado por las fallas que constituyen la Fuente Frontal se revisó el inventario disponible de acelerogramas históricos, nacionales e internacionales que cumplieran las condiciones, localizados a una profundidad media de 60 Km, frente a la ciudad, registrado en roca o suelo muy firme (para evitar efecto de sitio). Los acelerogramas que cumplieron estas condiciones se muestran en la la **Figura 3.10 a 3.14** y sus parámetros en la **Tabla 3.29 y 3.30**

La forma de los correspondientes espectros tripartita de los acelerogramas considerados para Fuente Frontal, para un amortiguamiento del 5% se presenta en la **Figura 3.19**

3.6.3 Fuente Lejana

Para obtener las señales que representan un evento sísmico originado en la Zona de Subducción del Pacífico se revisó el inventario disponible de acelerogramas históricos, nacionales e internacionales que cumplieran las condiciones, localizados a un distancia de 350 y 400 Km, registrado en roca o suelo muy firme (para evitar el efecto de sitio). Los acelerogramas que cumplieron estas condiciones se muestran en la **Figura 3.15 a 3.17** y sus parámetros en la **Tabla 3.29 y 3.30**

La forma de los correspondientes espectros tripartita de los acelerogramas considerados para Fuente Lejana, para un amortiguamiento del 5% se presenta en la **Figura 3.20**

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.1 SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA UNIDIMENSIONAL

Teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo computacional propias de cada programa en los que se realizaría la modelación bidimensional, lo cual esta directamente relacionado con la dimensión de la malla de elementos finitos y diferencias finitas de QUAKE Y QUAD4M respectivamente, se realizó un análisis unidimensional con el programa EERA para evaluar la cantidad y tipo de materiales optimo.

4.1.1 Influencia del espesor y número de estratos

Con el objeto de cuantificar la influencia del espesor y número de estratos en los resultados de la modelación, se realizó un análisis de sensibilidad en las formaciones Sabana y Subachoque variando estos parámetros. Se determinó el espesor y número de estratos adecuado para realizar la modelación de las formaciones teniendo en cuenta la diferencia que arrojaban los espectros de aceleración resultado de modelar con diferente numero de estratos una columna estratigráfica típica de la zona 3 de la MZSB ubicada en la carrera 46 con calle 140ª.

La **Figura 4.1** muestra las propiedades índice, el peso unitario y el perfil de velocidad de onda de corte medido en campo de dicho punto. Con base a las correlaciones presentadas en el numeral 3.3.1, se definió un perfil de velocidad de onda estimado para toda la columna estratigráfica, la profundidad de contacto de las dos formaciones y la profundidad de la roca. Definidos los parámetros anteriores, se modelaron 15 perfiles diferentes para el mismo punto, 5 modelos para el rango mínimo y 4 para el rango máximo de Vs para el análisis de sensibilidad de la formación sabana; 4 modelos para el rango mínimo y 4 para el rango máximo para la modelación de la formación subachoque. La **Tabla 4.1**, muestra los incrementos y rangos de velocidad de onda utilizados en los modelos. Las **Figuras 4.2 a 4.4** ilustran las configuraciones de número y espesor de estratos que se supusieron para la sensibilidad de las dos formaciones. Con el fin de disminuir factores que aumentaran la respuesta por causas de fenómenos de impedancia se definió una zona de transición de materiales entre las formaciones Sabana y Subachoque la cual tiene un salto en la rigidez dinámica del suelo de 16 m/seg y de 90m/seg en la modelación del rango mínimo y máximo respectivamente. Las **Figuras 4.5 a 4.8** muestran los espectros de aceleración resultado de los 15 modelos para los sismos Uribe y México de las fuentes cercana y lejana.

4.1.2 Influencia en la variación de las curvas dinámicas

A continuación se muestra el procedimiento que se llevo a cabo para la definición de las curvas de degradación de la rigidez y el amortiguamiento que caracterizarían los estratos modelados de la formación Sabana para zonas 3 y 4 de la MZSB definidos anteriormente.

Con base en dos columnas estratigráficas de suelo con una cantidad considerable de datos de propiedades índice en profundidad, una típica de la formación Sabana y otra típica de la formación Chía, se obtuvieron curvas dinámicas para profundidades diferentes que fueron halladas según correlaciones referenciadas en el numeral 3.3.3. La **Figura 4.9**, muestra el perfil de humedades utilizado para el análisis de la formación Sabana y Chía. La **Figura 4.10** muestra las curva promedio, promedio más desviación estándar y promedio menos desviación de la degradación de la rigidez, así como las curvas del amortiguamiento; teniendo en cuenta la recopilación de resultados obtenida en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá de los ensayos bender element acerca de los valores de amortiguamiento inicial de los materiales de la formación Sabana, se realizó el análisis de sensibilidad con curvas con amortiguamientos iníciales que variaron desde 2% hasta el 6%.

Los modelos 22 al 27, corresponden a los perfiles que se modelaron para evaluar la influencia en la respuesta del suelo debido a variaciones de las curvas de rigidez; los modelos 22, 23 y 24 para la formación Sabana y los modelos 25, 26 y 27 para la formación Chía. Los modelos 28 a 37 corresponden a los perfiles que se modelaron para evaluar la influencia en la respuesta del suelo debido a variaciones de las curvas de amortiguamiento; los modelos del 28 a 32 para la formación Sabana y los modelos 33 a 37 para la formación Chía.

Las **Figuras 4.11 a 4.21** muestran los espectros de aceleración resultado de los 16 modelos para los sismos Uribe y México de las fuentes cercana y lejana.

4.1.3 Influencia en la variación del modulo de corte.

Se realizó un análisis de la influencia de la variación en la velocidad de onda de corte (ensayo down hole), especialmente en relación a los cambios drásticos del registro. Con base el perfil de Vs utilizado para la evaluación del número y espesor de los estratos (numeral 4.1.1). Se modelaron 9 perfiles. La **Figura 4.2**, muestra el modelo 1 que cuenta con el registro completo de Vs en profundidad, el modelo No 2 (**Figura 4.3**); y los modelos No 16, 17, 18 en los cuales se utilizó la siguiente configuración:

Modelo 16

Formación Chía
modelo 1
Formación Sabana
(0 m a 26m)→ -20 m/seg de correlación Vs = 65 * $p^{0.2}$
con incrementos de 5% de Vs
(27m a 36m)→ PICO Down Hole
(36m a 53m)→ -20 m/seg de correlación Vs = 65 * $p^{0.2}$
Con incrementos de 5% de Vs
Transición
modelo 1
Formación Subachoque
Modelo 1

Modelo 17

Formación Chía
modelo 1
Formación Sabana
(0 m a 15m)→ -20 m/seg de correlación Vs = 65 * p0.2
con incrementos de 5% de Vs
(15m a 26m)→ PICO Down Hole
(26m a 53m)→ -20 m/seg de correlación Vs = 65 * p0.2
con incrementos de 5% de Vs
Transición
modelo 1
Formación Subachoque
Modelo 1

Modelo 18

Formación Chía
modelo 1
Formación Sabana
(4 m a 15m)→ PICO Down Hole
(26m a 53m)→ -20 m/seg de correlación Vs = 65 * p0.2
con incrementos de 5% de Vs
Transición
modelo 1
Formación Subachoque
Modelo 1

A su vez, se analizó la influencia de considerar intercalaciones de estratos de turba y arena en la formación Sabana. Se modelaron 9 perfiles. La **Figura 4.4**, muestra el modelo 6 que modela estima la velocidad de onda según las tendencias presentadas anteriormente y los modelos No 19, 20 y 21 en los cuales se utilizó la siguiente configuración:

Modelo 19

Formación Chía
modelo 6
Formación Sabana
Lentes
Turba → (12m a 14m), Vs = 75 m/seg, PU = 12
Arena → (30m a 32m), Vs = 220 m/seg, PU = 16
Transición
modelo 6
Formación Subachoque
Modelo 6

Modelo 20

Formación Chía
modelo 6
Formación Sabana
Lentes
Turba → (12m a 14m), Vs = 75 m/seg, PU = 12
Transición
modelo 6
Formación Subachoque
modelo 6

Modelo 21

Formación Chía
modelo 6
Formación Sabana
Lentes
Arena → (30m a 32m), Vs = 220 m/seg, PU = 16
Transición
modelo 6
Formación Subachoque
modelo 6

4.2 SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA BIDIMENSIONAL

4.2.1 Influencia de la modelación bidimensional en diferentes programas de computador

Debido a las diferencias encontradas entre los resultados arrojados por QUAD4M Y QUAKE de una modelación inicial de la sección 1, se procedió a realizar un análisis de respuesta bidimensional teniendo en cuenta los dos programas anteriores y validando dichos resultados por medio de la utilización de un tercer programa (PLAXIS). Con el fin de reducir el número de variables que posiblemente influían en las diferencias de los resultados, se modeló la sección que se muestra en la **Figura 4.22**. Se realizaron dos análisis en los cuales se supuso un modelo lineal elástico para el cual en la prueba No 2 se caracterizaron los materiales con amortiguamiento inicial de 0%, con el fin de dilucidar la influencia del amortiguamiento en la amplificación de la secciones modeladas.

Material 1 (color gris)
Vs : 1000 m/seg
Coeficiente de Poisson : 0.35
Peso Unitario : 25 Kn/m3
Prueba 1 : Amortiguamiento Inicial : 0.8 %

Prueba 2 : Amortiguamiento Inicial : 0%

Material 2 (color gris)
Vs : 100 m/seg
Coeficiente de Poisson : 0.25
Peso Unitario : 14 Kn/m3
Prueba 1 : Amortiguamiento Inicial : 8 %
Prueba 2 : Amortiguamiento Inicial : 0%

Las **Figuras 4.23 a 4.34** muestran los espectros de aceleración en superficie en cada uno de los puntos de análisis para la prueba No 1 y 2 para los sismos la Uribe y México.

Las diferencias observadas en los resultados obtenidos para las secciones analizadas en la ciudad de Bogotá, de los resultados del Quake, Quad4M y Plaxis posiblemente se deban a la forma como cada programa calcula los coeficientes de amortiguamiento a y b del esquema de amortiguamiento de Raleigh. En la **Figura 4.35** se observa la variación de la relación de amortiguamiento versus la frecuencia natural del sistema. La cual se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\varsigma = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$$

El modelo utilizado en Plaxis es lineal elástico, con parámetros a y b conocidos, el Plaxis trabaja en la parte lineal de la relación mostrada en la figura xx de la variación de la relación de amortiguamiento con la frecuencia natural, dados los valores de a y b adoptados, los cuales provienen de numerosos análisis de calibración entre análisis 1D realizados con el programa EERA y análisis 2D utilizando Plaxis. Por el contrario Quake trabaja en la parte no lineal de la grafica, debido a que solo usa las dos frecuencias más bajas del sistema para el cálculo de los parámetros a y b. Por otra parte Quad4M usa la frecuencia fundamental del sistema y otra frecuencia que depende del periodo fundamental del movimiento sísmico y la deformación promedio desarrollada en el elemento para el cálculo de los parámetros a y b, lo cual explica las diferencias con el Plaxis y el Quake. Este cálculo se hace de la siguiente manera:

$$\omega_2 = \eta\omega_1$$

donde n es el entero impar más cercano a la expresión

$$\omega_i/\omega_1$$

ω_i es la frecuencia predominante del movimiento sísmico.

Para establecer el amortiguamiento en las dos frecuencias, los valores α_q y β_q

$$\alpha_q = 2\lambda_q \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$$

$$\beta_q = 2\lambda_q \frac{1}{\omega_1 + \omega_2}$$

Este esquema subamortigua entre las frecuencias ω_1 y ω_2 y sobreamortigua en el resto de las frecuencias. El esquema permite responder a las frecuencias predominantes del movimiento de entrada sin experimentar sobreamortiguamientos significativos.

Las razones de amortiguamiento de los elementos, λ_q, son escogidas con base en la deformación promedio desarrollada en el elemento.

El valor de ω_1, (la frecuencia fundamental del sistema), es calculada resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones.

$$K\underline{\Phi}^1 = \omega_1^2 M \underline{\Phi}^1$$

La primera función de forma es representada por Φ^1

4.2.2 Influencia de las Condiciones de Frontera

Con el objeto de determinar la influencia de las condiciones de frontera en la respuesta de los depósitos de piedemonte, se modeló el Cerro de Suba en su totalidad, es decir, completando el perfil hacia el costado occidental y se comparó con la sección 1, que se remata en la parte alta del cerro. Ver **Figura 4.36**. La respuesta se compara en términos de espectros de aceleración, en un mismo punto para los dos modelos, encontrándose diferencias poco significativas, como se muestra en la **Figura 4.37**

Igualmente, se realizó un modelo tomando una mayor longitud de los cerros orientales (aproximadamente 2km, ver **Figura 4.38**. En la **Figura 4.39** se observa la comparación en los espectros obtenidos, de donde se puede concluir que no existe una afectación importante como producto de truncar la geometría en un punto intermedio del cerro. En general se encontró, como era de esperarse, que los puntos menos afectados se encuentren en la zona lacustre, mientras que los que presentan mayores cambios están ubicados en la zona de piedemonte.

4.2.3 Influencia del espesor del basamento rocoso y dimensionamiento de la malla de elementos finitos

Teniendo en cuenta el gran tamaño de las secciones de análisis y la necesidad de elaborar mallas con un número de elementos finitos razonable para optimizar los tiempos de corrida de acuerdo con las limitaciones de los programas utilizados, se decidió efectuar un análisis de sensibilidad para las siguientes variables:

- Espesor del basamento rocoso.
- Historias de aceleraciones para puntos cercanos a la frontera lateral y en la mitad del modelo de análisis.
- Relaciones L/B de los elementos finitos.

Para el análisis de sensibilidad se definieron tres modelos diferentes, en los cuales se variaron el espesor del basamento rocoso entre 0m y 50m, las relaciones L/B de los elementos finitos entre 1.0 y 20.0 y se consideraron historias de aceleraciones para puntos cercanos a la frontera lateral y otros puntos en superficie y profundidad dentro del modelo de análisis. La descripción general de cada modelo es la siguiente:

Modelo 1, con un depósito de suelo blando de 150m/s de Vs, profundidad del basamento rocoso a 50m y sin considerar un espesor de roca en la base del modelo. La relación L/B de los elementos finitos cuadriláteros es de 5.0 y se da cumplimiento al chequeo de longitud de onda para el dimensionamiento vertical de la malla. El modelo 1 y los puntos de análisis se pueden observar en la **Figura 4.40**.

Modelo 2, con un depósito de suelo blando de 150m/s de Vs, profundidad del basamento rocoso a 50m y considerando un espesor de roca de 50m en la base del modelo. La relación L/B de los elementos finitos cuadriláteros es de 1.0 para la roca y de 5.0 para el suelo, y se da cumplimiento al chequeo de longitud de onda para el dimensionamiento vertical de la malla. El modelo 2 y los puntos de análisis se pueden observar en la **Figura 4.41**

Modelo 3, con un depósito de suelo blando de 150m/s de Vs, profundidad del basamento rocoso a 50m y considerando un espesor de roca de 50m en la base del modelo. La relación L/B de los elementos finitos cuadriláteros es de 4.0 para la roca y de 20.0 para el suelo, y se da cumplimiento al chequeo de longitud de onda para el dimensionamiento vertical de la malla. El modelo 3 y los puntos de análisis se pueden observar en la **Figura 4.42**

Una vez realizadas las corridas y efectuados los análisis, se pudo concluir lo siguiente:

La variación del espesor del basamento rocoso en los modelos de análisis tiene una pequeña influencia en los espectros de respuesta en superficie, siendo menores los valores de aceleración espectral para mayores espesores de roca. Sin embargo, se mantienen las formas espectrales y se conservan los picos de aceleración espectral para los mismos periodos en ambos casos, de tal forma que los resultados obtenidos son similares. Los resultados y espectros de respuesta se aprecian en la **Figura 4.43**

Los espectros de respuesta son iguales en superficie para puntos cercanos y lejanos a las fronteras de los modelos de análisis, lo que evidencia que las condiciones de fronteras absorbentes no tienen influencia relevante en la respuesta de puntos cercanos a estas. Los resultados de este hecho se observan en la **Figura 4.44**

La variación del dimensionamiento de los elementos finitos, con relaciones L/B entre 1.0 y 20.0, no tiene influencia en los espectros de respuesta en superficie, obteniéndose los mismos valores para el modelo 2 y el modelo 3. Los resultados se observan en la **Figura 4.45**

Estas conclusiones son bastante importantes en busca de la optimización de los procesos y criterios para el dimensionamiento de las mallas de elementos finitos de las secciones de análisis. Es importante aclarar que el chequeo de longitud de onda para el dimensionamiento vertical del elemento finito, es clave en la obtención de resultados coherentes.

4.2.4 Influencia de la profundidad de análisis en los espectros de respuesta

Con el objeto de establecer la influencia de la profundidad de análisis en los espectros de respuesta, en las **Figura 4.46** a **Figura 4.50** se muestran las formas espectrales para puntos entre 5 y 10m y entre 10 y 15m de profundidad, debajo de los puntos en superficie analizados, teniendo en cuenta que estos pueden ser los niveles de fundación de edificaciones de varios sótanos. Los resultados se muestran agrupados por sismo, y por la zona en la cual se encuentran los puntos.

Como se puede observar en estas figuras, existen diferencias notables cuando se analizan los puntos a otras profundidades, especialmente para los sismos de campo cercano e intermedio y para periodos menores a 1.0s. En general, se observa que las magnitudes disminuyen a medida que se aumenta la profundidad y, en ese caso, cuando la respuesta se calcula en superficie, se están obteniendo valores más conservadores.

5 ANÁLISIS DE RESPUESTA DINÁMICA BIDIMENSIONAL

La modelación dinámica 2D se realizó con los programas QUAD4M, con ayuda del módulo DSUN del programa GID 6.1.2, que incluye un módulo de cálculo dinámico, QUAKE/W de Geoslope y FLAC3D. A continuación, se describen de manera sucinta las posibilidades de cada herramienta numérica:

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

5.1.1 Modelo GID - DSUN

Consiste en una interfase del programa GID (CIMNE - Universidad Politécnica de Cataluña) que incluye pre-procesador y post-procesador de mallas de elementos finitos para problemas de ingeniería, para emplearse en el programa QUAD4M. El módulo fue desarrollado por estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia (García H., Sierra E., 2003).

El módulo DSUN para GID se utilizó para discretizar la malla de elementos finitos 2D, empleando elementos cuadriláteros y teniendo en cuenta la geometría y propiedades de los diferentes tipos de materiales. Además, permite introducir los parámetros de los materiales y acelerogramas de entrada, para realizar las corridas con el programa QUAD4M. Posteriormente, facilita la obtención de curvas de isoaceleraciones, isoesfuerzos e isodeformaciones generadas por el sismo en todos los puntos de la malla.

5.1.2 QUAD4M

(A Computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base). Es un programa conocido mundialmente desde 1973, desarrollado por la Universidad de California, cuando apareció la primera versión (QUAD4)

Se utiliza para estudiar problemas 2D con estado plano de deformaciones, mediante la discretización del medio continuo (subsuelo) con elementos finitos cuadriláteros y triangulares, en los cuales el subsuelo (roca y/o suelo) es representado a través de un modelo de comportamiento dinámico lineal equivalente, en el que se evalúa la variación del módulo de corte y la relación de amortiguamiento del suelo, obteniendo los incrementos de esfuerzos, deformaciones y aceleraciones generadas por la carga dinámica o sísmica. La nueva versión (Hudson et al, 1994) incluye una base absorbente para reducir los errores que se generaban por amplificaciones inexistentes debidas al reflejo de ondas en las fronteras semi-infinitas inferior y lateral.

5.1.3 GEOSLOPE – QUAKE/W

QUAKE/W, es un software de elementos finitos para análisis dinámico de estructuras geotécnicas sujetas a movimientos sísmicos y otras cargas de impacto, tales como explosiones o hincado de pilotes. Hace parte de GEOSTUDIO y, por lo tanto, esta totalmente integrado con componentes tales como SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W y otros.

Por medio de QUAKE/W, se puede determinar el movimiento y los excesos de presión de poros que se generan como producto del evento sísmico.

Las funciones de propiedades de los materiales permiten emplear datos de laboratorio y datos publicados. Trabaja con tres modelos constitutivos: Lineal-elástico, Equivalente Lineal y un modelo de esfuerzos efectivos no lineal. QUAKE/W emplea el Método Directo de Integración para calcular el movimiento y los excesos de presión de poros que se generan de las fuerzas inerciales en pasos de tiempo definidos por el usuario.

Entre sus principales características, se pueden citar las siguientes:

- Realiza un análisis lineal equivalente, en el cual se pueden variar las relaciones de amortiguamiento y degradación del módulo en función de la deformación cortante de los suelos, para cada iteración.

- Es posible introducir funciones, mediante puntos, para especificar las propiedades de los materiales, sobrecarga, corrección de esfuerzos cortantes, presión de poros, amortiguamiento y degradación del módulo de corte.

- Es posible importar registros de acelerogramas verticales y horizontales, los pueden ser escalados y recortados dependiendo de las condiciones específicas del sitio de las condiciones específicas del sitio.

- Los tipos de condiciones de frontera incluyen desplazamientos en X y Y, fuerzas, esfuerzos, presiones, peso propios, cargas de gravedad, presiones de fluidos, etc.

5.1.4 FLAC3D

Es un programa de diferencias finitas para el análisis de problemas geomecánicos en un espacio tridimensional, bidimensional o unidimensional, desarrollado por Itasca Consulting Group. Los materiales son representados por elementos poliédricos, que se ajustan a la topografía y estratigrafía del problema en estudio. Cada elemento poliédrico puede tener un comportamiento esfuerzo-deformación diferente, como respuesta a las fuerzas aplicadas y a las condiciones de frontera del modelo. El material puede ceder y fluir, mientras las coordenadas

de la malla se pueden actualizar durante el proceso de cálculo (estimación de grandes deformaciones a través del esquema de Lagrange).

Entre las características básicas que este software ofrece se encuentran las siguientes:

- Cuenta con nueve librerías para representar el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales: modelo nulo (útil para excavaciones), tres modelos de elasticidad (isotrópico, transversalmente isotrópico y de elasticidad ortotrópica) y siete modelos de elasticidad (Drucker-Prager, Mohr-Couloumb, Mohr-Couloumb en discontinuidades, de endurecimiento-ablandamiento por deformación, bilineal de endurecimiento-ablandamiento por deformación en discontinuidades, de doble cedencia y Cam Clay modificado). A cada zona se le puede asignar un modelo o propiedad diferente.

- Las condiciones fronteras e iniciales pueden especificarse a través de velocidades y, esfuerzos en las fronteras en cualquier orientación. De igual manera, se puede especificar la condición de esfuerzos inicial, que incluye la carga gravitatoria, y la tabla de agua para el cálculo de esfuerzos efectivos.

- La condición hidráulica se simula a través de dos metodologías diferentes: una no acoplada a los procesos geomecánicos que ocurren en el medio y otra acoplada, esta última útil para el estudio de procesos de consolidación. Adicionalmente, es posible especificar características de deformabilidad tanto del fluido como de las partículas del medio.

- Se puede calcular el factor de seguridad automáticamente, para cualquier modelo Mohr-Couloumb, por medio de la técnica de reducción de resistencia, en la que se desarrolla una serie de simulaciones mientras se cambian las propiedades de resistencia para determinar las condiciones en las que ocurre un evento de inestabilidad.

5.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO

Tal como se describieron en el numeral 3.3 se analizaran 4 secciones representativas de las zonas de microzonificación sísmica de la ciudad. Para los programas QUAD4M Y FLAC3D, se elaboraron las mallas bidimensionales en el modulo GID-DSUN. El número de nodos y elementos de estas mallas se muestran en la **Tabla 5.1 y 5.2**. Las **Figuras 5.1 a 5.11** muestran los materiales de las cuatro secciones. Las **Figuras 5.12a a 5.19b** muestran la malla de elementos finitos para quad4M, Quake y Flac3D.

Como se mencionó antes, se realizaron cuatro (4) modelaciones en igual número de secciones en la ciudad de Bogotá que abarcan todas las zonas previamente definidas en la Microzonificación Sísmica de Bogotá. Los acelerogramas utilizados corresponden a registros directamente medidos en estaciones, sin escalar de acuerdo a lo descrito en el numeral 3.6 del presente informe. La definición de la malla de elementos finitos, se realizó con base al criterio de una dimensión mínima de los elementos finitos en la dirección de propagación de la onda;

estos fueron aproximadamente la sexta parte de la longitud de onda para cada estrato de material, la cual se calcula teniendo en cuenta la velocidad de onda del respectivo material y un periodo crítico de un sismo.

Con el objeto de validar los resultados obtenidos en la modelación con programas bidimensionales de elementos finitos, se realizaron corridas en el programa FLAC3D, para los puntos de análisis de la sección 1 para los sismos Umbria y Mt baldy

A continuación se muestran los espectros de aceleración en la componente en X para todos los puntos de análisis a lo largo de las secciónes clasificados por fuente sismogénica. En dichas gráficas se presentan los resultados arrojados por los programas Quake y Quad4M

5.2.1 Espectros de Aceleración y desplazamiento

En el Anexo 1 se presentan los resultados de los espectros de aceleración y desplazamiento para todas las zonas de análisis correspondientes a las tres fuentes sismogénicas.

5.3 RELACIONES ESPECTRALES

En el anexo 2 se presentan comparativamente loa resultados de QUAKE y QUAD4M en forma de relaciones espectrales para las zonas 2 y 3 de la MZSB.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados de amplificación de la respuesta en superficie entre los programas Quake y Quad4M, a continuación se muestra un análisis el cual clarifica para que periodos, en que zonas de la microzonificación sísmica de Bogotá y para que fuente sismogénica, los programas arrojan una respuesta similar.

CAMPO CERCANO

**Para todas las zonas*
muy similar para T<0.5 seg
**Para zona cerros*
símilar para T>0.5, hasta la aparición del primer pico (respuesta del deposito)

CAMPO INTERMEDIO

**Para todas las zonas*
muy similar para T<0.5 seg
**Para zona 3 y 4*
símilar para 0.5<T<2.0 seg
Para zona de piedemonte y cerros
símilar para T>0.5, hasta la aparición del primer pico (respuesta del deposito).

CAMPO LEJANO

*Para zona 3 y 4
similares para T< 1.3 seg

Por lo tanto y resumiendo el anterior análisis, la respuesta de amplificación de los programas COINCIDE para

T< 0.5 seg para sismos cercanos e intermedios en todas las zonas
T< 2.0 seg para sismos intermedios en la zonas 3 y 4
T< 1.5 seg para sismos cercanos en las zonas 3 y 4
T< 1.3 seg para sismos lejanos en la zona 3 y 4

A continuación se muestran gráficas para algunos intervalos de periodo de los puntos modelados en las tres secciones típicos del análisis de resultados hecho previamente; es decir cuando se estima que las respuestas de amplificación de los programas son *similares* se refiere a que la diferencia entre rangos de valores es :

- Para T< 0.5 seg para sismos cercanos e intermedios en todas las zonas
  Zonas de cerros y piedemonte. Ver **Figura 5.20**

- Para T< 0.5 seg para sismos cercanos e intermedios en todas las zonas
  Zonas de cerros y piedemonte. Ver **Figura 5.21**

- Para T< 2.0 seg para sismos intermedios en la zonas 3 y 4. Ver **Figura 5.22**

- Para T< 1.5 seg para sismos cercanos en las zonas 3 y 4. Ver **Figura 5.23**

- Para T< 1.3 seg para sismos lejanos en las zonas 3 y 4. Ver **Figura 5.24**

A continuación se muestra para que zonas de la microzonificación sísmica de Bogotá, para que fuente sismogénica, la respuesta de los programas difiere.}

- T > 0.5 seg para sismos cercanos en la zona de piedemonte. Ver **Figura 5.25**

- Para T > 1.5 - 2.0 para sismos cercanos e intermedios (último pico respuesta del deposito); en la zonas 3 y 4 . Ver **Figura 5.26**

- Para todo T en las zonas de piedemonte. **Figura 5.27**

5.4 COMPARACION DE LA RESPUESTA DE AMPLIFICACIÓN DE LOS PROGRAMAS QUAKE Y QUADAM CON BASE EN DATOS MEDIDOS EN CAMPO.

Con el objeto de verificar la validez de los resultados generados por los programas empleados, se realizó una comparación basada en datos instrumentados. Se utilizó como referencia el artículo "Evaluation of Site Effects Using Numerical and Experimental Analyses in Citta di Castello (Italy)" (F. Pergalani, R. de Franco, M. Compagnoni, G. Caielli, 2006) en el cual las historias de aceleracion en superficie medidas en campo fueron comparadas con el registro en roca de un sismo de Magnitud=4.3, una aceleración pico de 0.00146g y duración de 30s. Se realizó la modelación en QUAD4M y QUAKE. La **Figura 5.28 a 5.30** muestra la sección de análisis instrumentada y el modelo introducido en los programas y el acelerograma.

La comparación se realizó en términos de la relación entre las intensidades espectrales en los puntos instrumentados de la superficie y la señal en roca. El valor de la Intensidad Espectral (SI) se define como la relación de la integral del espectro de respuesta de velocidad en superficie entre la integral del espectro de respuesta de velocidad en roca para 5% de amortiguamiento. Esta integral fue evaluada en la referencia entre 0.1 y 0.5 segundos el cual es el rango representativo de los periodos dominantes de las edificaciones típicas del área que tienen influencia directa sobre el movimiento de las mismas.

Para realizar la comparación, se calculó la relación definida como (Fa):

$$Fa = \frac{SI(\text{sup}erficie)}{SI(señal)}$$

Posteriormente se comparó, para cada punto de la superficie instrumentado, el valor de Fa obtenido mediante la modelación y el calculado con el registro medido. En **Figura 5.31**, se muestran los resultados del análisis. Propiedades como la velocidad de onda de corte, curvas de degradación de módulo y amortiguamiento del material de la base transmisora del movimiento sísmico fueron asumidas con base en la descripción allí relacionada y consultando curvas de referencia internacional, debido a la ausencia de datos. Ésta suposición induce un factor de incertidumbre adicional. El sismo de entrada para los análisis numéricos fue registrado en la sección A-B, y es un sismo de baja intensidad (MI igual a 4.3, componente NS).

La figura muestra que los resultados del Quad4M se aproximan más a los obtenidos con base en los datos registrados, que los resultados obtenidos por medio de Quake. Se nota que los resultados obtenidos por medio de Quad4M coinciden con el rango de variación de los valores

obtenidos por medio de los registros.; sin embargo, los resultados arrojados por Quake son solo 1.4 veces aproximadamente mayores a dichos valores, y adicionalmente tienen un comportamiento mas similar a los valores de SI de los datos registrados. Las mayores diferencias se encuentran donde existe un cambio abrupto en la geometría del basamento rocoso (entre abscisas 2000 y 2200) y cerca de las fronteras del modelo

Cabe resaltar que estos análisis se hicieron con base en la información provista por medio de los autores de la referencia, los cuales incluyen los valores del registro medido, y SI de los datos medidos, entre otros. Sin embargo no se cuenta con los registros de aceleración en superficie para evaluar el valor de SI para un rango mayor de periodos y así poder obtener conclusiones definitivas.

5.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Con el objeto de comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con los obtenidos por los otros grupos de trabajo (e.g, Universidad de Los Andes), se realizó el cálculo de las funciones de transferencia para 5 puntos en cada sección analizada, utilizando 3 sismos de los trabajados en el estudio (uno para cada fuente).

Del análisis de estos datos se puede establecer lo siguiente:

- No existe una tendencia clara que permita deducir una función de transferencia única que abarque la respuesta producida por las 3 fuentes sísmicas modeladas. Preliminarmente se puede ver una concordancia de los sismos de fuente cercana e intermedia en la mayoría de los puntos analizados pero se presentan casos en los cuales existen diferencias significativas que deben ser analizadas en más detalle.
- Se puede decir que las funciones son aplicables para frecuencias mayores a 0.2Hz. Por debajo de este valor, se observa que los resultados muestran amplificaciones que no pueden ser adoptadas como válidas.
- Se puede observar un aumento en la dispersión de los resultados a medida que se incrementa el espesor del depósito en el punto que se está analizando. Esta situación puede atribuirse al hecho que pueden presentarse amplificaciones en otros periodos de vibración de la columna, que son más sensibles a la señal.

En conclusión, los datos obtenidos mediante este análisis no permiten inferir una función única de transferencia que contemple todas las señales representativas de las fuentes sismogénicas de la ciudad.

5.6 ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE. RESULTADOS DE QUAD4M

En el anexo 3 se muestran los resultados de las aceleraciones máximas en superficie teniendo en cuenta los resultados arrojados por el programa QUAD4M

5.7 ESPECTROS DE ACELERACIÓN. QUAD4M

Teniendo en cuenta la limitación computacional derivada de la imposibilidad de analizar en el programa QUAKE más de diez nodos en cada sección por cada corrida, sólo fue posible realizar comparaciones entre estos dos programas para dichos diez nodos; no obstante, en el programa QUADM, sí es posible analizar un número mayor de nodos. Los resultados de estos se muestran en el anexo 3.

6 ESPECTROS DE DISEÑO PROPUESTOS

6.1 ESTIMACION DE ESPECTROS DE DISEÑO A PARTIR DE ANÁLISIS DE RESPUESTA Y REGISTROS DE ACELERACIÓN

Con el fin de plantear una propuesta de espectros de diseño y de validar la respuesta dinámica obtenida por los programas de modelación bidimensional utilizados en el presente estudio, en este numeral se hace un análisis de información de la red de acelerógrafos de Bogotá, suministrada por la DPAE. A la fecha se cuenta sólo con un limitado número de estaciones y no se tienen registros de sismos fuertes, esto sin embargo permite apreciar algunos aspectos importantes de la respuesta sísmica en la ciudad. En particular es importante identificar si las tendencias generales de comportamiento predichas por los modelos en las distintas zonas de la ciudad son comparables con el comportamiento medido. Por otra parte, debido a que los registros que existen son de sismos de muy baja intensidad, estos corresponden a respuesta en el rango elástico de los suelos y por lo tanto a los niveles de máxima rigidez y menor amortiguamiento, lo cual implica que la amplificación por efecto del suelo es la mayor posible con respecto a sismos de mayor intensidad. Esta información es por lo tanto importante ya que determina unos límites máximos en términos de funciones de amplificación esperadas en la ciudad. Para sismos de mayor intensidad se debe esperar que las amplificaciones sean menores, se degrade la respuesta en términos de frecuencias predominantes, y se produzca menor amplificación por efectos de amortiguamiento histerético de los suelos.

Para efectos del análisis se ha considerado información relacionada en la **Tabla 6.1**. Esta información corresponde a los sismos de Sativasur y Betulia. El sismo de Sativasur corresponde al sismo de mayor intensidad registrada en la ciudad de los que se tiene registro instrumental, por su magnitud relativamente alta, y distancia no tan lejana de la ciudad con respecto a los otros registros. El nivel de movimiento registrado en la ciudad por este sismo es de todas maneras bastante bajo (del orden de 1% de la gravedad en la superficie o menor). Como se aprecia, el sismo se registró en un limitado número de estaciones, sin embargo estas cubren una parte importante de las zonas de la microzonificación actual. El sismo de Betulia a diferencia del anterior, corresponde a un sismo de mayor intensidad pero a una distancia mas lejana y se registró en algunas estaciones ubicadas en la zona 5 de la MZSB, lo cual representa información valiosa teniendo en cuenta que dicha zona es la que más carece de información.

En la **Figura 6.1** se presenta la localización de las estaciones de acelerómetros en la ciudad, y en la **Tabla 6.2** la dirección y localización de las estaciones en donde se tiene registro con respecto a la microzonificación sísmica actual.

La información registrada en diferentes estaciones se presenta y analiza a continuación. En las figuras se presenta información de los registros de aceleración en las tres direcciones en

función del numero de puntos de registro (estos están espaciados cada 0,005 seg), y de las componentes de aceleración norte sur y este oeste ambas en función de la componente vertical para la fase final del movimiento (entre los 15 y 20 seg). Estas gráficas permiten establecer el carácter especial del movimiento para apreciar si el movimiento es predominante horizontal (ondas SH), o con tendencia elíptica, indicativa del predominio de ondas superficiales.

Estación Colegio San Bartolomé

En la **Figura 6.2** a la **Figura 6.6** se muestran las características del movimiento en roca. Se resalta una fase inicial de baja intensidad, similar en los tres componentes correspondiente a las ondas de compresión, seguida de una fase de ondas de corte de carácter impulsivo más fuerte del orden de 5 seg, con marcada direccionalidad norte sur, seguida de una fase relativamente uniforme de movimiento del orden de 15 seg, correspondiente a componentes de ondas predominantemente superficiales o de reflexiones y refracciones del movimiento principal que se van generando en la medida que este se propaga en el tiempo. El valor máximo de aceleración es de 0.07%g. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, es del orden de 0,015%g.

Estación Academia de Policía Suba

En la **Figura 6.7 a 6.11** se muestran las características del movimiento en roca en el piedemonte oriental del cerro de Suba, comenzando transición a zona 2. Se resalta una fase inicial de baja intensidad, similar en los tres componentes correspondiente a las ondas de compresión, seguida de una fase de ondas de corte de carácter impulsivo más fuerte del orden de 5 seg, con marcada direccionalidad este-oeste, seguramente como resultado del efecto topográfico del cerro de Suba, seguida de una fase relativamente uniforme de movimiento del orden de 15 seg, correspondiente a componentes de ondas predominantemente superficiales o de reflexiones y refracciones del movimiento principal que se van generando en la medida que este se propaga en el tiempo. El valor máximo de aceleración es de 0.12%g. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, está entre 0,02%g y 0,025%g. Los valores son más altos que en el Colegio San Bartolomé, lo cual puede ser debido a la distancia relativa con respecto a la fuente que es mayor para la estación San Bartolomé.

Estación Universidad de La Salle

En la **Figura 6.12 a 6.16** se muestran las características del movimiento en el piedemonte occidental de los cerros orientales, típico de la zona 2. Se resalta que no es evidente la fase inicial de baja intensidad, correspondiente a las ondas de compresión, seguida de una respuesta dominada por ondas superficiales evidenciada por las trayectorias elípticas de los componentes verticales y horizontales. El movimiento es evidentemente más fuerte en dirección este oeste (casi el doble con respecto a la componente norte sur). El valor máximo de aceleración es de 0.24%g, el doble de lo registrado en roca. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, es del orden de 0,04%g en los componentes norte sur y vertical, y 0,06%g en la componente este oeste. Estos

datos confirman el importante efecto que tienen las ondas superficiales por el efecto de borde de cubeta que se ha identificado en los análisis en los bordes del depósito (zona 2).

Estación Universidad Corpas

En la **Figura 6.17 a 6.21** se muestran las características en un sitio que corresponde a la zona 4 al occidente del cerro de Suba. En este sector el basamento rocoso se profundiza bastante con un alto gradiente por la que la transición d zona 1 a 4 es muy fuerte. Esto acentúa el efecto de borde de cubeta. En la respuesta registrada se aprecia este efecto en la fase inicial del movimiento (15 seg) seguido de una vibración más natural del depósito y el decaimiento final del movimiento después de 30 seg cuando termina la excitación del sismo a nivel de roca. Se aprecia un importante componente de ondas superficiales pero el componente vertical es mucho menor que el horizontal. El movimiento es en general más fuerte en dirección este oeste. El valor máximo de aceleración es de 0.23%g, el doble de lo registrado en roca. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, es del orden de 0,058%g en los componentes horizontales. El análisis de la atenuación de la fase final de vibración libre indica que el período promedio del depósito en este sector tiene componentes de 08 y de 1.7 seg, y el amortiguamiento resultante promedio está entre 5 y 11, con promedio del 8%.

Estación Escuela Colombiana de Ingeniería

En la **Figura 6.22 a 6.26** se muestran las características en un sitio que corresponde a la zona 3 en la parte media del valle entre los cerros de Suba y los orientales. La situación es similar a la de la estación Corpas, pero el componente vertical del movimiento es un poco mayor. En la respuesta registrada se aprecia el efecto de las ondas de compresión seguido de una fase más fuerte asociado con las ondas de corte y luego las de la parte posterior del registro en roca, seguido de una vibración más natural del depósito y el decaimiento final del movimiento después de 30 seg cuando termina la excitación del sismo a nivel de roca. Se aprecia un importante componente de ondas superficiales pero el componente vertical es mucho menor que el horizontal. El movimiento es en general más fuerte en dirección este oeste. El valor máximo de aceleración es de 0.24%g, el doble de lo registrado en roca. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, es del orden de 0,070%g en los componentes horizontales. El análisis de la atenuación de la fase final de vibración libre indica que el período promedio del depósito en este sector esta entre 1,4 y 1.6 seg, y el amortiguamiento resultante promedio está entre 7 y 14%, con promedio del 12%.

Estación Calle 26 Avianca

En la **Figura 6.27 a 6.31** se muestran las características en un sitio que corresponde a la zona 4 en el occidente de la ciudad sobre la calle 26. La situación es similar a la de la estación Corpas, pero todos los componentes del movimiento son menores. En la respuesta registrada se aprecia el efecto de las ondas de compresión seguido de una fase más fuerte asociada con las ondas de corte y luego las de la parte posterior del registro en roca, seguido de una vibración más natural del depósito y el decaimiento final del movimiento al mismo tiempo que termina la

excitación del sismo a nivel de roca. El componente de ondas superficiales no está bien definido, lo cual corresponde con los resultados de los análisis de respuesta en estas zonas y el componente vertical es mucho menor que el horizontal. El movimiento es en general más fuerte en dirección este oeste. El valor máximo de aceleración es de 0.22%g, el doble de lo registrado en roca. El valor característico del movimiento, obtenido como la desviación estándar de los valores registrados, es del orden de 0,043 y 0,061%g en los componentes horizontales.

Amplificación del depósito

En la **Figura 6.32 a 6.33** se presenta la amplificación del depósito en las diferentes estaciones para los tres componentes y el valor absoluto total en términos de los valores característicos de amplitud de la señal, y en términos de amplificación con respecto al valor en roca. Las estaciones están organizadas de manera que correspondan a un orden progresivo de zonas con respecto a los cerros. Se aprecia que en la que corresponde a la zona 2 se presenta una amplificación alta, sobretodo en el componente vertical. Posteriormente la amplificación se mantiene aproximadamente al mismo nivel, del orden de 4 con respecto al valor de roca. Esta gráfica es ilustrativa de un valor promedio de amplificación del movimiento. Como se indicó, los valores que se están utilizando corresponden a la desviación estándar de la señal, que es un indicativo de su amplitud general. Para estudiar el efecto en detalle a continuación se analiza la amplificación en términos de espectros de respuesta.

Espectros de Respuesta Elásticos

La **Figura 6.34 a 6.35** presentan espectros de respuesta elásticos de aceleración y desplazamiento para 5% amortiguamiento, y Figura 6.36 presenta valores de relación de ordenadas espectrales con respecto a los valores de la estación San Bartolomé.

Las dos estaciones en roca presentan ordenadas espectrales con valores significativos entre 0,1 y 1 seg. Todas las demás estaciones presentan componentes de respuesta en este rango correspondientes con los contenidos de energía del sismo. Estos competentes del movimiento corresponden al efecto de la vibración forzada que produce el sismo en el depósito. Adicionalmente se aprecian picos de respuesta claramente identificables en la señales de las diferentes estaciones, asociados con modos naturales de respuesta del depósito en cada sitio. Estos picos se aprecian mejor en la Figura 6.36 donde se resalta el efecto de amplificación que la respuesta del depósito ejerce con respecto a lo que ocurre en los sitios en roca.

Los datos de la **Figura 6.34 a 6.36** permiten apreciar los valores de amplificación a diferentes periodos en cada sitio. Es así como todas las estaciones tienen picos a periodos alrededor de 0,6 y de 1.0 seg, asociados con energía del sismo en roca. A periodos mayores no hay más picos en los registros en roca.

Se aprecia que a medida que aumenta el espesor del depósito aumentan los periodos de respuesta en los que se aprecian efectos de amplificación local por el depósito así como los modos de vibración que dan lugar a este efecto. Se aprecia que a pesar de que las relaciones

de amplificación son altas a periodos altos de vibración natural y que estos producen varios picos adicionales en los espectros de respuesta, estos no son tan altos como los que produce la vibración forzada del sismo en el rango de periodos donde tiene mayor contenido de energía. Los valores de amplificación en la relación espectral que se obtienen están acotados como máximo entre 7 y 8. Es de esperar por lo tanto que en sismos mayores, que producen mayor degradación de la rigidez del suelo e introducen amortiguamiento histerético en el sistema por la deformación no lineal del suelo, no se produzcan amplificaciones tan altas, y los picos de la respuesta ocurran a periodos un poco mayores. Estos resultados son importantes para poder calibrar los modelos numéricos en los que los valores de amortiguamiento especialmente no se pueden incluir de manera confiable y se ven afectados por efectos numéricos importantes que dependen del período al que se calculen.

6.1.1 Aproximación a los espectros de diseño

Dado que los modelos y análisis tienen limitaciones e incertidumbres en sus resultados, y que no existen datos medidos de respuesta en la ciudad para sismos comparables a los de diseño sino únicamente para sismos de muy baja intensidad los cuales sólo producen respuesta del suelo en rango elástico de bajas deformaciones y amortiguamientos bajos de tipo sólo viscoso, se consideró pertinente hacer un análisis en el que se buscara estimar cuales podrían ser los espectros de diseños de aceleraciones a partir de los datos medidos de sismos pequeños y con las relaciones espectrales obtenidas de los análisis para sismos fuertes. Para esto se consideró la siguiente metodología:

- Obtener relaciones espectrales a partir de los registros de sismos reales, considerando como señal de referencia la registrada en roca en la estación de San Bartolomé y CRADI. Estas relaciones espectrales son funciones de amplificación o de respuesta en cada sitio para valores de rigidez y amortiguamiento muy bajos. Para sismos fuertes, se produce reducción de rigidez y aumento de amortiguamiento del suelo lo que resulta en relaciones espectrales de menor valor y algún cambio en su forma, en particular aumento de los períodos donde se presentan los picos de respuesta.
- Utilizar los análisis de respuesta realizados para evaluar las relaciones espectrales para sismos fuertes y compararlos con las obtenidas a bajas deformaciones para definir factores de corrección por efecto de la no linealidad del suelo.
- Utilizar un espectro de amenaza uniforme para el sismo de diseño en roca y aplicarle las relaciones espectrales obtenidas de los dos pasos anteriores para tener otro estimativo de la respuesta en superficie, diferente al de los análisis de respuesta a partir de los datos medidos.
- Definir unas envolventes para construir un estimativo de espectros de diseño para las condiciones consideradas.

Los resultados de este ejercicio obtenidos a partir de los datos de los sismos Sativasur y Betulia se presentan a continuación y pueden servir como referencia para definir los espectros de diseño. Estos datos corresponden a dos sismos de baja intensidad de fuente intermedia, por cual es posible que para sismos de otras fuentes las relaciones espectrales tengan diferencias, por lo tanto son datos que sólo sirven de referencia pero no son enteramente confiables para desarrollar espectros de diseño.

En las **Figuras 6.37 a 6.39** se presentan los datos de las zonas 1 y 2, 3 y 4 respectivamente según registros del sismo Sativasur. En estas figuras se muestran también los espectros de diseño actuales y los estimados a partir de la información disponible y el método descrito en esta sección.

La interpretación de resultados de la **Figura 6.37** indica posibles valores de las mesetas de las zonas 1 y 2 intermedios entre los valores estándar y mínimos de la normativa actual, que suben y bajan más rápido que lo que contempla las normas actuales. El punto de quiebre donde comienza el descenso corresponde con los que tienen los espectros mínimos actuales.

Los resultados de la zona 3 indican que si bien aparecen picos adicionales en los espectros de respuesta adicionales a los asociados con el contenido de energía del sismo, estos no alcanzan valores tan altos, y y bajan mucho antes que los valores de la meseta extendida prevista para la zona 3 en la normativa vigente. El espectro estimado con método de la presente sección, es muy similar al espectro mínimo previsto para la zona 3 en la norma actual, aunque el espectro sube más rápido y la meseta puede estar a un nivel ligeramente superior.

Los resultados de la zona 4, de manera similar a lo que se observó en la zona 3, indican que si bien aparecen picos adicionales en los espectros de respuesta adicionales a los asociados con el contenido de energía del sismo, estos no alcanzan valores tan altos, y bajan mucho antes que los valores de la meseta extendida prevista para la zona 4 en la normativa vigente. El espectro estimado con método de la presente sección, sube más rápido, alcanza un valor intermedio en la meseta entre los espectros de diseño estándar y mínimo de la norma actual, y desciende mucho antes pero a una tasa menor que lo previsto en la norma actual. Esto se debe a que en lugar de que los picos secundarios de respuesta definan una meseta extraordinariamente extendida, la envolvente de dichos picos hacen que la tasa de descenso del espectro sea menor.

En las **Figuras 6.40** se presentan los datos de las zonas 5 según registros del sismo Betulia. En estas figuras se muestran también los espectros de diseño actuales y los estimados a partir de la información disponible y el método descrito en esta sección.

Los resultados de los espectros estimados para las zonas donde se tiene información con el método de esta sección se presentan en la **Figura 6.41**. En todos los casos los espectros suben más rápido que lo previsto en las normas actuales. Esto se puede relacionar con el hecho de que a bajas deformaciones la amplificación es más alta a altas frecuencias ya que no ha habido degradación de rigidez y aumento de amortiguamiento que si se produce en sismos fuertes. Por otra parte se considera que los valores y la forma de estos espectros son más consistentes con la respuesta observada para sismos pequeños, y los resultados de los análisis realizados en el presente trabajo, y presentan un enfoque que alivia las limitaciones de los espectros de la norma actual en cuanto a los valores y extensión de las mesetas que producen espectros de desplazamientos que no son realistas. En las zonas 1 a 3 además la tasa de descenso de los valores de aceleración espectral es más alta que lo previsto en las normas actuales.

Los espectros envolventes estimados a partir de las mediciones realizadas se pueden utilizar para validar desde una perspectiva independiente los resultados de los análisis. Esto permitirá obtener un indicativo de los rangos en los que los resultados de los análisis pueden no ser representativos de la realidad y en que proporción. En la **Tabla 6.3** se presentan los resultados obtenidos de todos los análisis comparados con las envolventes estimadas para cada zona. Estas corresponden a los siguientes parámetros de la misma forma como se han definido para los espectros de diseño actualmente vigentes.

Los resultados de las **Figuras 6.42 a 6.46** muestran que en general las envolventes consideradas son consistentes con la gran mayoría de los resultados de los análisis. Sin embargo se notan que hay respuestas calculadas que parecen exageradas en el componente de respuesta por modos de vibración propios de los depósitos y ondas superficiales, especialmente en las zonas 2 y 3 para períodos entre 1,5 y 2,5 seg. También aparecen valores aparentemente demasiado altos en los bajos períodos en los punto s de la zona 1. Un análisis detallado de los registros que presentan los mayores valores indican que en general corresponden a resultados de los análisis con el programa Quake, que tienden a ser demasiado altos para estos rangos de períodos como ya se discutió. Estos resultados son de esperarse debido a las limitaciones de los modelos con respecto a los detalles de su formulación numérica y de la forma como se consideran las condiciones de frontera.

6.1.2 Definición de Zonas

Uno de los aspectos importantes que constituyen un vacío de las normas actuales es una definición objetiva de las diferentes zonas. La justificación de las zonas de la norma vigente es básicamente de tipo geomorfológico, asociada con perfiles geotécnicos típicos de cada zona. Esta definición es válida pero se debe precisar, y se debe hacer compatible con los parámetros que definen la respuesta dinámica. Desde este punto de vista, a nivel internacional el parámetro de referencia es el valor promedio de Vs usualmente en los 30 m más superficiales del perfil. Los análisis realizados en el presente trabajo muestran que el perfil de Vs en los primeros 50 m tiene una gran influencia sobre la respuesta a períodos menores de 1 seg. Los valores a profundidades mayores afectan los resultados a periodos mayores. A partir de la información disponible en la ciudad, se podría utilizar como parámetro de referencia el valor promedio de Vs en los primeros 50 m de profundidad calculado como:

$$Vs = \frac{\sum Vs_i h_i}{\sum h_i}$$

La **Figuras 6.47 a 6.49** muestra los datos de Vs medidos en ensayos de down hole para las zonas 3, 4 y 5.

El análisis estadístico de estos datos indica que el valor medio de los valores de Vs en la zona 3 es de 160 m/s, en la zona 4 de 113 m/s. En ambos casos la desviación estándar de las mediciones es de aproximadamente 20 m/s. En la zona 5 el promedio es de 289 m/s, pero la variación es mucho más alta y hay pocos datos para hacer una caracterización detallada. Con

base en estos resultados se propone que se utilice como uno de los criterios de clasificación el valor medio de los valores medidos de Vs en el ensayo de down hole en los primeros 50 m del perfil de la siguiente forma:

Los datos disponibles indican que las zonas se pueden diferenciar de la siguiente forma

Zona 1

Roca, suelo residual o suelos superficiales de espesor menor a 5 m en proyectos que están cimentados sobre la roca. Los valores de Vs promedio son mayores a 750 m/s.

Zona 2

Depósitos coluviales o aluviales en los piedemontes que bordean la sabana, en sectores donde la pendiente del contacto entre roca y suelo es mayor de 10%. El espesor de los suelos con valores de Vs menores a 500 ms es menor a 50 m, y los valores de Vs promedio son mayores a 180 m/s, posiblemente con intercalaciones de estratos con valores menores.

Zona 3

Depósitos aluviales (arenosos) y lacustres (arcillas y limos) en intercalaciones. Profundidad a la roca entre 30 y 100 m, valores de Vs promedio entre 135 y 180 m/s.

Zona 4

Suelos lacustres (predominantemente arcillosos) con espesor mayor a 50 m o valores promedio de Vs menores a 135 m/s.

Zona 5

Intercalaciones de suelos de origen aluvial (predominantemente arenosos) de espesor generalmente mayor a 50 m, puede haber suelos susceptibles a la licuación superficialmente (menos de 15 m). Vs promedio mayor a 200 m/s (para valores de Vs menores en la zona geográfica correspondiente se deberá diferenciar si es correspondiente a la zona 2 o zona 3 según los datos del perfil de suelos o resultado de anásis de respuesta dinámica)

En las zonas 3 y 4 se debe evitar utilizar valores altos de Vs que se pueden presentar en los primeros 5 m del perfil por presencia de suelos sobreconsolidados, rellenos, o errores en al determinación en los ensayos de Down hole, y que pueden alterar el promedio. : Los valores

que se utilicen en estas zonas para el cálculo del promedio puntualmente no deben ser mayores de 250 m/s.

Aunque en cada zona hay parámetros indicativos, localmente se pueden presentar casos especiales por la combinación de estratos que se presenten. En esos casos se deben hacer estudios locales de respuesta con medición del perfil de Vs para obtener los espectros de respuesta y con base en estos poder hacer la clasificación del sitio con respecto a los espectros previstos de las diferentes zonas.

6.2 PROPUESTA APARTIR DE UN METODO RACIONAL DE COMBINACION DE ESPECTROS

Para la definición de la propuesta de la Sociedad Colombina de Geotecnia de espectros de diseño para al microzonificación de la ciudad, se hizo una revisión de toda la información disponible tanto de estudios previos como del presente estudio como se describe a continuación.

Para la obtención de los espectros de diseño se utilizo la siguiente información

- Mapas de localización y perfiles de las cuatro secciones de análisis

- Espectros superficiales hallados por los programas PLAXIS, QUAKE y QUAD4M

Por su mejor reproducción de los eventos sísmicos y, luego de análisis detallados junto con la SCG, se decidió trabajar únicamente con los resultados del programa QUAD4M, los cuales produjeron 1,346 espectros discriminados como se muestra en la **Tabla 6.4** se observa que el número de acelerogramas no es uniforme ni por fuente ni por zona.

- Datos del Estudio de Microzonificación de Bogotá (INGEOMINAS-UNIANDES-1984)

Este estudio ha previsto los siguientes niveles de aceleración horizontal a nivel de roca para un período de retorno de 475 años (Poc=10% en 50 años-compatible con la NSR-98). En la **Tabla 6.5** se muestran las características de las fuentes

Las aceleraciones asignadas a cada fuente fueron producto, aparentemente, de:

- Para la Fuente Lejana, similitud de distancia y tipo de fuente (subducción) con el Sismo de Michoacán de 17 de Septiembe de 1985 que afectó gravemente a Ciudad de México. De hecho todos los acelerogramas de entrada usados para el análisis bidimensional de fuente lejana fueron de registros de este sismo en Ciudad de Mexico

- Para la Fuente Intermedia, el estudio de amenaza con un radio de 200km con el método línea-fuente, como aceleración máxima en roca y con predominancia de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental

- Para la Fuente Cercana, estimación cualitativa, de aceleración predominante

Con estas aceleraciones se escogieron, sin un análisis profundo, tres acelerogramas para diseño.

- Acelerograma de Sismo de Ciudad de Mexico de 1985 para la Fuente Lejana

- Acelerograma de Sismo de Tauramena (1995), registro de Estación El Rosal modificado con funciones de Green, el cual ha tenido muchas críticas.

- Acelerograma de Sismo de Loma Prieta (1984), Estación Corralitos, también criticado.

Con la combinación simple, aparentemente relativamente subjetiva, de estos acelerogramas se obtuvieron los espectros de diseño para las diferentes zonas

6.2.1 Metodología

FUENTES SISMOGENICAS

Dado que se está trabajando con tres fuentes sismogénicas de características y de mecanismos de generación de sismos diferentes, no es adecuado simplemente hacer envolventes de los acelerogramas en Bogotá que provienen de sismos en ellas, en especial porque las tres fuentes tienen diferente actividad, por ende diferentes relaciones de Gutenberg-Richter (log N vs Ms) y en consecuencia diferentes relaciones aceleración-períodos de retorno para Bogotá.

COMBINACION DE ESPECTROS

El objetivo principal de este estudio es obtener espectros de diseño para las diferentes zonas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá a partir de los espectros obtenidos en los análisis bidimensionales de las cuatro secciones estudiadas. Es decir se requiere un método racional de combinar los espectros para producir espectros unificados para cada zona.

Para ello se apela al principio de la Media Aritmética con Frecuencias, empleada normalmente en análisis estadísticos y definida como:

$$M[X] = \Sigma Xi\ fi / \Sigma fi \qquad (6.2.1)$$

en la cual : M [X] = media aritmética del parámetro X

fi = frecuencia del parámetro X

$fi / \Sigma fi$ = factor de ponderación de Xi, el cual es < 1.

la cual se convierte en la Esperanza Matemática o Valor Esperado E [X]

$$E[x] = \Sigma Xi\ P(Xi) \qquad (6.2.2)$$

si fi = P(Xi) = probabilidad de ocurrencia de X

$\Sigma fi = \Sigma P(Xi) = 1$

Entonces, para combinar espectros, se emplea la siguiente formulación:

$$Sa_T = [Sa_{TC}\ P(a_C) + Sa_{TI}\ P(a_I) + Sa_{TL}\ P(a_L)] / [P(a_C) + P(a_I) + P(a_L)] \qquad (6.2.3)$$

$$= Sa_{TC}\ F_C + Sa_{TI}\ F_I + Sa_{TL}\ F_L \qquad (6.2.3a)$$

en la cual :

Sa_T = aceleración espectral combinada para el período T (a/g)

Sa_{TC} = aceleración espectral para el período T del espectro de Fuente Cercana (a/g)

Sa_{TI} = aceleración espectral para el período T del espectro de Fuente Intermedia (a/g)

Sa_{TL} = aceleración espectral para el período T del espectro de Fuente Lejana (a/g)

$P(a_C)$ = probabilidad de ocurrencia de aceleración 0.25g por Sismo Cercano

$P(a_I)$ = probabilidad de ocurrencia de aceleración 0.20g por Sismo Intermedio

$P(a_L)$ = probabilidad de ocurrencia de aceleración 0.038g por Sismo Lejano

F_C = factor de ponderación de fuente cercana = $[P(a_C)] / [P(a_C) + P(a_I) + P(a_L)]$

F_I = factor de ponderación de fuente intermedia = $[P(a_I)] / [P(a_C) + P(a_I) + P(a_L)]$

F_L = factor de ponderación de fuente lejana = $[P(a_L)] / [P(a_C) + P(a_I) + P(a_L)]$

En consecuencia, se requieren:

- Espectros de diseño de Fuente Cercana, Intermedia y Lejana
- Probabilidades de ocurrencia de aceleraciones de 0.25g para Fuente Cercana, de 0.20g para Fuente Intermedia y de 0.038g para Fuente Lejana

AMENAZA AGREGADA

Las metodologías línea-fuente o área-fuente de evaluación de amenaza sísmica, empleadas tanto en los estudios de amenaza sísmica para Bogotá como para Colombia, integran adecuadamente todas las fuentes, pero no permiten fácilmente la desagregación de ellas.

En consecuencia, para el análisis unificado de espectros, se empleo el siguiente procedimiento:

- Usar el Catálogo Sísmico de Colombia, en la versión que posee el Consultor para Ms > 3, con 12,168 registros desde 1541 hasta Enero de 2006.
- Con los valores de localización de epicentros del catálogo (°N y °E), estimar la distancia D en kilómetros de los epicentros a Bogota (04°35´56.57´´N; 74°04´51.30W), multiplicando la diferencia en grados por 111.111 km/ °.
- Con los valores de Magnitud Ms del catálogo estimar la aceleración en roca en Bogotá, empleando dos ecuaciones de atenuación, también usadas en la evaluación de amenaza nacional y de Bogotá: McGuire y Donovan 2:

McGuire: $a/g = (472/981) \exp(0.64Ms) (D+25)^{-1.30}$ (6.2.4)

Donovan2: $a/g = (1080/981) \exp(0.50Ms) (D+25)^{-1.32}$ (6.2.5)

Se prefirió usar la ecuación Donovan2 y no Donovan1, dado que la ecuación Donovan2 provee mejores resultados, obtenidos de una calibración aproximada del Sismo de Tauramena (1995) hecha por el Consultor hace algunos años como se muestra en la **Figura 6.50**

Por lo anterior, también en los cálculos se asigna un peso doble a los resultados obtenidos con la ecuación Donovan 2 en relación a los resultados obtenidos con la ecuación de McGuire

- Una vez estimados los valores de aceleración en Bogotá, obtener los valores máximos anuales de aceleración, aplicar análisis con distribución LogGumbel 1 y obtener las curvas de aceleración - período de retorno.

AMENAZA DESAGREGADA Y PERIODO DE RETORNO CON ACELERACIONES

Para esta estimación se usaron dos métodos:

- Con las aceleraciones y distancias de la **Tabla 6.5** y las mismas ecuaciones de atenuación 6.2.4 y 6.2.5 obtener la magnitud MsF que las produce

- Con la magnitud MsF obtener su probabilidad de ocurrencia empleando las relaciones Gutenberg-Richter para las fuentes (Zona de Subducción para Fuente Lejana y Falla Frontal de la Cordillera Oriental para Fuente Intermedia). Dicha probabilidad esta dada por:

$$P(MsF) = 1 - \{ [1 - \exp[-\beta(MsF - Mso)]] / [1 - \exp[-\beta(MsU - Mso)]] \} \quad (6.2.6)$$

MsF = magnitud Richter Ms en la fuente F que produce la aceleración dada en Bogotá

Beta, MsU = parámetros de la relación Gutenberg-Richter

Mso = magnitud Richter Ms mínima del registro- Mso = 3.0

se requiere además, para que $P(MsF) > 0.0$ $MsF \leq MsU$ (6.2.7)

- Como no hay una relación Gutenberg-Richter para la Fuente Cercana, con el registro total y para D a Bogota < 50km, hay que deducir esta relación.

- Obtener los períodos de retorno TRM = 1 / P(MsF), ponderando los resultados obtenidos con las ecuaciones McGuire y Donovan 2.

- Con el registro de aceleraciones máximas anuales, desagregado por distancia, deducir con distribuciones LogGumbel1, relaciones aceleración-período de retorno para las tres fuentes, discriminadas así:

Fuente cercana: $D \leq 50$ km

Fuente Intermedia: $50 \text{ km} < D \leq 250$ km

Fuente Lejana: $250\text{km} < D$

Las ecuaciones LogGumbel empleadas son:

$$G(X) = \exp \{-\exp [-(m+nX)]\} \quad (6.2.8)$$

$$TR = 1 / [1- G(X)] \quad (6.2.9)$$

en la cual: $G(X)$ = función acumulada de Gumbel 1

X = Ln (a); a= aceleración

m, n = parámetros de ajuste

- Con las relaciones aceleración-período de retorno, encontrar los períodos de retorno TRD y probabilidades de ocurrencia $P(a_{FD})$ para las aceleraciones de 0.25g para la Fuente Cercana, 0.20g para la Fuente Intermedia y 0.038g para la Fuente Lejana.

- Obtener los períodos de retorno TRD = 1 / $PD(a_R)$

- De las curvas de amenaza agregada (EGASC-96, Donovan2 y McGuire) obtener un promediio de TRA y asignar el peri6do de retorno TRA para a_I=0.20g a la fuente intermedia y para a_C=0.25g a la fuente cercana. Para la fuente lejana se asigna el valor obtenido en g), pues los anállsis de amenaza agregada fueron hechos en EGASC-96 para D < 200km.

- Combinar los períodos TRD y TRA para cada fuente y encontrar TRG.

- Finalmente combinar para cada fuente TRM y TRG y deducir TRF y $P(a_{RF}) = 1/TRF$

- Con los valores de TRF calcular $P50(a_{RF})$ para un período de diseño de 50 años, TD= 50 años con la ecuación:

$$P50(a_F) = 1 - \exp(-TD/TRF) \qquad (6.2.10)$$

- Con $P50(a_{RF})$ obtener los factores FC, FI y FL de la ecuación 2.3a

ACELEROGRAMAS DE DISEÑO PARA CADA ZONA Y FUENTE

Para ello se empleó el Método de Newmark-Hall (1981), asÍ:

- Obtener las velocidades espectrales Sv para todos los 1,346 espectros:

$$Sv = 981\ Sa\ T / (2\pi) \qquad (6.2.11)$$

en la cual Sv = velocidad espectral (cm/s)

Sa = aceleracion espectral (a/g)

T = período (s)

- Hallar el promedio y desviación estándar □ de las velocidades espectrales, para una zona y fuente, en papel tripartita (Log T vs Log Sv)

$$Yprom_{ZF} = [\ \Sigma\ Yi\ ] / n \qquad (6.2.12)$$

$$□□[Y]_{ZF} = [\ n\ \Sigma Yi2 - (\Sigma Yi\ )2\ ] / [\ n\ (n\ -1)] \qquad (6.2.13)$$

En la cual : Y = Log (Svi)

n= número de datos

- Encontrar la velocidad espectral de diseño Svd, para una zona y fuente, como

$$\text{Log } (Svd_{ZF}) = [\text{Log } (Sv)]\ prom_{ZF} + \square\ [\text{Log } Sv)]_{ZF} \qquad (2.14)$$

Deducir la aceleración espectral de diseño, para una zona y fuente, como

$$Sad_{ZF} = Svd_{ZF}\ (2\pi) / (981\ T) \qquad (2.15)$$

ESPECTROS UNIFICADOS DE DISEÑO

- Calcular espectros de velocidad unificados Sv_{TZ} en forma similar a la ecuación 6.2.3a para cada zona:

$$\text{Log}(Sv_{T\ Z}) = \text{Log } (Sv_{TZC})\ FC + \text{Log}(Sv_{TZI})\ FI + \text{Log}(Sv_{TZL})\ FL \qquad (6.2.16)$$

- Obtener espectros de velocidad unificados suavizados de diseño en papel tripartita, como la envolvente de cada uno de los espectros unificados.

- Finalmente, con los espectros de velocidad suavizados de diseño, deducir, para cada zona, espectros de diseño de aceleración, de desplazamiento y de desplazamiento-aceleración. Colocar en una tabla sus características.

6.2.2 Amenaza Agregada y Periodos de Retorno

CURVAS DE AMENAZA SISMICA NOMINALES

Se encontraron 210 valores de aceleraciones máximas anuales en Bogotá, para cada una de las ecuaciones de atenuación de McGuire y Donovan2

Del análisis de estos valores resultan las siguientes curvas de Amenaza Sïsmica en roca (a_R/g vs TR), las cuales se comparan con las del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia-EGASC-1996 (AIS-INGEOMINAS, 1996). Ver **Figura 6.51** y **Tabla 6.6**

De este ejercicio puede decirse

- Con el análisis del Registro Histórico hasta Enero de 2006, la aceleración de diseño para 475 años es de 0.348g con la ecuación de McGuire y de 0.262g con la ecuación de Donovan2, valores más altos, respectivamente, en 58.2% y en 19.1% que la aceleración de EGASC-1996, de 0.220g

- Todos los tres valores son superiores al valor de 0.20g adoptado para la Ciudad de Bogotá en la NSR-98. Se debe recordar que EGASC-1996 trabajó con las ecuaciones de Donovan1, Donovan2, McGuire y un promedio de las tres, pero realmente la amenaza final se evalúo aparentemente con la ecuación Donovan1, que resulta en aceleraciones menores que las otras dos (Donovan2 y McGuire)

- Por lo anterior valdría la pena actualizar la evaluación de amenaza sísmica para la ciudad con el catálogo nacional a 2007.

ESTIMACIÓN DE PERÍODOS DE RETORNO POR FUENTE CON AMENAZA AGREGADA

Para esta evaluación, se utilizan las curvas de amenaza deducidas y, como ya se dijo en 2.4h), se asigna el período de retorno TRA de a_I=0.20g a la fuente intermedia y de a_C=0.25g a la fuente cercana. Para la fuente lejana se asigna el valor de TR de la **Tabla 6.31** para cada ecuación y para los datos de EGASC-96 se usa el valor de TR de la **Tabla 6.13** de Fuentes Desgregadas, dado que el estudio tenía un radio de análisis de 200km. Ver **Tabla 6.7**

Si se promediaran todos los tres resultados, cada uno tendría factor de ponderación de 1/3, pero con factor doble para Donovan2 en relación a McGuire, los factores de ponderación son: 3/9 para EGASC-96, 2/9 para McGuire y 4/9 para Donovan2, con lo cual, promediando ponderada y geométricamente los períodos de retorno se obtiene los datos de la **Figura 6.52**. y la **Tabla 6.8**

Se observa que los valores de FA son cercanos a los resultados de Donovan2, excepto para fuente lejana, debido a los factores de ponderación escogidos.

6.2.3 Amenaza Desagregada y Periodo de Retorno

ESTIMACION DE PARAMETROS GUTENBERG-RICHTER PARA FUENTE CERCANA

Del cátalogo completo se encontraron N = 112 datos de sismos con distancia epicentral D a la Ciudad de Bogota menor a 50 km (D < 50km) y Dpromedio=18.608km. Con estos datos y las magnitudes Ms reportadas se encontró la relación que se muestra en la **Figura 6.53**

$$N = 972.811 \exp(-0.911135\ Ms) \qquad (6.4.1)$$

De esta relación se obtiene para la Fuente Cercana

β = 0.911135

Msu = 7.55

ESTIMACION DE PERIODOS DE RETORNO CON MAGNITUDES Ms

En la **Tabla 6.9** se muestran los valores que se tienen de β y Msu de las diferentes fuentes, para el período desde 1566

Con las ecuaciones de McGuire y Donovan2 se obtienen valores de MsF y TRM que se muestran en la **Tabla 6.10**

Con factores de ponderación de 1/3 para los resultados de McGuire y de 2/3 para los resultados de Donovan2 y promediando geométricamente los períodos de retorno se obtienen los valores que se muestran en la **Figura 6.54** y en la **Tabla 6.11**

Realmente la combinación sólo es para Fuente Cercana, pues para las otras dos fuentes no es posible obtener valores de P(MSF) > 0 con la ecuación Donovan2.

ESTIMACION DE PERIODOS DE RETORNO CON ACELERACIONES

- Estimación de Períodos de Retorno con Amenaza Desagregada

Para estas estimaciones se efectuaron análisis LogGumbel1 con las aceleraciones agrupadas por distancia D para cada fuente asÍ:

Fuente cercana: $D \leq 50$ km

Fuente Intermedia: $50 \text{ km} < D \leq 250$ km

Fuente Lejana: $250\text{km} < D$

En la **Tabla 6.31** se muestran los resultados que se obtuvieron válidos para $a_R > a_R$mín

Nuevamente, con factores de ponderación de 1/3 para los resultados de McGuire y de 2/3 para los resultados de Donovan2 y promediando geométricamente los períodos de retorno se obtienen los resultados que se muestran en la **Tabla 6.13 y Figura 6.55**

- Estimación de Períodos de Retorno con Amenaza Agregada

Se reproduce la **Tabla 6.12** para tener la referencia adecuada

- Estimación de Períodos de Retorno y Factores con Aceleraciones

Para este caso se combinan geométricamente los valores de TR de las **Tablas 6.31** y **6.14**, dando un peso doble a los resultados con amenaza desagregada en relación a la amenaza agregada, con los cual los factores de ponderación son: 2/3 para la amenaza desagregada y 1/3 para la amenaza agregada mostrado en la **Figura 6.56** y en la **Tabla 6.14**

ESTIMACION DE PERIODOS DE RETORNO Y FACTORES DEFINITIVOS

Combinando los resultados se tienen los valores mostrados en la **Tabla 6.15**

De esta tabla comparativa se observa:

Aunque las probabilidades de ocurrencia son diferentes, los factores de proporción son muy iguales para la Fuente Cercana (Fc 70%)

Las diferencias estriban en las proporciones entre Fuente Intermedia y Fuente Lejana, inferiores para el Escenario de Magnitudes.

Por la incertidumbres, tanto en las distancias reales a las fuentes de la **Tabla 6.5**, como por las de la asignación de eventos a fallas del EGASC-96 de la cual resultan las relaciones Gutenberg-Richter para cada una de ellas, se asigna, subjetivamente por el Consultor, un peso 4 veces superior a los datos con aceleraciones en relación a los datos con magnitudes. En consecuencia para ponderación, los datos con aceleraciones tienen una proporción asignada de 80% y los datos con magnitudes un 20%.

Nuevamente se promedian geométricamente los períodos de retorno, ponderados con los factores ya indicados y se obtienen los períodos de retorno TR y factores F finales, anuales y a 50 años. Ver **Figuras 6.57 y 6.58** y **Tabla 6.16**

De los valores de la **Tabla 6.16** también resultan otros valores interesantes:

- Probabilidad de que haya un sismo de una cualquiera de las tres fuentes con las aceleraciones dadas para Bogotá:

$P\ (sismo/a_F) = 1 - \{ [1-P(a_C)] \times [1- P(a_I)] \times [1-P(a_L)] \} = 0.5015\%$; TR = 199.4 años

- Aceleración esperada promedio de las tres fuentes E $[a_R]$

$E\ [a_R] = a_C\ FC + a_I\ FI + a_L\ FL$ = 0.226g con Fanual

= 0.225g con F50 años

Valores muy similares a la aceleración con período de retorno de 475 años del EGASC-96 (0.220g)

FACTORES DEFINITIVOS ADOPTADOS PARA COMBINACIÓN DE ESPECTROS

De todo el análisis anterior, finalmente se adoptan los siguientes valores de factores de ponderación F, los cuales se usarán en la ecuación 2.16 mostrados en la **Figura 6.59**

FC = 70.0%

FI = 24.0%

FL = 6.0%

6.2.4 Espectro de Diseño por Zona y por Fuente

Para estos resultados, para cada zona se presentan tres (3) figuras:

- Espectros de promedio logarítmico + desviación estandar logarítimica de velocidades, adoptados para análisis, espectro promedio ponderado y espectro ponderado suavizado de diseño para cada zona.

- Espectros de aceleración deducidos de los espectros de velocidades, del promedio logarítmico y del promedio logarítmico + desviación estandar logarítimica de velocidades.

- Espectros de aceleración deducidos de los espectros adoptados de velocidades, espectros ponderados de aceleraciones y espectros suavizados de aceleraciones. Estos dos últimos sencillamente son los adoptados para velocidades multiplicados por $(2\pi) / (gT)$

Los espectros suavizados están definidos por siete (7) parámetros principales y se muestran en las **Figuras 6.60 y 6.61**

Am = aceleración para T= 0

Amx = aceleración máxima (g)

Vmx = Velocidad máxima (cm/s)

Dmx = desplazamiento máximo (cm)

Ta = inicio del tramo de aceleración máxima Amx (s)

Tv = inicio del tramo de velocidad máxima Vmx (s)

Td = inicio del tramo de desplazamiento máximo Dmx (s)

Es de notar:

- Se propone inicialmente una nomenclatura diferente a la empleada en los Decretos de Microzonificación y que se estima más clara.

- Se incorpora el período Td, indispensable para completar el espectro en la zona de desplazamientos espectrales

- Ao, la aceleración a nivel de superficie del terreno NO ES Aa. Para obtener Aa (equivalente a PGA) se debe dividir Amx por 2.5.

- El factor de importancia I no está incluído en los espectros

Las ecuaciones para la aceleración espectral Sa son:

$$\text{para } 0 < T < Ta \qquad Sa = Ao + (Amx-Ao)\, T / Ta \tag{5.1}$$

para Ta < T < Tv Sa = Vmx (2π) / T) / 981 = Fv / T (5.2)

para Tv < T < Td Sa = Dmx [(2π) / T)] ^{2} / 981 = Fd / T^2 (5.3)

Para la zona 1 Cerros se procesaron 295 espectros con los siguientes resultados. Ver **Tabla 6.17 y Figuras 6.62 a 6.64**

Para la zona 2 Piedemonte se procesaron 536 espectros con los siguientes resultados Ver **Tabla 6.17 y Figuras 6.65 a 6.67**

Para la zona 3 Lacustre A se procesaron 338 espectros con los siguientes resultados. Ver **Tabla 6.18 y Figuras 6.68 a 6.70**

Para la zona 4 Lacustre B se procesaron 99 espectros con los siguientes resultados. Ver **Tabla 6.19 y Figuras 6.71 a 6.63**

Para la zona 5 Terrazas y Conos se procesaron 78 espectros con los siguientes resultados. Ver **Tabla 6.20 y Figuras 6.74 a 6.76**

Para esta Zona 5, dado que hay muy pocos datos, los coeficientes de variación iniciales con una desviación estándar eran del orden de 4% para las Fuentes Intermedia y Lejana, muy bajos en relación con los valores que se observan en las otras secciones y fuentes. Para tratar de compensar esto, en este único caso y para Fuentes Intermedia y Lejana, se usó como espectro adoptado para la Zona 5 el resultante de sumar el promedio de Log (Sv) y 2.5 veces la desviación estándar de Log (Sv).

CARACTERISTICAS DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PROPUESTOS

Los espectros de diseño propuestos están definidos por los siguientes parámetros. Ver **Tabla No 6.21 y Figura 6.77 a 6.80**

En el siguiente capítulo se hacen las comparaciones respectivas y se obtienen conclusiones de este estudio, pero de todas formas estos espectros tienen varias caracterïsticas comunes:

- Hay una mayor tendencia hacia las aceleraciones mayores para períodos T < 1 seg
- Es similar a espectros de otros sitios y no hay grandes “mesetas” (excepto Ciudad de México).

- Se limitan los desplazamientos con el período Td **(Figura 5.79)**

- Todo lo anterior es debido al proceso de ponderación, con predominancia de señales de sismos cercanos con períodos bajos.

- Como ya se había expresado, los valores de Ao no son los de Aa y son menores que éstos (Ao ≈ 2/3 Aa). Esto es de gran importancia en Geotecnia, ya que el valor que se debería usar en los diseños geotécnicos (taludes, pilotes, etc) es el de Ao y no el de Aa, definido por los colegas Ingenieros Estructurales, siguiendo la tradición del ilustre Profesor N:M Newmark

- Para T > 1.0s los espectros de aceleración de las Zonas 3, 4, 5, del depósito lacustre, siguen, en general, una misma trayectoria, lo que indicaría que, aproximadamente, para edificios de 10 y más pisos construídos en esas zonas, se podría tener un solo espectro,

- Se propone un espectro de desplazamientos vs aceleraciones espectrales **(Figura 6.80),** que debe ser muy útil para los colegas estructurales

TABLA DE COEFICIENTES ESPECTRALES DE ACELERACION

La Tabla de Coeficientes Espectrales de Aceleración, similar a la de los decretos de Microzonificación quedaría así, adicionada de Ao, Td, TLo y Fd. Ver **Tabla 6.22**

El valor de TL, previsto en la NSR98 (A.2.6.3) para que todas las construcciones se tengan que diseñar con una aceleración mínima Amín = Aa/2, distorsiona el espectro de deformaciones. En este caso se ha colocado, adicionalmente, TLo para $Amín_0$ = Ao/2.

6.2.5 Comparación de los espectros de diseño y conclusiones

COMPARACION DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PROPUESTOS

En este capítulo se presenta lo siguiente:

Comparación de los espectros de aceleración propuestos con los actuales de la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB) y los de la NSR-98, sin tener incluír lo ya consignado en 5.6 y 5.7

Preponderancia de las Fuentes Cercanas en la amenaza sísmica para Bogotá

Características del Sismo de México de 1985 y su representatividad como Fuente Lejana para la amenaza sísmica para Bogotá.

Limitaciones del estudio

En la **Figura 6.81** y en la **Tabla 6.23** se presentan el Espectro Propuesto para la zona 1, los de la MZSB y los de la NSR-98

Se aprecia:

- El espectro cubre totalmente los valores de diseño para Fuentes Cercana, adecuadamente los de Fuente Intermedia, pero no los de Fuente Lejana para T> 1.1s
- La aceleración Ao es inferior a las de la MZSB
- Las aceleraciones Amx y Aa son algo inferiores a las de MZSB y superiores a las de NSR98
- El período To es superior y Tc es inferior a los de la MZSB
- La aceleración Amx es superior a la de todas las otras normas existentes
- Para 0.5s < T < 1.0s, el espectro es muy similar a NSR98-S1 y a Alterno H1-B
- Para T > 1s, el espectro es inferior a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones.

En la **Figura 6.82** y en la **Tabla 6.24** se presentan el Espectro Propuesto para la zona 2, los de la MZSB y los de la NSR-98

Se aprecia:

- El espectro cubre adecuadamente los valores de diseño para Fuentes Cercana e Intermedia, pero no los de Fuente Lejana para T > 1.1s
- La aceleración Ao es inferior a la de la MZSB, pero igual al del mínimo de la MZSB
- La aceleración Amx y Aa son superiores a las de la MZSB y a las de NSR98.

- El período To es igual y Tc es inferior a los de la MZSB
- La aceleración Amx es superior a la de todas las normas existentes
- El espectro no coincide, ni por sectores, con ninguno de las normas existentes
- Para T > 1s, el espectro es inferior a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones.

En la **Figura 6.83** y en la **Tabla 6.25** se presentan el Espectro Propuesto para la zona 3, los de la MZSB y los de la NSR-98

Se aprecia:

- El espectro cubre totalmente los valores de diseño para Fuente Intermedia, adecuadamente los de Fuente Cercana, pero no los de Fuente Lejana para T > 1.2s
- La aceleración Ao es inferior a las de la MZSB.
- La aceleración Aa es inferior a la de la MZSB, pero algo superior a la del mínimo de la MZSB y a la de NSR98.
- La aceleración Amx es superior a la del mínimo de la MZSB y a las de la NSR98-S3 y S4.
- Los períodos To y Tc son inferiores a los de la MZSB
- Para 0.7s < T < 1.0s, el espectro es muy similar a NSR98-S3.
- Para T > 1s, el espectro es inferior a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones.

En la **Figura 6.84** y en la **Tabla 6.26** se presentan el Espectro Propuesto para la zona 4, los de la MZSB y los de la NSR-98

Se aprecia:

- El espectro cubre totalmente los valores de diseño para Fuente Intermedia, adecuadamente los de Fuente Cercana, pero no los de Fuente Lejana para T > 1.3s

- La aceleración Ao es inferior a las de la MZSB

- La aceleración Aa es inferior a la de la MZSB, algo superior a la del mínimo de la MZSB e inferior a las de la NSR98.

- La aceleración Amx es inferior o igual a la de todas las otras normas existentes

- Los períodos To y Tc son inferiores a los de la MZSB

- El espectro no coincide, ni por sectores, con ninguno de las normas existentes

- Para T > 1s, el espectro es inferior a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones.

En la **Figura 6.85** y en la **Tabla 6.27** se presentan el Espectro Propuesto para la zona 5, los de la MZSB y los de la NSR-98

Se aprecia:

- El espectro cubre adecuadamente los valores de diseño para Fuentes Intermedia y Cercana, pero no los de Fuente Lejana para T > 1.4s

- La aceleración Ao es inferior a la de la MZSB, pero algo superior a la del mínimo de la MZSB

- Las aceleración Aa es superior a las de la MZSB y a las de la NSR98.

- La aceleración Amx es superior o igual a la de todas las otras normas existentes

- Los períodos To y Tc son inferiores a los de la MZSB

- Para 0.7s < T < 1.0s, el espectro es muy similar a NSR98-S3

- Para T > 1s, el espectro es inferior a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones

De los resultados de todas las zonas mostrados anteriormente se puede resumir lo siguiente.

- Los espectros cubren adecuadamente los datos de Fuentes Cercana e Intermedia, pero no los de Fuente Lejana para períodos superiores a 1 segundo.

- Las aceleraciones Ao, Aa y Amx son diferentes a las de las otras normas

- Los períodos To y Tc son inferiores a los de las otras normas

- Para T > 1s, los espectros son inferiores a todos los otros de las normas existentes, debido a la necesidad de limitar el espectro de deformaciones

- Como ya se anotó en 5.6, en general, la forma de los espectros es diferente a los de las otras normas existentes, debido a la predominancia de espectros de fuente cercana, con señales de períodos bajos.

FUENTES CERCANAS EN LA AMENAZA SISMICA DE BOGOTA

- Sismicidad Historica

Este hecho está corroborado por el mismo Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (EMZSB), en cuyo aparte se indican los sismos que se han sentido en la ciudad con intensidad MM VI o superior en el período 1500-1994, así (**Tabla 6.5** modificada del EMZSB). **Ver Tabla 6.28**

Los detalles de estos sismos y las aceleraciones estimadas y adición de algunos eventos se muestran en la **Tabla 6.29**

En esta **Tabla 6.29** se han adicionado el sismo del Tunjuelo de 1966 y los sismos de Murindó y Páez que también se sintieron en algunas partes de la ciudad con IMM > 6

Se anota que sismos importantes, como los de Tumaco en 1906 (Ms=8.2) y 1979 (Ms=7.7), el de Páez de 1994 (Ms=6.6), el del Eje Cafetero de 1999 (Ms=6.1) y el de Pizarro de 2004 (Ms=6.7) no se sintieron en Bogotá con alguna intensidad significativa.

- Sismos Historicos Significativos

Ordenando estos sismos históricos por la aceleración estimada con la ecuación Donovan 2, se tiene que todos los sismos con aceleración a/g > 0.05 son cercanos Ve**r Tabla 6.30 y Figura 6.86**

Adicionalmente, de los 209 datos de sismos máximos anuales, 49 (23.4%- indicados con C en la **Figura 6.86,** corresponden a sismos cercanos. La localización de los sismos cercanos principales también aparece en el Mapa de Sismos Históricos de Ingeominas (2000). Ver **Figura 6.87**

Un evento cercano reciente ocurrió nuevamente cerca al Río Tunjuelo en Oct-01-2005, pero por tener magnitud ML = 2.9 < 3.0 (a/g Donovan2= 0.047). no aparece en el Catálogo. Ver **Figura 6.88**

- Conclusiones sobre sismos cercanos

Según los análisis estadísticos y probabilísticos realizados en este estudio con el registro histórico de sismos en Colombia hasta Enero de 2006, las fuentes sísmicas cercanas dominan el comportamiento de la amenaza sísmica para la ciudad de Bogotá

Esto se corrobora con el análisis de sismicidad histórica, pues de los 14 sismos sentidos en la ciudad con IMM > 6, los 7 más fuertes (50%), con aceleraciones superiores a 0.05g, corresponden a fuentes cercanas **(Tabla 6.30)**

Lo anterior tambien está indicado en el Estudio de Microzonificación Sísmica (aparte 1.2.1.1), en relación a los sismos históricos significativos:

"...Estos (epicentros) están localizados sin excepción en la Cordillera Oriental, tomando como límites de ésta el Valle del Magdalena y el Piedemonte Llanero. Zonas sismogénicas importanes a escala de los Andes colombianos, como la falla de Romeral en la Cordillera Central y las de la Cordillera Occidental no han sido significativas durante el período histórico pues los sismos generados en ellas no han producido intensidades altas en el área de Santa Fe de Bogotá.....La zona de la fosa de subducción del Pacífico, la cual ha producido una alta sismicidad en el siglo XX, tampoco ha sido significativa....El norte de la Cordillera Oriental, zona de los Santanderes, aunque muy activo en el período histórico, tampoco ha generado eventos destructores en Santa Fe de Bogota"

Con toda esta evidencia, los espectros sísmicos de diseño para la ciudad de Bogotá deben reflejar su realidad sismo-tectónica reflejada en casi 500 años de historia y es lo que se ha tratado de hacer en el presente estudio.

Aunque el futuro no es predecible y eventos inesperados a nivel global o aún cósmico, puedan cambiar la tendencia histórica, se estima que ésta no se alterará drásticamente en el futuro mediano.

Aunque ya hay estudios detallados de sismicidad histórica (p. ej. Espinosa, 1994; Dimaté et al., 2005) y estudios iniciales de neotectónica en el EMZSB, se requieren estudios muy profundos sobre la tectónica y sismicidad en un radio de 50km alrededor de la ciudad: con levantamiento muy detallado de los fallamientos cercanos, identificación de los mecanismos de los sismos que se han producido y de la neotectónica de la región, con proyectos similares al realizado recientemente por INGEOMINAS para la Falla de Ibague, incluyendo dataciones.

ACELEROGRAMAS DEL SISMO DE MEXICO DE 1985 Y SU USO PARA FUENTE LEJANA

Para la obtención de los espectros de fuente lejana se emplearon 39 acelerogramas, todos tomados en México D.F. durante el Sismo de Michoacán de 19 de Septiembre de 1985, que tuvo una magnitud Ms = 8.7 y ocurrió a distancias entre 398km y 425km de México D.F. y que ha sido adoptado como caracterísitico de fuente lejana desde los estudios iniciales de Microzonificación de Bogotá de 1997.

- Caracteristicas de Sismo de Michoacan

El sismo de 19 de Septiembre de 1985 fue generado en la Zona de Subducción de Guerrero, al SW de la capital mexicana y además de causar más de 35,000 muertos, colapso de más de 30,00 estructuras, daño a más de otras 60,000 e inmensa destrucción en Ciudad de México, tuvo características muy especiales entre las que se destacan:

- Una rara onda monocromática incidente con período de 2 segundos (casi perfectamente sinusoidal).
- Una tren de ondas acopladas en el Valle de Ciudad de México, lo que hizo que la duración del movimiento fuera del orden de 2 minutos
- Resonancia entre la onda incidente, el período del suelo al cual entró, en el piedemonte de la capital azteca y el período de edificios entre 1.5s y 2.0s , lo que causó la mayor parte de la destrucción.

Bogotá también es un depósito lacustre, pero la composición del subsuelo blando: arcillas predominantemente orgánicas, espesor hasta de 500m y con pocas intercalaciones duras, contrasta con el suelo de Ciudad de México de arcillas predominantemente volcánicas de hasta 150m de espesor y con dos intercalaciones duras gruesas.

Aunque los fenómenos de ondas acopladas y resonancia entre suelo y edificios puede presentarse en algunas zonas de Bogotá, especialmente el primero al norte entre los Cerros Orientales y el Cerro de Suba y el segundo en la Zona 2-Piedemonte y algo en la Zona 3, no

parece posible que llegue un sismo de las características del Sismo de Michoacan debido a las grande difrerencias entre la Zona de Subducción de Guerrero y la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, como se discute en el siguiente aparte.

Cabe indicar también que hubo consecuencias técnicas de este sismo, entre otras:

- La meseta pico de diseño de aceleraciones en Ciudad de México fue elevada de 0.24g a 0.40g

- El Código norteamericano UBC introdujo el Suelo S4 con factor de amplificación 2.0.

- Características Generales de la Zona de Subducción de Guerrero y la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano

La Zona de Subducción de Guerrero, como ya se dijo, se ubica al SW a unos 400 km de distancia del Valle de México. Ver **Figura 6.89**

La Zona de Subducción de Guerrero pertenece a la categoría de Zonas de Subducción Acopladas, normalmente zonas relativamente jóvenes (del orden de 10Ma) y delgadas, en las cuales pueden ocurrir grandes sismos (Heaton et al, 1986). Su geometría en sección indica una plataforma relativamente plana y extensa (L ≈ 150km) a 50 km de profundidad, que favorece la transmisión de ondas sísmicas.

Por su parte la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, tambien es reciente, pero en Colombia ya existía una Zona de Subducción, que corresponde a la actual Sistema de Fallas de Romeral, del orden de 20 Ma de antigüedad (Taboada et al, 2000). Ver **Figura 6.90**

Esta evolución hace que, en sección transversal, la configuración de la Zona de Subducción deñ Pacífico Colombiano sea totalmente diferente a la de la Zona de Subducción de Guerrero y que la transmisión de ondas sísmicas sea también diferente, estimándose una mayor atenuación.

Lo anterior se confirma con las comparación de las isosistas tanto del Sismo de México de 1985 (**Figura 6.91**) , con las del Sismo de Tumaco de 1906 (Ver **Figura 6.92**), el tercero de mayor magnitud sentido en el mundo y de 1979, los cuales no tuvieron incidencia en Bogotá D.C.

Es de anotar, además que el sector norte de la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano (BPA - Arco Baudó-Pacífico-Figura 6.10), es diferente al sector sur y que es en éste último, muy

acoplado, dónde se han generado los más grandes sismos. La divisón es física y la placa que subduce aparentemente está partida aproximadamente a la latitud 5°N (Ver **Figuras 6.93 y 6.94**)

- Conclusiones sobre Uso de Acelerogramas del Sismo de Mexico de 1985 como Fuente Lejana

Por todo lo expuesto no es aconsejable emplear los acelerogramas del Sismo de Mexico de 1985 como fuente Lejana para los análisis en la Ciudad de Bogotá.

Sería aconsejable estudiar más bien acelerogramas de sismos como los de Murindó-1992 (que fué sentido en Bogotá con IMM =5) o Pizarro-2004.

También todo lo anterior refuerza que los acelerogramas de sismos lejanos aparentemente no son tan importantes en los espectros de diseño de aceleraciones para Bogotá D.C., pero que si deben investigarse más a fondo los fenómenos de ondas superficiales y de ondas acopladas para las Zonas 2, 3 y 4 de la ciudad y de resonancia para las Zonas 2 y 3.

6.2.6 Limitaciones

Este estudio de combinación de espectros tiene las siguientes limitaciones específicas:

Por considerar únicamente los resultados de las cuatro secciones indicadas en la Figura 1.1, no se cubre más ampliamente toda el área de estudio de Bogotá D.C., pero se estima que los acelerogramas sí son representativos, en especial para Zonas 1 a 4.

Por la misma razón, el número de acelerogramas es diferente para las diferentes zonas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá y en especial para la Zona 5 el número de datos es muy inferior al de las otras zonas. Se deben adelantar estudios de respuesta local para la zona sur de la ciudad.

Tampoco se verificó la aceleración media de cada grupo de acelerogramas empleado en cada zona, para contrastarla con los valores de diseño (0.25g, 0.20g y 0.038g).

Se aceptó implícitamente la división actual en 5 zonas y no se entró a detallar si en realidad las características de agrupamiento de datos responden a una realidad física y estadística.

Por ejemplo análisis más detallados, en especial de carácter geológico y geomorfológico, permitirían subdividir la Zona 1 y 2 (p.ej. Cerros de Suba; Cerros Orientales Sur; Cerros Orientales Norte; Cerros de Ciudad Bolívar y SE, etc).

Para las Zonas 3 y 4 debería pensarse en parámetros espectrales en función del espesor de los sedimentos lacustres y no con la línea de subdivisión actual entre ellas que resulta en un gran salto ilógico de los espectros en un depósito lacustre cuyo espesor se incrementa gradualmente. Se deberían tener más datos de estudios locales al oeste de la ciudad y refinar los datos de espesores de sedimentos blandos.

Para los análisis de Magnitudes generadoras de aceleraciones, para las fuentes Intermedia y Lejana se asumieron como ciertos los datos de distancia y aceleración dados en el EMZSB.

El registro histórico de sismos no es completo y en algunos aspectos redundante (p. ej. réplicas). Para la completitud no hay mucho que hacer, pero para minimizar la redundancia, se trabajó con parámetros máximos anuales.

El registro histórico también tiene grandes incertidumbres en las Magnitudes y Localización de epicentros, en especial para los sismos más destructivos (1644, 1785, 1827, 1917). No se indagó sobre esas incertidumbres (discutidas por ejemplo por Dimaté et al, 2005) y se aceptaron los datos del Catálogo.

No se incorporaron los datos de estudios neotectónicos consignados en el EMSB, los cuales, en concepto de la SCG, deben profundizarse.

Limitaciones en los Modelos

En el modelo de obtención de períodos de retorno de las aceleraciones de diseño (0.25g para Fuente Cercana, 0.20g para Fuente Intermedia y 0.038g para Fuente Lejana y como ya se dijo en el punto F) del aparte anterior se aceptaron como ciertas las aceleraciones y distancias del EMZSB para Fuentes Intermedia y Lejana y la aceleración del EMZSB y la distancia promedio del registro histórico para Fuente Cercana. En rigor el análisis debería considerar incertidumbre tanto en la aceleración como en las distancias, pero esto no se hizo por las razones anotadas y entonces en la ecuación:

$$P(A \geq a) = P(A \geq a/D,Ms)*P(D/Ms)*P(Ms) \qquad (6.1)$$

en la cual:

$P(A \geq a)$ = probabilidad de excedencia de aceleración A sobre valor a

$P(A \geq a/D,Ms)$ = Probabilidad condicional de excedencia de A dadas una distancia D y una magnitud Ms (Incertidumbre en la ecuación de atenuación).

P(D/Ms) = Probabilidad condicional de la distancia dada la magnitud Ms

P(Ms) = Probabilidad de excedencia de la magnitud Ms (Gutenber-Richter Truncada)

se adoptó P(A≥ a/D,Ms) = P(D/Ms) = 1.0, dado que no se trata de un estudio de amenaza, sino de estimar una ponderación para combinar espectros.

Las ecuaciones de atenuación de Donovan, las cuales se prefirieron, son para distancias epicentrales, por lo que el parámetro Z profundidad no se tiene en cuenta y esto influye en el efecto de un sismo en la ciudad: no es lo mismo el efecto de una aceleración producida por un sismo cercano con un radio de influencia relativamente menor, que la misma aceleración producida por un sismo intermedio o lejano, con un radio de acción mucho mayor y además los contenidos frecuenciales de las señales son diferentes y afectan en forma diferencial las diferentes zonas de la ciudad. Sin embargo, las curvas usuales de amenaza tampoco tienen en cuenta estos efectos.

Por la misma razón y además, porque en los datos de sismos históricos anteriores a 1957 no está claramente definida la profundidad, en la ecuación 2.4 de McGuire, en la cual D es la distancia focal y no epicentral, se adoptó Z=0 en todos los casos, lo cual sobre-estima las aceleraciones.

En los modelos de evaluación no se incorporó el término de incertidumbre de las ecuaciones de atenuación, nuevamente por la razón de que este estudio es para la estimación de una combinación de espectros.

La división de distancias epicentrales D para definir las fuentes (50km, 250km), es del Autor.

En la amenaza, tanto agregada como desagregada, estimada con el registro histórico para efectos de la combinación de espectros, se empleó la distribución de Gumbel para eventos máximos, ante las limitaciones de tiempo y por la dificultad de asignar eventos a fuentes específicas, en especial para eventos cercanos.

En la amenaza desagregada, los cortes de aceleraciones (a mín) para aplicar la distribución Gumbel, válida para a > a mín, fueron escogidos gráficamente por el Autor.

Los factores de ponderación para combinar diferentes modelos (2/3 para Donovan2 y 1/3 para McGuire; 4/5 para modelo de aceleraciones y 1/5 para modelo de magnitudes) son estimativos subjetivos del Autor, con base en incertidumbres asignadas también subjetivas.

7 CONCLUSIONES

Se ha hecho una evaluación detallada de la información disponible de estudios de respuesta local en la ciudad de Bogotá con el fin de evaluar el comportamiento dinámico de estos suelos tanto a bajas deformaciones como a rangos de deformación de interés para los estudios de respuesta dinámica local para sismos de diseño. Con base en esta evaluación se ha preparado una base de datos georeferenciada con la información geotécnica recopilada y recomendaciones para seleccionar las propiedades dinámicas del perfil de suelos y poder hacer los análisis de respuesta dinámica.

Se analizaron datos de clasificación y estado de los suelos y se relacionaron con los valores medidos de Vs en el terreno y los valores de rigidez a bajas deformaciones obtenidos en el laboratorio. Los resultados se han confrontado con los datos obtenidos en la literatura técnica mundial sobre el tema con el fin de identificar y validar los resultados.

El estado de los suelos arcillosos tanto de origen aluvial, como coluvial y lacustre de la Sabana de Bogotá en términos de la relación de vacíos está correlacionado de manera única con los valores de índice de plasticidad. La excepción son las turbas que presentan el mismo comportamiento pero con valores de tendencia diferentes.

Con base en la información analizada se ha podido establecer una clara correlación entre la rigidez dinámica in situ a bajas deformaciones y los parámetros de tipo de material (índice de plasticidad) y su estado (relación de vacíos, relación de sobreconsolidación y presión de confinamiento), funcionalmente de la misma forma que se ha reportado en la literatura. Los parámetros obtenidos son también consistentes con los datos de la literatura. Se utilizó la correlación de tipo lineal existente entre la rigidez dinámica en función del parámetro de normalización K definido por Rodriguez y Escallón (2006 a) y el índice de plasticidad de los suelos arcillosos para un rango de IP de 30 a 190 con el fin de estimar los valores de Vs a partir de parámetros geotécnicos básicos.

Se ha encontrado una amplia variación en los valores obtenidos a partir de ensayos dinámicos de laboratorio. Se han identificado problemas de calidad de las muestras y procedimientos de ensayo que pueden ser la causa de la dispersión. Estas variaciones producen importante incertidumbre que no permite apreciar con claridad las tendencias de comportamiento y comparar con los referentes publicados en la literatura. Una gran cantidad de datos corresponden a valores de rigidez muy bajos, lo cual tiene un efecto importante en la respuesta dinámica calculada, haciendo que esta sea muy baja. Si estos valores tan bajos de respuesta son debidos a problemas de muestreo y ensayo, los resultados obtenidos a partir de estos datos implican una condición de riesgo ya que la repuesta real del terreno sería más alta.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el análisis de la información permitió definir unas recomendaciones para caracterización dinámica de los suelos de la ciudad con un criterio conservador con base en una envolvente de la tendencia general encontrada y los datos de referencia de la literatura técnica internacional.

Con base en análisis de la información disponible de espesores de las formaciones Sabana y Subachoque, y teniendo en cuenta consideraciones de tipo geomorfológico, se establecieron tendencias de variación de los espesores de estas formaciones con lo cual se puede extrapolar el espesor de las mismas sobre toda el área de la ciudad con base en el mapa de espesores de sedimentos.

La información disponible permitió determinar con razonable precisión las tendencias de los parámetros dinámicos de los suelos en el sector norte de la ciudad donde las condiciones de suelos son relativamente uniformes y es donde se encuentra la mayor cantidad de información. A lo largo del piedemonte de los cerros orientales, a partir de la calle 26 aproximadamente, se tiene un buen número de estudios, los cuales sin embargo evidencian la alta variabilidad espacial de las condiciones de suelos en este sector. Los datos permiten tener criterios de caracterización de estos suelos, y tendencias de comportamiento. La variabilidad espacial se debe reflejar también en una alta variabilidad local de la respuesta dinámica. Esto es algo que se debe tener en cuenta en la evaluación de dicha respuesta.

La revisión de la información evidenció una carencia casi completa de información en grandes áreas de la ciudad, en particular al occidente de los cerros de Suba donde se encuentran depósitos de suelos blandos, y en el sur-occidente (zona 5 de la microzonificación), donde los depósitos de suelos son de origen aluvial asociados con los abanicos de deyección de los ríos Fucha y Tunjuelo. Por su origen en estos sectores los suelos son altamente variables y por lo tanto existe una gran incertidumbre en la determinación de sus propiedades, lo cual se debe tener en cuenta en la determinación de la respuesta dinámica.

En resumen, los resultados del estudio han permitido definir tendencias de variación de la velocidad de onda de corte Vs y definir criterios para obtener las curvas dinámicas de respuesta del suelo en función de parámetros geotécnicos básicos para los suelos de la ciudad. De esta forma se pueden definir de manera completa los parámetros de respuesta dinámica para cualquier sitio de la ciudad en el que se tenga información geotécnica. Se identificaron también las zonas de la ciudad donde la variabilidad de los suelos es grande o no se cuenta con información suficiente de estudios de respuesta local, de manera que no se tiene información suficiente para estimar con confianza al respuesta dinámica. En estos sectores se debe buscar favorecer la realización de este tipo de estudios, y en la definición de los espectros de respuesta trabajar con valores conservadores para considerar esta incertidumbre.

Ante la carencia de información, y teniendo en cuenta las condiciones planteadas en el convenio, en el desarrollo del proyecto se han realizado un buen número de análisis de sensibilidad para determinar cuales son los factores que tienen una incidencia significativa en la respuesta final (analizada mediante modelación numérica), de los modelos estudiados. A partir de estos resultados, se tomaron decisiones encaminadas a optimizar la modelación numérica y a precisar la información de la cual se deducen los parámetros que gobiernan los resultados.

Las secciones de análisis presentadas se determinaron con base en la disponibilidad de información. Se procuró trazarlas en sitios de los cuales se tuvieran registros de perforación pero adicionalmente, atravesando todas las zonas contempladas en la actual Microzonificación Sísmica de Bogotá. Sin embargo, ante la escasa exploración del subsuelo que se ha hecho en el sector sur de la ciudad, para la sección 4 fue necesario recurrir a información de estudios de respuesta cercanos. Por lo anterior, es recomendable llevar a cabo un programa de exploración que permita conocer de mejor manera toda la zona 5 planteada en la MZSB.

Como se pudo observar en las figuras de aceleraciones máximas, quizá el parámetro que mayor incidencia muestra en la respuesta de los modelos es la profundidad del basamento rocoso. Se nota que la forma asumida para este, se refleja en la forma de las aceleraciones máximas en superficie. Por tal motivo se requiere llevar a cabo investigaciones encaminadas a determinar estas profundidades con un mayor grado de confiabilidad.

La determinación de las curvas dinámicas para los suelos lacustres trabajados, se realizó con base en las investigaciones presentadas en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá. Sin embargo se resalta que, para el resto de materiales se recurrió a la literatura internacional, a proyectos llevados a cabo por empresas privadas y trabajos académicos. Esta se considera, una práctica aceptable si se tiene en cuenta las limitaciones en información y estandarización en los ensayos dinámicos que se realizan en la ciudad.

Ante la ausencia de información de velocidades de onda en los perfiles, y teniendo en cuenta la alta incidencia de este parámetro en la respuesta del depósito, fue necesario realizar una extrapolación de los valores, basado en las expresiones presentadas arriba. Se resalta que dichos valores No surgieron de correlaciones con resultados de ensayos de penetración estándar (SPT), ya que se reconoce las incertidumbres y errores que esta práctica generaría y la falta de estandarización en la ejecución de la prueba.

Con el objeto de contar con la mayor cantidad posible de información, referente a los posibles movimientos de diseño, se optó por realizar análisis con todas las señales recomendadas por el Sistema de Información para Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (SIRE). Sin embargo, en el momento de realizar las propuestas de modificación en los espectros actuales, solo se tendrán en cuenta aquellas señales que producen espectros tripartita con formas coherentes y se descartan las demás.

Aun cuando los análisis se muestran en términos de espectros de respuesta, tanto de aceleración como de velocidad y desplazamiento, se presentan las funciones de transferencia que arrojan los resultados obtenidos, con el objeto de comparar el presente estudio con el que se llevó a cabo por parte de la Universidad de los Andes. Preliminarmente, se pudo establecer que no sería válido determinar una función de transferencia única para cada zona de la ciudad, ya que su forma depende de la señal empleada y de la profundidad del depósito de suelo en el punto.

Se presentó un análisis de sensibilidad referente a la utilización de señales sísmicas escaladas, teniendo en cuenta la amenaza para la ciudad. Con base en este, se concluye que los

resultados con las señales amplificadas producen resultados extremadamente conservadores y las propuestas a realizar se basarán solamente en los resultados con los sismos sin escalar.

Teniendo en cuenta que el nivel real de fundación de las edificaciones no se encuentra sobre la superficie del terreno, se presenta un análisis de la variación en los espectros en profundidad y de este se puede concluir que existen diferencias significativas a medida que aumenta la profundidad de análisis, para las señales de campo cercano e intermedio. Se observa que los mayores valores se encuentran en la superficie del suelo y por lo tanto se estarían obteniendo valores más conservadores.

Se presentó una figura en la cual se muestran las dispersiones entre los ensayos llevados a cabo en la Universidad Javeriana y la Universidad de los Andes. Con el objeto de poder realizar mejores comparaciones en los resultados, los ensayos dinámicos que se efectúen en la ciudad, deberían ser estandarizados.

Para la determinación de los espectros de diseño propuestos se hizo una revisión detallada de toda la información disponible, incluyendo la revisión de la amenaza sísmica y se estudió en detalle la forma como combinar los resultados de los análisis de respuesta de las diferentes fuentes para poder definir unos espectros de aceleración, velocidad y desplazamientos de diseño propuestos para cada zona. Además se hizo un análisis con base en relaciones espectrales obtenidas de registros de sismos aplicadas al espectro de amenaza uniforme propuesto por la Universidad de Los Andes, teniendo en cuenta los efectos de no linealidad de sismos fuertes comparados con sismos de baja intensidad. A partir de este análisis se establecieron espectros envolventes de referencia para validar los resultados de los análisis de respuesta y que sirven con referencia adicional con respecto a los resultados de presente estudio y otros que se hayan realizado con otras metodologías. Esto se discute en detalle en el capítulo 6 donde se hace referencia a las conclusiones y limitaciones específicas a este tema.

8 LIMITACIONES

Los análisis realizados involucran el uso de información y de métodos de análisis los cuales tienen limitaciones e incertidumbres. Dentro de los alcances del trabajo no se contempló hacer una evaluación sistemática y formal de estas incertidumbres, pero éstas afectan los resultados, y se deben tener en cuenta en el momento de tomar decisiones de diseño con base en los resultados. Para guiar en ese proceso, a continuación se presentan de manera sintética los principales factores de incertidumbre y la forma como se han tenido en cuenta en el presente estudio. Se hace una clasificación con respecto al impacto y el grado de conservatismo que se ha aplicado sobre ellos.

Estratigrafía

En las secciones para análisis bidimensionales se tuvo en cuenta toda la información disponible no solo de la base de datos recopilada en el proyecto para el modelo geotécnico, sino el aporte de conocimiento de quienes participaron en el trabajo proveniente de otras fuentes de información. En todo caso existe alta incertidumbre para profundidades mayores a 50 m. Estos datos tienen poca influencia sobre los resultados para periodos menores a 1 seg, aproximadamente.

Este parámetro es de impacto moderado y se consideraron rangos de propiedades y los criterios geomorfológicos para definir los valores que se consideran representativos, aunque con incertidumbre.

Parámetros dinámicos de los suelos

Perfiles de Vs

Se hicieron análisis paramétricos para definir que grados de discretización en términos de espesores de capas eran relevantes para el problema con el fin de optimizar los análisis. Con base en esto se encontró que utilizando un registro de down hole con variaciones locales de Vs se obtienen valores de respuesta menores que si se consideran menos capas con valores promedio.

Este parámetro es de alto impacto en los resultados y los modelos utilizados resultan ser conservadores.

Curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento

Hay una gran dispersión en los resultados de los ensayos de laboratorio debido principalmente al gran efecto que tienen los procedimientos de muestreo y ensayo sobre la rigidez de suelos blandos, y la falta de información representativa en otros tipos de suelos debido a la imposibilidad de obtener muestras. Se utilizaron valores que corresponden prácticamente a envolventes superiores de los valores medidos y de los reportados en la literatura, que necesariamente también deben corresponder a valores al menos relativamente conservadores.

El efecto de este parámetro es de impacto moderado y está considerado conservadoramente

Condiciones de frontera

Modelos bidimensionales vs realidad

La propagación de ondas de un sismo ocurre en un frente circular y en un patrón tridimensional que depende de la geología del substrato y la topografía. El modelo bidimensional utilizado es sólo bidimensional y no tiene en cuenta la direccionalidad del movimiento.

Este parámetro parece ser de impacto moderado, y está considerado conservadoramente al asumir que el sismo ocurre con toda su intensidad en al dirección de la sección.

Aplicación del movimiento en la base del modelo

Los modelos utilizados integran el acelerograma y lo aplican como una historia de desplazamientos en la base del modelo al mismo tiempo en todo el modelo. Para los modelos de extensión importante que se analizaron esto es una situación mucho más drástica que lo que ocurre en realidad que es la propagación de un tren de ondas que recorre el modelo. Este aspecto es de alto impacto y produce valores exagerados de respuesta especialmente en los bordes de los modelos (zona 2) y en los componentes de largo periodo por efecto de ondas superficiales, por lo que está considerado de forma muy conservadora.

Por otra parte se utilizaron acelerogramas que fueron registrados en superficie sin hacer ninguna corrección para tener en cuenta que si estos se hubieran registrado en la base de un depósito, que es donde realmente ocurren y se aplican al modelo los niveles de movimiento serían mucho menores. Esto es debido a que en superficie las ondas se reflejan y la amplitud del movimiento aproximadamente se duplica, mientras que al pasar de un medio a otro en la base del depósito, parte de la energía se refleja hacia la roca y parte se transmite.

Este aspecto es de alto impacto y está considerado de una forma muy conservadora.

Aspectos numéricos

Discretización

Para definir la discretización se hicieron análisis paramétricos para determinar el máximo tamaño de elementos que se podían utilizar sin afectar significativamente los resultados manteniendo los modelos dentro de los límites de capacidad de los equipos que se utilizaron. Este efecto es de alto impacto sobre los resultados por lo que se controló de manera cuidadosa para no afectarlos negativamente. Es posible que de todas maneras parte de la respuesta de alta frecuencia se haya visto filtrada en alguna medida, pero no se considera que el efecto sea importante.

Amortiguamiento y amplificación asociada con la integración numérica

Los análisis paramétricos que se hicieron con los diferentes programas utilizados muestran que por efectos tanto de esquemas de integración numérica de las ecuaciones, como del cálculo de los parámetros de amortiguamiento numérico se presentan resultados que pueden llegar a ser sustancialmente diferentes para diferentes rangos de frecuencia entre los diferentes modelos. Los resultados son similares en los rangos de frecuencia normalmente utilizados para análisis de respuesta sísmica y difieren más para frecuencias muy altas o muy bajas.

Este parámetro es de alto impacto y hay incertidumbre en la interpretación de los resultados. Sin embargo los valores obtenidos comparados con datos registrados indican que las diferencias por este efecto producen valores exagerados en todos los casos. Aún así los valores altos se tuvieron en cuenta en los análisis, por lo que se considera que estos efectos se han considerado de manera conservadora.

Sismos de análisis.

Los sismos que se utilizaron fueron los sismos reales seleccionados en el estudio del Ingeominas como representativos de los posibles escenarios de sismos que pueden ocurrir en las diferentes fuentes sísmicas que pueden afectar a la ciudad. Como tal se considera que estos sismos son adecuados y representativos de los escenarios de diseño. Sin embargo corresponden a eventos cuya probabilidad no necesariamente corresponde con la de la norma sismo resistente colombiana, sino que corresponden mejor a los escenarios máximos posibles en las fuentes. Por lo tanto se considera que para la definición de los parámetros de diseño se debe tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de los diferentes escenarios y correspondientemente la contribución de las diferentes fuentes a la amenaza, y con base en esto se ha trabajado la recomendación de diseño planteada en este informe. Si se pretende utilizar directamente los resultados de los análisis se considera que estos serían muy conservadores.

Aspectos relacionados con los sismos para análisis de la norma (Decreto 193 de 2006)

Se considera que hay aspectos técnicos asociados con las normas que es importante usarlos como punto de referencia para este tema a saber:

El estudio nacional de Amenaza Sísmica, base de la norma NSR-98, establece la amenaza sísmica para Bogotá en 0,2g. Este valor corresponde al valor máximo esperado de aceleración en roca, y se calcula como la suma de las probabilidades de excedencia del movimiento sísmico en la ciudad proveniente de todas las posibles fuentes sísmicas, en un período de exposición de 50 años con una cobertura por incertidumbre del 90%. En otras palabras, es de esperarse con base en los datos utilizados en el estudio (magnitud y recurrencia de las posibles fuentes y ecuaciones de atenuación), que se pueda exceder este nivel de movimiento en 50 años con una probabilidad del 10% de excedencia a nivel de roca. La contribución a la amenaza en Bogotá esta dada por:

- Sismos cercanos, que pueden tener aceleraciones altas

- Sismos lejanos que provienen de la zona de subducción del Pacífico y sólo pueden tener aceleraciones bastante bajas

- Sismos fuertes de rango intermedio de distancias y probabilidad relativamente alta, como los que pueden ocurrir en las fallas de la cordillera oriental.

De acuerdo con el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (EMZSB), se calculó que las aceleraciones máximas del terreno (con criterios no necesariamente similares a los de la NSR-98) para cada fuente fueran 0,038g para la fuente lejana, 0,25g para la fuente cercana y 0,2g y para la fuente intermedia. De acuerdo con los resultados técnicos de los estudios recientes de Ingeominas y Uniandes la amenaza sísmica para un período de retorno de 475 años en la ciudad de Bogotá es de 0,175g, y los valores máximos de aceleración del terreno para la fuente cercana pueden ser de 0,16g, la fuente intermedia 0,14g y la fuente lejana a 0,038g (de acuerdo con un documento interno de trabajo de la DPAE que se nos suministró durante el desarrollo del estudio).

De lo anterior se deduce que el valor probabilístico de amenaza de 0,2g (o 0,175g según estimaciones recientes mencionadas), no corresponde al de un sismo en particular ni a un sismo de diseño. Para seleccionar los sismos de diseño es necesario identificar las posibles fuentes sísmicas, su tipo, magnitud y distancia, y con base en eso seleccionar registros preferiblemente de sismos reales representativos de esas condiciones. Esto es lo que hizo el Ingeominas y que fue la base para la selección de los sismos que la DPAE ha definido para análisis de respuesta local de edificaciones de acuerdo con el Decreto 193. Dichos sismos sin modificar son los que se han considerado en los análisis. Estos sismos fueron adoptados por la DPAE desde el comienzo de la vigencia del Decreto 193 hasta el 13 de marzo de 2007, cuando se publicó en la página Web que debían ser escalados. En dicha fecha se cambiaron los sismos sin escalar por los mismos sismos pero escalados linealmente, de manera que los valores

máximos de aceleración de los registros coincidieran con los del EMZSB, con el ánimo de respetar dichos niveles de amenaza. Adicionalmente, se anotó que para trabajar con los sismos escalados se debía diseñar con el promedio de los valores obtenidos.

Con respecto al escalamiento se discutió que por una parte los valores probabilísticos, por trabajar con niveles de cobertura por incertidumbre, en realidad se deben relacionar con las envolventes con cierto nivel de cobertura por incertidumbre de los resultados que se obtengan con el análisis de sismos representativos. Por otra parte, el escalar linealmente un registro de un sismo no tiene ninguna justificación física, sismológica o matemática, ya que se trata de un fenómeno donde hay componentes tales como la distribución de energía en los diferentes componentes del movimiento ondulatorio, así como las fases de esos componentes que dependen de aspectos básicos de la física del movimiento tales como tipo de fuente, magnitud del sismo, distancia al sitio de registro y ambiente tectónico, entre otros, ninguno de los cuales se puede considerar linealmente proporcional a la aceleración máxima del registro. El escalamiento lineal tiene efectos muy fuertes sobre las características del movimiento, no sólo sobre la aceleración máxima del registro, que hace que los sismos escalados de esta forma realmente no sean representativos del fenómeno que se quiere analizar. Se evaluaron resultados de espectros de respuesta de los registros escalados así como de análisis bidimensionales de respuesta ilustrando estos efectos, en los que se evidencia que utilizar los sismos escalados cambia sustancialmente las condiciones del problema en una condición que no es representativa de la realidad que se pretende modelar. Estos resultados son muy altos, y aunque se podría argumentar que para diseño son seguros, no se consideró que fueran razonables para evaluar objetivamente las condiciones de respuesta dinámica del terreno que son el objeto del estudio.

Con base en lo anterior se discutieron opciones y se concluyó que para el propósito del estudio se trabajaría con los sismos seleccionados por el Ingeominas sin escalar ya que son representativos de sismos reales similares a los que pueden ocurrir en las fuentes sísmicas que afectan a Bogotá. Además se evaluaron los espectros de los sismos en diagramas tripartitos para verificar que fueran consistentes tanto en términos de aceleraciones como de velocidades y desplazamientos, lo que permitió identificar problemas con algunos de los registros, que aunque se utilizaron para los análisis, no se tuvieron en cuenta para la interpretación final.

Como conclusión final, los análisis realizados tienen incertidumbres y limitaciones, muchas de las cuales han sido identificadas y en todos los casos consideradas de manera conservadora o muy conservadora, los parámetros que tienen menos incertidumbre se busco considerarlos en sus justas proporciones. Se recomienda que estas consideraciones se tengan en cuenta en el momento en que se utilicen estos resultados para la toma de decisiones con respecto a definir normas para los parámetros de diseño.

9 RECOMENDACIONES

Para el análisis de respuesta dinámica se deben determinar los parámetros geotécnicos y dinámicos del perfil de suelos entre la roca y la superficie del terreno. Para esto es necesario extrapolar la información a profundidades entre la máxima de exploración, usualmente 50m, y el espesor total del depósito que puede alcanzar hasta 450 m en el área urbana. En la actualidad aún existe muy poca información para profundidades mayores a 50m y hay grandes áreas de la ciudad donde prácticamente no se cuenta con información, en particular al sur de la calle 26. Es muy importante que se complemente la información en estas zonas que corresponden aproximadamente al 50% de al ciudad mediante investigaciones especiales y la realización de estudios locales de respuesta.

A pesar de que se ha hecho un buen número de estudios de respuesta local con ensayos de laboratorio, el presente estudio indica que la calidad de la información no es buena y aún existe gran incertidumbre con respecto a la determinación de las curvas de degradación dinámica de la rigidez y el amortiguamiento de los suelos de la ciudad. Se considera que se deben realizar estudios de investigación detallada y controlada en los que se puedan obtener muestras de alta calidad con un protocolo estricto de custodia y ensayo, para verificar verdaderas tendencias de comportamiento y poder validar o ajustar las recomendaciones adoptadas en el presente estudio u otras como las que reciente han sido propuestas por Díaz y Alarcón (2007).

Se ha identificado que la principal contribución de la amenaza sísmica para la ciudad es de fallas cercanas, particularmente las localizadas en el sur de la ciudad. Existen evidencias de fallas con rumbo aproximadamente este-oeste, que no aparecen en los planos geológicos del EMZSB. Estas fallas parecen coincidir con sismos históricos e instrumentales, por lo que es posible que sean fuentes sismogénicas activas que pueden ser las más importantes para la ciudad. Dada la importancia de estos hallazgos, y la falta de información al respecto, se considera muy importante realizar estudios detallados de neotectónica de estas fallas, y aprovechar la información de estudios geológicos y de estabilidad que hace la DPAE para obtener información que permita hacer un modelo tectónico más completo de la ciudad.

El presente estudio ha puesto de manifiesto limitaciones en los modelos utilizados hasta la fecha para el cálculo de respuesta dinámica, tanto 1D por no ser representativos de las condiciones de la Sabana, por lo menos en lo que corresponde a las zonas 1, 2 y 3 de la MZSB debido a los efectos topográficos del contacto roca sedimentos, y de los modelos 2D por efectos numéricos y de condiciones de frontera. Este tema por lo tanto se considera que se debe seguir investigando con base en la información y técnicas computacionales más recientes desarrolladas para estos análisis.

Por otra parte, los registros de sismos de la red de acelerógrafos de la ciudad, aunque de sismos pequeños, probaron ser muy útiles para entender la respuesta del depósito, validar los estudios de respuesta y como medio para poder estimar mejor los parámetros de respuesta dinámica de los suelos. Sin embargo la información que se tiene es limitada, y ha habido sismos

recientes que se pueden haber registrados pero cuya información no se conoció. Se recomienda que se implemente procedimientos que permitan el uso efectivo y oportuno de la información de la red, aunque sea de sismos pequeños, para los estudios de respuesta y la definición y actualización de los parámetros de diseño.

Finalmente, dado que el problema de la amenaza sísmica, la estimación de la respuesta y la definición de los parámetros de diseño es un tema complejo, para el cual las personas que han participado en estos temas en el país no tienen la suficiente experiencia e idoneidad para poder valorar en su justa proporción todos los aspectos relacionados, incluyendo los técnicos, los socio económicos y políticos y las limitaciones de la información disponible, se recomienda que se consulte con expertos internacionales idóneos, o por lo menos con más experiencia, que puedan valorar la información disponible y asesorar a la DPAE con sus apreciaciones antes de proceder a hacer la definición de los parámetros de diseño revisados para la ciudad.

10 REFERENCIAS

Andriessen, P.M.A., Helmens, K., Hooghiemstra, H., Riezebos, P.A., Van der Hammen, T., 1993. Absolute chronology of the Pliocene–Quaternary sediment sequence of the Bogotá area, Colombia. Quaternary Science Reviews 12, 483–501.

Cleef, A.M., Hooghiemstra, H., 1984. Present vegetation of the area of the high plain of Bogotá. In: Hooghiemstra, H. (Ed.), Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Dissertationes Botanicae, 79, pp. 42–66 (J. Cramer, Vaduz).

Diaz-Parra Fernado, Alrcón-Guzman Adolfo, (2007), Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Reporte de Investigación Universidad nacional de Colombia, Bogotá.

Drnevich, V.P., Hall, J.R., Richard, F.E., 1967, Effect of the amplitude of vibration on the shear modulus of sand. Proceedings, international symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials. University of New Mexico Press.

Dobry, R., Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proceedings. International symposium on geotechnical engineering of soft soils 2, 51 – 87.

Evaluation of Soil and Rock Properties (GEC 5, 2002)

García Oscar (2007) Programa Krig3D

Hardin, B.O., and Richard, F. E., (1963) “Elastic wave velocities in Granular Soils”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 89 SM1.

Hardin, B.O., and Black, W. L., (1968) “Vibration Modulus of normally Consolidated Clay”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94 SM2.

Hardin, B. O., and Black, W. L., (1969) “Closure to vibration modulus of normally consolidated clay”. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 95, SM6, 1531-7.

Hardin. B. O., and Drnevich, V. P., (1972) “Shear modulus and damping in soils: design equations and curves”. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692.

Helmens, K., 1990. Neogene–Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia (stratigraphy, palaeoenvironments and landscape evolution). Dissertationes Botanicae 163, 202 pp. J. Cramer, Berlin-Stuttgart.

Hooghiemstra, H., 1984. Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Colombia. Dissertationes Botanicae 79, 368 pp. J. Cramer, Vaduz.

Hooghiemstra, H., 1989. Quaternary and Upper Pliocene glaciations and forest development in the tropical Andes: evidence from a long high-resolution pollen record from the sedimentary basin of Bogotá, Colombia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 12, 11 –26.

Hooghiemstra, H., Cleef, A.M., 1995. Pleistocene climate changes, environmental and generic dynamics in the north Andean Montane forest and paramo. In: Churchill, S. (Ed.), Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest. The New Cork Botanical Garden, Bronx, NY, pp. 35– 49.

Hooghiemstra, H., Melice, J.L., Berger, A., Shackleton, N., 1993. Frequency spectra and palaeoclimatic variability of the highresolution 30–1450 ka Funza-1 pollen record (Eastern cordillera, Colombia). Quaternary Science Reviews 12, 141–156.

Hooghiemstra, H., Ran, E.T.H., 1994. Late and middle Pleistocene climatic change and forest development in Colombia: pollen record Funza II (2-158 core interval). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 109, 211– 246.

Hooghiemstra, H., Sarmiento, G., 1991. Long continental pollen record from a tropical intermontane basin: late Pliocene and Pleistocene history from a 540-meter core. Episodes 14, 107– 115 .

Ingeominas, Universidad de los Andes (1997) “Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá”.

Ishibashi, I., and Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. Soils and Foundations 33:1, 182-191.

Kokushu, T. (1980) “Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range”. Soils and Foundations 20:2, 45-60.

Kokushu, T. (1987) “In situ dynamic soil properties and their evaluation”. Proceedings of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, Vol. 2, pp. 215-435.

Marchant, R., Boom, A., Hooghiemstra, H., 2002. Pollen-based biome reconstructions for the past 450000 yr from the Funza- 2 core, Colombia: comparisons with model-based vegetation reconstructions. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 177, 29–45.

Moreno, C. A., Rodríguez E. (2004). Dynamic behavior of Bogota's subsoil peat and its effect in seismic wave propagation. 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Rodríguez J., Escallón J. (2006 a) Evaluación de las Propiedades Dinámicas a Bajas Deformaciones de los Suelos de Bogotá. Revista Escuela Colombiana de Ingeniería No. 61, Enero-Marzo, 2006 pp7-14, Bogotá.

Rodríguez J., (2006) Avances recientes en la caracterización de suelos blandos de Bogotá. XI Congreso Colombiano de Geotecnia. Pp 237-250, Cartagena.

Rodríguez J., (1994). A new Method for Interpretation of Surface Waves Measurements in Soils, PhD Dissertation, North Carolina State University.

Seed, H., and Idriss, M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Torres, V. Vandenberghe, J., Hooghiemstra, H., 2005, An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 226 (2005) 127– 148

Torres, V., 1995. Análisis paleoclimático con base en palinología de los sesenta metros superiores del pozo Ingeominas-I y su relación con los depósitos lacustres de la Sabana de Bogotá. Undergraduate Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., 43 pp.

Van der Hammen T. (Ed), 1995, Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis Geográficos No. 24. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Van der Hammen T., Gaviria S., Caro P., Padilla J., Vergara H., Vargas G., Faivre P., Duarte R., Romero F., Thorez J., Angel C., Berrio J.C., Gonzalez L.M., Vargas O., Cardenas J.F., 2004, Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS, Publicaciones Geológicas Especiales No. 27.

Van der Hammen, T., González, E., 1963. Historia de clima y vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. Boletín Geológico (Ingeominas, Bogotá) 11, 189–266.

Van der Hammen, T., Hooghiemstra, H., 1997. Chronostratigraphy and correlation of Pliocene and Quaternary of Colombia. Quaternary International 40, 81–91.

Van der Hammen, T., Werner, J.H., Van Dommelen, H., 1973. Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota. Review of Palaeobotany and Palynology 16, 1 – 122

Yokota, K. and Konno, M. (1985) “Comparison of soil constants obtained from laboratory tests and in situ tests”. Proceedings of the Symposium on Evaluation of Deformation and Strength of Sandy Grounds, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 111-140.