

CLASIFICADO



**ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.**

GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias



Certificado
GP 137-1



Certificado
SC 6593-1



Certificado
CO-SC 6593-1

**PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SEÑALES DE LA
RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ 2009 A 2011**

INFORME DE FINAL

ORIGINAL

ÁREA TÉCNICA Y DE GESTIÓN

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

GRUPO DE ESCENARIO DE DAÑOS

DICIEMBRE DE 2011

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



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

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

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

GUILLERMO ESCOBAR CASTRO
Director

DARWIN JAVIER ORTIZ
Subdirector Área Técnica y de Gestión

LINDON LOSADA
Coordinación de Investigación y Desarrollo

Coordinación del estudio
FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA
Responsable de Escenarios de Daños

Profesionales participantes
GERARDO ALONSO RODRÍGUEZ
FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA
JUAN CARLOS PADILLA

RESUMEN

La Coordinación de Investigación y Desarrollo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), tiene a cargo adelantar diferentes actividades para la Gestión Integral del Riesgo, específicamente en la componente de identificación del Riesgo se realizan estudios técnicos que mejoren nuestro conocimiento frente a las amenazas naturales y antrópicas no intencionales. En esta línea de trabajo, el grupo de escenario de daños ha desarrollado el estudio de procesamiento e interpretación de señales de la red de acelerógrafos de Bogotá 2009 a 2011, dado lo anterior y teniendo en cuenta que desde el año 2007 la Coordinación de Investigación y Desarrollo tiene a su cargo la operación, mantenimiento e interpretación de señales registradas por la RAB, se realiza el presente estudio, dando continuidad a las actividades desarrolladas en el año 2008 en esta misma línea de trabajo y ampliando el cubrimiento en la temática de modelación de la respuesta sísmica.

El presente estudio recopila y analiza la información obtenida a través del monitoreo sísmico que se realiza mediante la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB desde el año 2009 hasta diciembre de 2011, el cual comprende la descripción actual del funcionamiento de la RAB, el inventario, procesamiento, interpretación, análisis de los eventos registrados, la caracterización geotécnica, la realización de modelos de respuesta sísmica 1D y 2D de los sitios donde se encuentran localizadas las estaciones y la calibración de las propiedades dinámicas del depósito. Este estudio brinda criterios adicionales para la modelación de la respuesta sísmica de los depósitos y la zonificación de respuesta sísmica de la ciudad.

CONTENIDO

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SEÑALES DE LA.....	i
RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ 2009 A 2011	i
INFORME DE FINAL	i
ORIGINAL	i
ÁREA TÉCNICA Y DE GESTIÓN.....	i
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	i
GRUPO DE ESCENARIO DE DAÑOS	i
DICIEMBRE DE 2011	i
FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS.....	ii
RESUMEN	iii
CONTENIDO.....	iv
FIGURAS.....	vii
TABLAS.....	xii
GLOSARIO.....	xiv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES	3
1.4 MARCO LÓGICO DE ACTIVIDADES	3
1.4.1 Operación.....	3
1.4.2 Interpretación de señales	4
2 ACTUALIZACIÓN DE CATÁLOGOS DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ	5
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED	5
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES	7
2.3 EVENTOS REGISTRADOS	8

3	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	11
3.1	METODOLOGÍA.....	11
3.1.1	Estaciones de zona plana	11
3.1.2	Estaciones de cerro y piedemonte	12
3.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	12
3.3	PERFILES TÍPICOS ZONAS DE CERROS Y PIEDEMONTE	14
3.3.1	Estación Universidad de la Salle “CUSAL”	14
3.3.2	Estación Academia de Policía “CPSUB”	15
3.3.3	Estación Colonia Escolar de Usaquén “CUSAQ”	16
3.3.4	Estación Escuela de Caballería “CESCA”	17
3.3.5	Estación T.V. CABLE “CTVCA”	18
3.3.6	Estación Colegio San Bartolomé “CBART”	18
3.3.7	Estación Universidad Manuela Beltrán “CUNMA”	19
3.3.8	Estación Hospital San Juan de Dios “CDIOS”	20
3.3.9	Estación Bomberos Marichuela “CMARI”	21
3.3.10	Estación Colegio Sierra Morena “CSMOR”	22
3.3.11	Estación Tanques de Vitelma “CVITE”	22
3.3.12	Estación Gaviotas - Ingeominas “CBOG2”	23
3.4	PERFILES TÍPICOS DE LAS ZONAS LACUSTRE Y ALUVIAL.....	24
3.4.1	Estación Escuela Colombiana de Ingeniería “CEING”	24
3.4.2	Estación Universidad Corpas “CCORP”	25
3.4.3	Estación Uniagraria “CUAGR”	25
3.4.4	Estación Banco de la República “CBANC”	26
3.4.5	Estación Pta. Bombeo Fontibón “CFONT”	26
3.4.6	Estación Centro de Estudios del Niño “CNIÑO”	27
3.4.7	Estación Jardín Botánico “CJABO”	27
3.4.8	Estación Club el tiempo “CTIEM”	28
3.4.9	Estación Colegio Laureano Gómez “CLAGO”	28
3.4.10	Estación Avianca “CAVIA”	28
3.4.11	Estación INGEOMINAS “CBOG1”	29
3.4.12	Estación Reactor Nuclear - Ingeominas “CREAC”	29
3.4.13	Estación Colegio Fernando Mazuera “CBOSA”	30
3.4.14	Estación Parque Timiza “CTIMI”	31
3.4.15	Estación Parque el Tunal “CTUNA”	31
3.4.16	Estación Escuela de Tejedores “CTEJE”	31
3.4.17	Estación Escuela General Santander “CGRAL”	32
3.4.18	Estación Col Kennedy “CCKEN”	32
3.4.19	Estación CITEC “CCITE” – Bomberos Puente Aranda “CARAN”	33
3.5	SÍNTESIS	33
4	SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA MODELACIÓN	35
4.1	METODOLOGÍA.....	35
4.2	SISMO DE QUETAME	36
4.3	ESPECTROS DE RESPUESTA.....	37
4.3.1	Estaciones de cerros	37
4.3.2	Estaciones en depósitos de ladera.....	38
4.3.3	Estaciones en piedemontes	38
4.3.4	Estaciones de lacustre	39
4.3.5	Estaciones de lacustre - aluvial	41
4.3.6	Estaciones de aluvial.....	42

4.4	SÍNTESIS	43
5	MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL.....	45
5.1	METODOLOGÍA.....	45
5.2	ESTACIONES DE PIEDEMONTE	46
5.3	ESTACIONES LACUSTRE	46
5.4	ESTACIONES LACUSTRE ALUVIAL.....	47
5.5	ESTACIONES ALUVIAL.....	47
5.6	SÍNTESIS	68
6	MODELACIÓN BIDIMENSIONAL	70
6.1	METODOLOGÍA.....	71
6.2	SECCIÓN TÍPICA AL NORTE	72
6.2.1	Modelo numérico	72
6.2.2	Materiales y propiedades dinámicas	75
6.2.3	Resultados obtenidos	76
6.2.4	Comparación con los registros cercanos	81
6.3	SECCIÓN TÍPICA AL SUR.....	83
6.3.1	Modelo numérico	83
6.3.2	Materiales y propiedades dinámicas	85
6.3.3	Resultados obtenidos	87
6.3.4	Comparación con los registros cercanos	93
6.4	SÍNTESIS	94
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
8	REFERENCIAS.....	97

ANEXOS

ANEXO 1. CATALOGO DE EVENTOS SÍSMICOS

ANEXO 2. REGISTRO HISTÓRICO DE SISMOS

ANEXO 3. PERFIL GEOTÉCNICO TÍPICO ESTACIONES DE LA RAB

FIGURAS

Figura 1.1. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto.....	3
Figura 2.1. Localización de estaciones de la RAB.....	6
Figura 2.2. Número de estaciones que registraron cada evento sísmico.....	10
Figura 3.1. Fuentes de exploración geotécnica.....	13
Figura 3.2. Aspecto de ladera “CUSAL”.....	15
Figura 3.3. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CUSAL”.....	15
Figura 3.4. Aspecto de ladera “CPSUB”.....	16
Figura 3.5. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CPSUB”.....	16
Figura 3.6. Aspecto de ladera “CUSAQ”.....	17
Figura 3.7. Aspecto de ladera “CESCA”.....	17
Figura 3.8. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CESCA”.....	17
Figura 3.9. Aspecto de ladera “CTVCA”.....	18
Figura 3.10. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CTVCA”.....	18
Figura 3.11. Aspecto de ladera “CBART”.....	19
Figura 3.12. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CBART”.....	19
Figura 3.13. Aspecto de ladera “CUNMA”.....	19
Figura 3.14. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CUNMA”.....	19
Figura 3.15. Aspecto de ladera “CDIOS”.....	20
Figura 3.16. Aspecto de ladera “CARTI”.....	21
Figura 3.17. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CARTI”.....	21
Figura 3.18. Aspecto de ladera “CMARI”.....	21
Figura 3.19. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CMARI”.....	21
Figura 3.20. Aspecto de ladera “CSMOR”.....	22

Figura 3.21. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CSMOR”	22
Figura 3.22. Aspecto de ladera “CVITE”	23
Figura 3.23. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CVITE”	23
Figura 3.24. Aspecto de ladera “CBOG2”	23
Figura 3.25. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CBOG2”	23
Figura 4.1. Acelerograma evento Quetame estación Ingeominas CBOG1 en superficie “SH”	35
Figura 4.2. Espectros de de respuesta de aceleración elásticos CBOG1 en roca y superficie	36
Figura 4.3. Localización del epicentro y replicas del sismo de Quetame (Ingeominas, 2008)	36
Figura 4.4. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Sierra Morena	37
Figura 4.5 Espectro de respuesta de aceleraciones estación Vitelma	37
Figura 4.6. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colegio San Bartolomé	37
Figura 4.7. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela de Caballería	37
Figura 4.8. Espectro de respuesta de aceleraciones estación TVCABLE	38
Figura 4.9. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Bomberos Marichuela.	38
Figura 4.10. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad Manuela Beltrán	38
Figura 4.11. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad de la Salle.	39
Figura 4.12. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colonia Escolar de Usaquén.....	39
Figura 4.13. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Club Banco de la Republica.....	40
Figura 4.14. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela Colombiana de Ingeniería	40
Figura 4.15. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Uniagraria - Superficie	40
Figura 4.16. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Uniagraria - Roca	40
Figura 4.17. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Ingeominas - Superficie	40
Figura 4.18. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Ingeominas - Roca	40
Figura 4.19. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad Corpas.....	41
Figura 4.20. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Jardín Botánico	41
Figura 4.21. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Centro de Estudios del Niño	41

Figura 4.22. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Avianca	41
Figura 4.23. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Parque la Florida.....	41
Figura 4.24. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Club El Tiempo.....	41
Figura 4.25. Espectro de respuesta de aceleraciones estación CITEC	42
Figura 4.26. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Planta de Bombeo Fontibón.....	42
Figura 4.27. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Tunal	42
Figura 4.28. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colegio Fernando Mazuera.....	42
Figura 4.29. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Parque Timiza	43
Figura 4.30. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela Tejedores	43
Figura 4.31. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela General Santander - Superficie.....	43
Figura 4.32. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela General Santander - Roca	43
Figura 4.33. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Col. Kennedy.....	43
Figura 5.1. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CUSAL”	48
Figura 5.2. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CUSAQ”.....	49
Figura 5.3. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CBANC”	50
Figura 5.4. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CEING”	51
Figura 5.5. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CUAGR”	52
Figura 5.6. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CBOG1”	53
Figura 5.7. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CCORP”	54
Figura 5.8. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CJABO”	55
Figura 5.9. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CNINO”.....	56
Figura 5.10. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CAVIA”	57
Figura 5.11. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CFLOD”	58
Figura 5.12. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CTIEM”	59
Figura 5.13. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CCITE”.....	60
Figura 5.14. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CFONT”	61

Figura 5.15. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CTUNA”	62
Figura 5.16. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CBOSA”	63
Figura 5.17. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CTIMI”	64
Figura 5.18. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CTEJE”	65
Figura 5.19. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CGRAL”	66
Figura 5.20. Modelo de respuesta 1D y resultados estación “CCKEN”	67
Figura 6.1. Localización de secciones de análisis en planta	71
Figura 6.2. Localización del modelo bidimensional al norte	73
Figura 6.3. Modelo bidimensional norte	74
Figura 6.4. Curvas dinámicas segmento occidental – modelo norte	75
Figura 6.5. Curvas dinámicas segmento central – modelo norte	76
Figura 6.6. Curvas dinámicas segmento oriental – modelo norte	76
Figura 6.7. Historia de aceleraciones – modelo norte	77
Figura 6.8. Espectros y relaciones espectrales – modelo norte	78
Figura 6.9. Aceleraciones máximas – modelo norte	80
Figura 6.10. Deformaciones máximas – modelo norte	81
Figura 6.11. Comparación respuesta medidas y modeladas – modelo norte	83
Figura 6.12. Localización del modelo bidimensional al sur	83
Figura 6.13. Modelo bidimensional sur	84
Figura 6.14. Curvas dinámicas terraza baja segmento oriental – modelo sur	85
Figura 6.15. Curvas dinámicas segmento oriental complejo de conos – modelo sur	86
Figura 6.16. Curvas dinámicas segmento occidental complejo de conos – modelo sur	86
Figura 6.17. Curvas dinámicas segmento occidental llanura inundación – modelo sur	87
Figura 6.18. Historia de aceleraciones – modelo sur	88
Figura 6.19. Espectros y relaciones espectrales – modelo sur	89
Figura 6.20. Aceleraciones máximas – modelo sur	91

Figura 6.21. Deformaciones máximas – modelo sur	92
Figura 6.22. Comparación respuesta medidas y modeladas – modelo sur	94

TABLAS

Tabla 2.1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos.....	8
Tabla 2.2. Eventos registrados por la RAB.....	9
Tabla 3.1. Estaciones de la RAB en zona de cerros y piedemonte.....	14
Tabla 3.2. Perfil típico “CUSAL”.....	14
Tabla 3.3. Perfil típico “CPSUB”.....	15
Tabla 3.4. Perfil típico “CUSAQ”.....	16
Tabla 3.5. Perfil típico “CESCA”.....	17
Tabla 3.6. Perfil típico “CTVCA”.....	18
Tabla 3.7. Perfil típico “CBART”.....	18
Tabla 3.8. Perfil típico “CUNMA”.....	19
Tabla 3.9. Perfil típico “CDIOS”.....	20
Tabla 3.10. Perfil típico “CARTI”.....	20
Tabla 3.11. Perfil típico “CMARI”.....	21
Tabla 3.12. Perfil típico “CSMOR”.....	22
Tabla 3.13. Perfil típico “CVITE”.....	22
Tabla 3.14. Perfil típico “CBOG2”.....	23
Tabla 3.15. Estaciones de la RAB en zona lacustre.....	24
Tabla 3.16. Perfil típico “CEING”.....	24
Tabla 3.17. Perfil típico “CCORP”.....	25
Tabla 3.18. Perfil típico “CUAGR”.....	25
Tabla 3.19. Perfil típico “CBANC”.....	26
Tabla 3.20. Perfil típico “CFLOD”.....	26
Tabla 3.21. Perfil típico “CFONT”.....	27

Tabla 3.22. Perfil típico “CNIÑO”	27
Tabla 3.23. Perfil típico “CJABO”	27
Tabla 3.24. Perfil típico “CTIEM”	28
Tabla 3.25. Perfil típico “CLAGO”	28
Tabla 3.26. Perfil típico “CAVIA”	29
Tabla 3.27. Perfil típico “CBOG1”	29
Tabla 3.28. Perfil típico “CREAC”	30
Tabla 3.29. Estaciones de la RAB en zona aluvial	30
Tabla 3.30. Perfil típico “CBOSA”	30
Tabla 3.31. Perfil típico “CTIMI”	31
Tabla 3.32. Perfil típico “CTUNA”	31
Tabla 3.33. Perfil típico “CTEJE”	32
Tabla 3.34. Perfil típico “CGRAL”	32
Tabla 3.35. Perfil típico “CCKEN”	32
Tabla 3.36. Perfil típico “CCITE”	33
Tabla 5.1. Resumen de resultados	68
Tabla 6.1. Resumen de materiales segmento occidental - modelo norte	75
Tabla 6.2. Resumen de materiales segmento central - modelo norte	75
Tabla 6.3. Resumen de materiales segmento oriental - modelo norte	76
Tabla 6.4. Resumen de materiales rocosos - modelo norte	76
Tabla 6.5. Resumen de materiales segmento oriental - modelo sur	85
Tabla 6.6. Resumen de materiales segmento oriental complejo de conos - modelo sur	86
Tabla 6.7. Resumen de materiales segmento occidental complejo de conos - modelo sur	86
Tabla 6.8. Resumen de materiales segmento occidental llanura de inundación - modelo sur	87
Tabla 6.9. Resumen de materiales rocosos - modelo sur	87

GLOSARIO

Acelerógrafo: Instrumento que permite registrar las aceleraciones a que se ve sometido el terreno durante la ocurrencia de un sismo. Este registro queda consignado en un acelerograma. (AIS, 2009)

Acelerograma: Descripción en el tiempo de las aceleraciones a que estuvo sometido el terreno durante la ocurrencia de un sismo real. (AIS, 2009)

Amenaza sísmica: Fenómeno físico asociado con un sismo, tal como el movimiento fuerte del terreno o la falla del mismo, que tiene el potencial de producir una pérdida.

Amortiguamiento: Capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía.

Basamento Rocoso: Espacio donde se encuentran las formaciones de roca, entendiendo como roca al material de velocidad de onda de corte superior a 750 m/s.

Caracterización geotécnica: conjunto de actividades encaminadas a identificar la distribución de materiales en profundidad y a evaluar los parámetros de estado, propiedades geomecánicas y dinámicas de los materiales que componen el depósito de suelos.

Efectos locales: corresponde a la modificación de la señal sísmica de entrada en roca debida a la influencia de las condiciones geológicas, topográficas y del depósito de suelo, que se manifiesta como una variación en la amplitud, duración y contenido frecuencial de la señal.

Elementos finitos: Método numérico planteado para aproximar las soluciones de ecuaciones diferenciales parciales de tal forma que se puedan representar problemas físicos con geometrías complicadas, haciendo para ello una discretización del dominio del problema y empleando para ello principios del cálculo variacional (energía elástica mínima).

Espectro de respuesta: Respuesta máxima a un acelerograma de un grupo de sistemas amortiguados de un solo grado de libertad, que se gráfica en función del período o de la frecuencia natural no amortiguada del sistema. (AIS, 2009)

Ley de Snell: consiste en una formulación sencilla que relaciona el ángulo de incidencia y refracción de una onda al cambiar de medio de propagación.

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

Modelo unidimensional: representación del mecanismo de propagación de ondas sísmicas en una dimensión.

Modelo Bidimensional: representación del mecanismo de propagación de ondas sísmicas en dos dimensiones.

Movimiento libre amortiguado: hace referencia a un sistema con movimiento oscilatorio amortiguado, el cual presenta una reducción de energía ocasionada por fuerzas de disipación, que provocan un retardo en el movimiento, lo cual se traduce en una pérdida de energía en el tiempo y por consiguiente en una reducción en la amplitud del movimiento.

Movimiento forzado: hace referencia a un sistema con movimiento oscilatorio amortiguado, al cual se le aplica una fuerza externa que modifica la energía y por consiguiente genera un trabajo positivo sobre el sistema, lo cual se traduce en una modificación en la amplitud del movimiento.

Ondas de cuerpo: tipo de ondas que se propagan al interior de la tierra, pueden ser primarias (P) o secundarias (S).

Ondas primarias (P): son ondas longitudinales, lo cual significa que el medio por el cual se propagan es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas viajan a una velocidad mayor que la velocidad de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. La naturaleza del movimiento de las partículas del medio de propagación hace que estas se desplacen más rápido que otro tipo de onda.

Ondas secundarias (S): son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el medio de propagación es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte.

Ondas de superficie: es una onda mecánica que se propaga a lo largo de la relación entre dos medios diferentes, que para el caso de sismología corresponde a la superficie terrestre y el aire. Se distinguen dos tipos de ondas de superficie, las ondas Rayleigh y las ondas Love.

Ondas Rayleigh: Onda superficial que se mueve en forma retrógrada y elíptica. Son ondas con velocidad muy baja y se sienten como un movimiento ondulado o rodante.

Propiedades dinámicas: consiste en la valoración de la degradación de la rigidez y la variación del amortiguamiento de los suelos en relación a los cambios en el nivel de deformaciones impuestas ante cargas cíclicas, bajo el enfoque de un modelo histerético de disipación de energía.

Reflexión de ondas: corresponde al proceso físico por el cual una onda es reflejada cuando hay un cambio en el medio transmisor.

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

Retro análisis: corresponde a un análisis retrospectivo realizado en un sistema, con el propósito de identificar las propiedades que rigen su comportamiento, partiendo para ello del conocimiento parcial o total de las entradas, salidas y de un modelo que represente el sistema.

Riesgo sísmico: Probabilidad de que una pérdida específica iguale o exceda un valor predeterminado durante un tiempo de exposición dado.

Sismo/Terremoto: Vibración de la corteza terrestre causada por la liberación abrupta de energía acumulada en la litosfera de la tierra. El movimiento causado por el sismo puede variar desde un movimiento violento en algunos lugares hasta un movimiento imperceptible en otros. (AIS, 2009)

Ventana de tiempo: consiste en el análisis separado de una señal por intervalos de tiempo definidos a partir de las características del movimiento presente en el sistema.

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá está localizada en un ambiente sismotectónico que demuestra desde el punto de vista geológico, actividad sísmica reciente; por otra parte, según los datos históricos, en los últimos quinientos años la sismicidad en Bogotá y su área cercana ha sido importante. En la capital, tres sismos han causado daños importantes a la ciudad (1785, 1827, 1917) alcanzando intensidades de VIII, y cuatro han causado daños menores (1743, 1826, 1923, 1967) con intensidad VI y VII.

Con conocimiento de este hecho, Bogotá viene adelantando desde hace varios años diversas actividades en torno a la gestión integral del riesgo sísmico del área urbana de la ciudad, es así como a partir de la recomendación hecha en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá en el año 1997 y teniendo en cuenta las dificultades en la evaluación del comportamiento de las rocas y suelos de la ciudad frente a las ondas sísmicas por la falta de información, el Fondo de Prevención y Atención a Emergencias - FOPAE inició los trámites correspondientes para la implementación de la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB.

A partir de los datos que registran los acelerógrafos se puede estudiar lo ocurrido después de un evento sísmico bajo dos enfoques: uno es la variación en superficie de las aceleraciones máximas registradas (mapa de isoaceleraciones), el cual es muy útil para zonificar respuesta sísmica de la ciudad; por otro lado, los registros nos sirven para estudiar el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad, esto permite calibrar en alguna medida los modelos de respuesta. Todo lo anterior es aplicado a la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de cara a mejorar las normas de sismo-resistencia de las edificaciones, además los análisis de los registros pueden mostrar la distribución de la respuesta sísmica. Lo anterior, sumado al análisis del comportamiento de las edificaciones y sus afectaciones, podrá ser útil para mejorar las hipótesis y modelos que se emplean en los escenarios de daño por terremoto.

Con el fin llevar a cabo el procesamiento y la interpretación de señales de la RAB durante el periodo comprendido entre 2009 y 2011, el presente documento describe las actividades realizadas para el manejo de señales, revisión de la respuesta en cada estación de la red, caracterización de cada una de las zonas en las cuales se encuentran las estaciones de la red con información disponible, calibración de la respuesta en cada una de las estaciones mediante modelos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) con base en los registros recopilados por cada una de las estaciones de la red durante el sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008.

1.1 ANTECEDENTES

Teniendo en cuenta que la ciudad de Bogotá se encuentra en un ambiente sismotectónico de actividad reciente, en septiembre de 1992 La Oficina para la Prevención y Atención de Emergencias - OPES hoy FOPAE, presentó al Concejo Distrital el Plan Integral de Prevención y Atención de Desastres de Bogotá, en el cual se incluyó la realización del "Estudio de la Respuesta Sísmica del Subsuelo de Santafé de Bogotá y de los efectos de un terremoto sobre la Ciudad". Dicho Plan fue aprobado como parte integrante del Plan General de Desarrollo de la ciudad, mediante el Acuerdo 31 de 1992.

Posteriormente, en diciembre de 1993 se firmó un Convenio para el desarrollo del proyecto "Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá". El estudio de Microzonificación Sísmica consideró entre otros, el estudio de los efectos de un terremoto sobre la ciudad y de la respuesta sísmica del subsuelo de la misma, definiendo así parámetros de diseño estructural para las zonas definidas en el estudio. Dicho estudio concluye y recomendó que era necesario la

implementación de estaciones de registro, por lo que el FOPAE inició los trámites correspondientes para la implementación de la Red de Acelerógrafos de Bogotá – RAB.

La Red de Acelerógrafos de Bogotá fue instalada a partir de un Convenio Interadministrativo suscrito en junio de 1997 entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE, y el INGEOMINAS. Dentro del convenio se adquirieron e instalaron un total de 30 acelerógrafos digitales marca KINEMETRICS, los cuales fueron distribuidos en toda el área urbana de la ciudad para conformar así la Red de Acelerógrafos de Bogotá; de estos aparatos, 28 son modelo ETNA y los 2 restantes son modelo K2.

Posteriormente, en Convenio Interadministrativo suscrito en 2002 entre el FOPAE y la Universidad de los Andes se realizó el procesamiento e interpretación de los registros obtenidos por la RAB desde el año 1999 hasta el año 2001. Luego, en diciembre del año 2003 se suscribió entre el FOPAE y el INGEOMINAS un Convenio Interadministrativo con el fin de implementar el sistema telemétrico para la RAB, el cual facilitaría las labores de operación y mantenimiento de las estaciones.

Desde el año 2007 la Coordinación de Investigación y Desarrollo del FOPAE tiene a cargo la operación, mantenimiento e interpretación de señales registradas por la RAB. Por tal motivo en el año 2008, la DPAA (actual FOPAE) realizó el estudio Procesamiento e interpretación de señales de la red de acelerógrafos de Bogotá – RAB, donde se recomendó “realizar algunas modelaciones bidimensionales aplicando las propiedades dinámicas y modelos de comportamiento empleados en la calibración, para tener en cuenta los efectos topográficos, la forma del basamento rocoso y las ondas superficiales”.

Por otro lado el estudio de Actualización y sistematización de Escenario de Daños por Terremoto para Bogotá (FOPAE, 2010) recomendó “Continuar y fortalecer los sistemas de monitoreo de la amenaza sísmica, tanto a nivel nacional las redes de Acelerógrafos y Sismológicas como a nivel local la Red de Acelerógrafos de Bogotá”.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es realizar el procesamiento e interpretación de los eventos registrados por la RAB desde el año 2009 a diciembre de 2011 y modelar la respuesta sísmica unidimensional y bidimensional en los sitios de las estaciones a partir de los registros del sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos particulares de este estudio son los siguientes:

- Procesamiento y actualización de catálogos con los registros obtenidos entre el año 2009 a 2011.
- Caracterización geotécnica de los sitios donde se encuentran cada una de las estaciones de la RAB con base en la recopilación de información disponible en estudios geológicos o geotécnicos.
- Depuración de las señales registradas por la RAB del sismo de Quetame para ser empleadas en la modelación numérica de la respuesta sísmica.
- Elaboración de modelos de respuesta sísmica unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) para los sitios que cuenten con una buena caracterización geotécnica y señales del sismo de Quetame.

1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES

Dado el volumen de información la interpretación detallada de registros se realizará únicamente para los eventos sísmicos de mayor magnitud y con un mejor cubrimiento en la ciudad. La caracterización geotécnica de los sitios se realizará con base en información secundaria disponible, las modelaciones tendrán en cuenta curvas dinámicas, pesos unitarios, módulos, etc. según la bibliografía técnica reconocida.

1.4 MARCO LÓGICO DE ACTIVIDADES

Para concebir los objetivos propuestos se establece el diagrama metodológico ilustrado en la Figura 1.1, con el cual se busca dar un orden lógico a las actividades que se efectuaron en la ejecución del proyecto. A continuación se resumen las principales actividades.

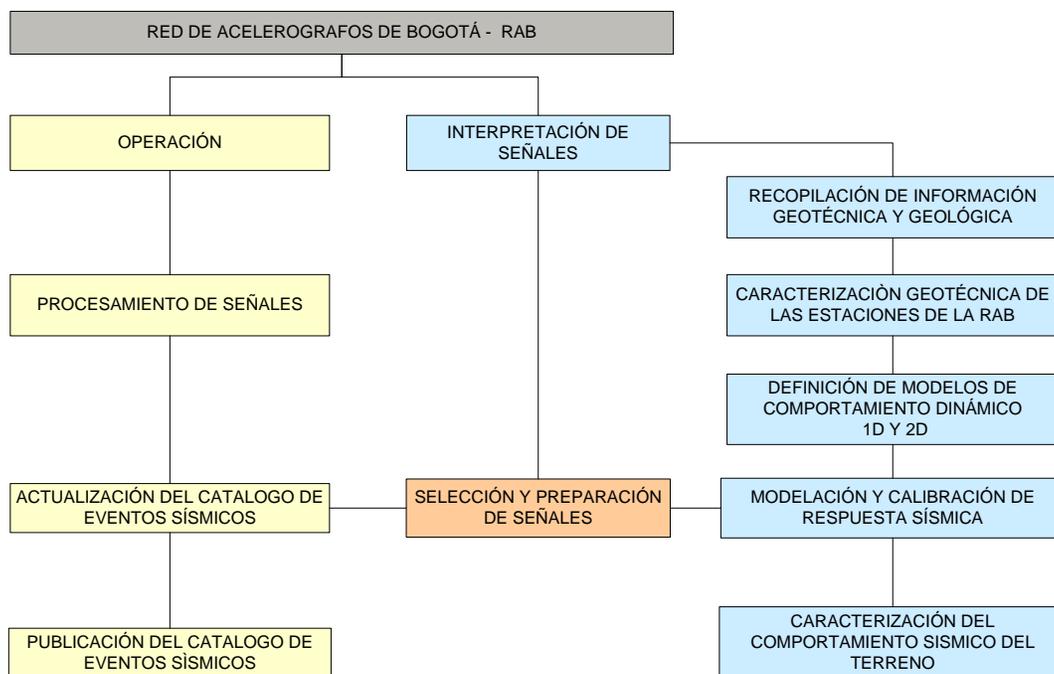


Figura 1.1. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto

1.4.1 Operación

Comprende las actividades en caminadas a garantizar el funcionamiento de la RAB, para lo cual se contemplan tres acciones:

Procesamiento de señales: debido a que los archivos digitales que se obtienen de las estaciones están en formato EVT, es necesario procesarlos mediante el uso de aplicaciones específicas para obtener las señales en archivos planos para posteriormente ser filtradas y corregidas por línea base las señales (archivos con extensión ACE).

Actualización del catálogo de eventos sísmicos: se incluye las señales procesadas en la ficha de registro histórico de sismos de cada estación, se realiza el cálculo de parámetros sísmicos y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Publicación del catálogo de eventos sísmicos: difundir los resultados de la RAB para que estén disponibles al público, con el propósito que la información pueda ser consultada e incorporada en investigaciones relacionadas con la temática.

1.4.2 Interpretación de señales

Esta actividad pretende analizar detalladamente el comportamiento dinámico del terreno en donde se localiza cada estación, con el fin de observar las formas espectrales, periodos de vibración, duración, aceleraciones máximas, para llevar a cabo esto se plantean cinco actividades básicas:

Recopilación de información: esta actividad busca determinar la información útil para el desarrollo del proyecto en las temáticas de geología y geotecnia y su organización para facilitar la consulta.

Caracterización geotécnica: este proceso busca definir el perfil geotécnico típico hasta el basamento rocoso caracterizando las propiedades geotécnicas básicas, a partir de la información recopilada de los estudios desarrollados en la ciudad.

Definición de modelos de comportamiento: busca identificar los modelos del terreno 1D y 2D a partir de las propiedades dinámicas de los materiales que componen el perfil geotécnico caracterizado con anterioridad.

Modelación y calibración de la respuesta sísmica: A partir de las señales medidas en profundidad y superficie se procede a realizar modelaciones unidimensionales o bidimensionales de la respuesta de sitio con el fin de calibrar los modelos de respuesta y recalcular las propiedades dinámicas (retroanálisis).

Caracterización sísmica del terreno: con base en los resultados de los pasos anteriores se identifica los rangos de variación de las propiedades dinámicas y las características del terreno como periodos de vibración y formas espectrales entre otros, datos útiles para futuras modificaciones de la normativa de diseño y construcción de edificaciones.

CAPITULO 2

2 ACTUALIZACIÓN DE CATÁLOGOS DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ

La función principal de la RAB es registrar la historia de aceleraciones producidas en el terreno cuando se presentan sismos fuertes, es decir sismos de gran magnitud, estos registros nos brindan información acerca del comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad, con el fin de mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica para la ciudad y avanzar en los procesos de actualización de la normatividad existente.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED

La RAB fue instalada a partir de un Convenio Interadministrativo suscrito en 1997 entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE, y el Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. Dentro del convenio se adquirieron e instalaron un total de 30 acelerógrafos digitales marca KINEMATRICS, los cuales fueron distribuidos en toda el área urbana de la ciudad para conformar así la Red de Acelerógrafos de Bogotá; de estos aparatos, 28 son modelo ETNA y los 2 restantes son modelo K2, la diferencia entre estos equipos está en que los K2 tienen dos sensores, uno en superficie y otro a la profundidad de la roca (Down Hole) en cambio el tipo ETNA únicamente tiene un sensor en superficie. Estos equipos fueron instalados entre julio de 1998 y junio de 2000, La distribución de las estaciones puede verse en la **Figura 2.1**.

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

Desde el año 2007 el FOPAE ha realizado algunas modificaciones en la operación y mantenimiento de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, dentro de las que se destacan:

- Retiro de la estación “CCITE” localizada en el predio de los laboratorios de la Universidad de los Andes y relocalizada en el predio de la estación de Bomberos Puente Aranda bajo el identificador “CARAN” (ver Figura 2.1).
- Retiro de la estación “CAVIA” localizada en el predio de la antigua sede administrativa de AVIANCA y relocalizada en el predio de la empresa CARVAJAL S:A. bajo el identificador “CCARV” (ver Figura 2.1).
- La actualización del sistema telemétrico a tenido variadas modificaciones dentro de las que se encuentran, la implementación de desarrollos informáticos en los acelerógrafos y radios de comunicación encaminados a que el enlace y transmisión de la información sea más rápida y eficaz, también se implementó el uso de zonas de comunicación (sur , norte y centro) así como de repetidoras exclusivas para cada zona y enlaces con las estaciones por medio de estos únicos puntos de conexión, que en caso de falla no saca la red de servicio en su totalidad, adicionalmente se implementó el uso de dos frecuencias de comunicación, de manera que se transmita únicamente la información necesaria, además se centralizó el control exclusivo en la base de tal forma que esta controla el llamado a las repetidoras y estas a su vez controlan las comunicaciones con las estaciones de campo minimizando errores de conexión y transmisión. Finalmente la adecuación y mejoramiento del software de recepción y control para la descarga

de la red de campo con lo que se mejora la recepción de los datos la cual pasó de semanas o meses a unos días o horas en la actualidad. Para el futuro es necesario mejorar aun más la velocidad de descarga con la actualización del software de recepción en FOPAE y ampliar tanto nuestras zonas de operación como la cantidad de estaciones de la red RAB; también es necesario explorar nuevos sistemas de comunicación alternativos y equipos de última tecnología que nos permitan estar a la vanguardia y tener una mayor efectividad que la que se tiene con la red de comunicaciones actual.

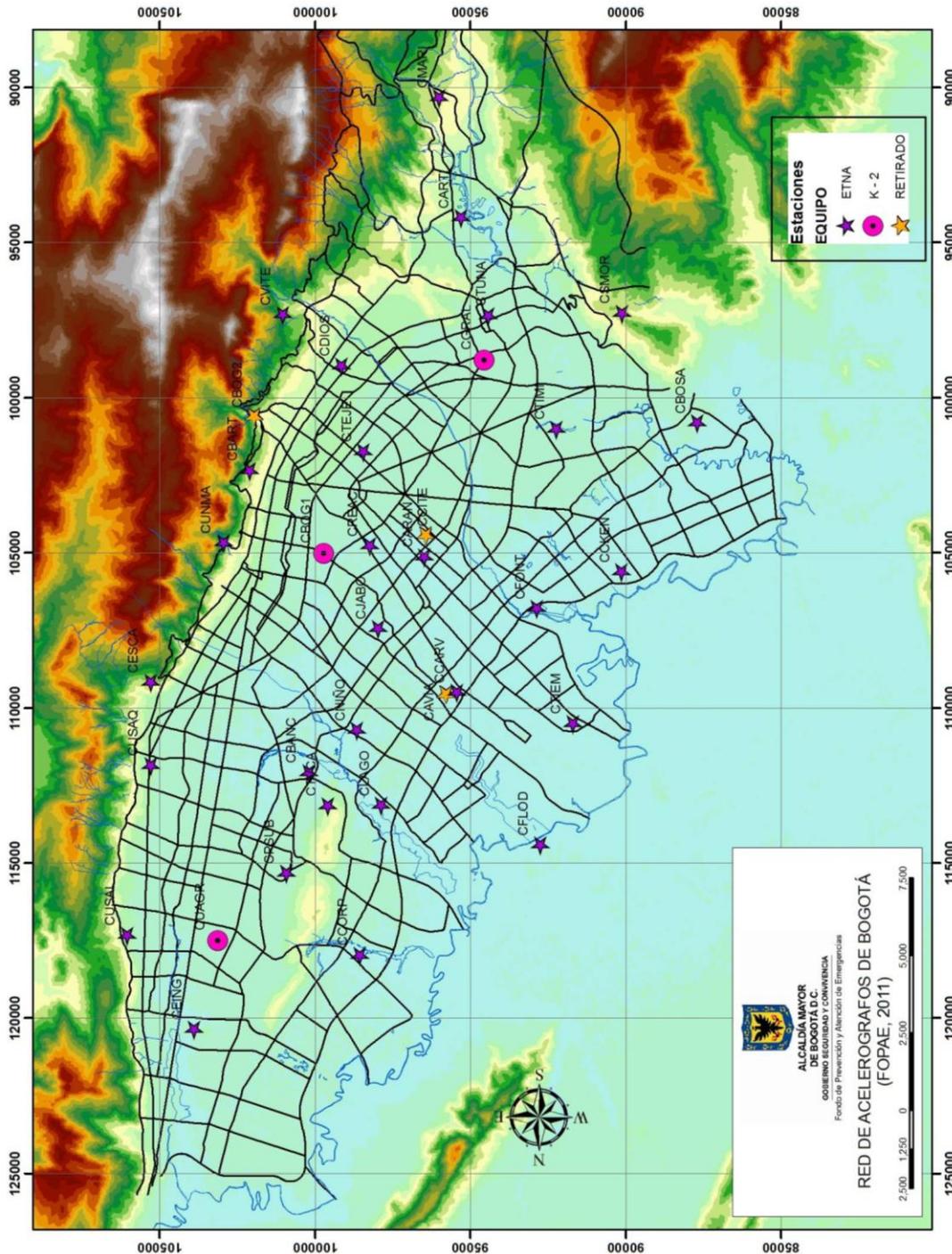


Figura 2.1. Localización de estaciones de la RAB

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES

La RAB cuenta con acelerógrafos de la marca KINEMETRICS tipo ETNA y K-2 tienen cada uno dos puertos de salida que pueden ser habilitados para comunicaciones remotas: Una interfase RS-232 la cual permite utilizar telemetría en tiempo real (recuperación remota) y el establecimiento de parámetros de respuesta del equipo (set-up), y un modem PCMCIA para acceso remoto que cumple con las mismas funciones mencionadas para el puerto RS-232. En la **Tabla 2.1** se resumen la localización de cada estación y sus características principales.

No.	COD	NOMBRE	DIRECCION	LAT. N	LONG. E	EQUIPO	GEOLOGIA	ESTADO
1	CEING	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA	Avenida 13 No. 205-59	4.7835	-74.0459	ETNA	SUELO	Activa
2	CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	Carrera 7 No. 172 - 85	4.7558	-74.0266	ETNA	SUELO	Activa
3	CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	Calle 68 A Sur No 80 H -05	4.6065	-74.1921	ETNA	SUELO	Activa
4	CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	Av. Corpas, Km. 3, Vía Suba	4.7619	-74.0937	ETNA	SUELO	Activa
5	CUAGR	UNIAGRARIA	Calle 170 No. 50-90	4.7541	-74.0527	K - 2	SUELO/ ROCA	Activa
6	CPSUB	ACADEMIA DE POLICIA	Av. Boyacá No 142 A - 55	4.7378	-74.0725	ETNA	ROCA	Activa
7	CUSAQ	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	Calle 127 No. 12 A - 20	4.7064	-74.0334	ETNA	SUELO	Activa
8	CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	Carrera 7 No 106 - 00	4.6821	-74.0337	ETNA	SUELO	Activa
9	CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	Carrera 57 No 120-01	4.7085	-74.0789	ETNA	SUELO	Activa
10	CTVCA	T.V. CABLE	Diagonal 120 No.86-75 (Cerro Suba, Altos de Sotileza Km.2)	4.7179	-74.0847	ETNA	ROCA	Activa
11	CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	Km. 3, vía Engativa- Cota	4.7297	-74.1464	ETNA	SUELO	Activa
12	CFONT	PLANTA DE BOMBEO FONTIBON	Carrera 96 No. 10-00 (Rio Fucha)	4.6608	-74.1456	ETNA	SUELO	Activa
13	CNIÑO	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO	Carrera 76 No 79-40	4.6959	-74.093	ETNA	SUELO	Activa
14	CJABO	JARDÍN BOTANICO	Av. Calle 63 No. 68-95	4.6664	-74.0993	ETNA	SUELO	Activa
15	CBART	COLEGIO SAN BARTOLOME	Carrera 5 No. 34-00	4.6199	-74.0619	ETNA	ROCA	Activa
16	CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	Av. Circunvalar No 60-00.	4.6416	-74.0539	ETNA	SUELO	Activa
17	CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Carrera 10 No. 0-50	4.59	-74.0884	ETNA	SUELO	Activa
18	CTIEM	CLUB EL TIEMPO	Calle 32 No. 125-01	4.6943	-74.1559	ETNA	SUELO	Activa
19	CTIMI	PARQUE TIMIZA	Diagonal 42 Sur No. 62-67	4.6083	-74.151	ETNA	SUELO	Activa
20	CTUNA	PARQUE TUNAL	Calle 48 Sur - Av. El tunal Calle 48 B sir No. 22 A - 70	4.5752	-74.1311	ETNA	SUELO	Activa
21	CARTI	ESCUELA DE ARTILLERIA	Av. Caracas Km. 3, vía Usme - Al Frente de la Picota	4.5469	-74.1234	ETNA	SUELO	Activa
22	CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	Carrera 1A No 76A-00 Bis sur	4.512	-74.117	ETNA	SUELO	Activa
23	CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	Calle 77A Sur 65-15 Sierra Morena	4.5745	-74.17	ETNA	ROCA	Activa
24	CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	Carrera 32 No 12-55	4.6147	-74.0949	ETNA	SUELO	Activa
25	CVITE	TANQUES DE VITELMA	Av. Circunvalar con Calle 9 sur. Calle 9 Sur No. 9-00 Este	4.5752	-74.0717	ETNA	SUELO	Activa
26	CLAGO	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	Calle 90 A No 95 D -56	4.7177	-74.1002	ETNA	SUELO	Activa
27	CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	Calle 44 Sur 45A-15	4.5879	-74.1301	K - 2	SUELO/ROC A	Activa
28	CCKEN	COL-KENNEDY	Calle 38 Sur No 94 C -29 Cile 38C Sur No 107 C-29	4.6458	-74.1723	ETNA	SUELO	Activa

No.	COD	NOMBRE	DIRECCION	LAT. N	LONG. E	EQUIPO	GEOLOGIA	ESTADO
29	CARAN	BOMBEROS PUENTE ARANDA	Calle 20 No. 68 A - 06	4.6456	-74.1128	ETNA	SUELO	Activa (Instalada 11/05/2010)
30	CCARV	CARVAJAL S.A.	AC 26 No. 90 - 10	4.6823	-74.1188	ETNA	SUELO	Activa (Instalada 25/05/2011)
*	CCITE	CITEC	Carrera 65 B No. 17 A - 11	4.6394	-74.1139	ETNA	SUELO	Retirada (31/07/2008)
*	CAVIA	AVIANCA	Av. el Dorado No.92-30	4.6854	-74.1188	ETNA	SUELO	Retirada (16/02/2009)

Tabla 2.1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos

2.3 EVENTOS REGISTRADOS

Una vez recibida la información en la estación maestra se procede a verificar si el registro corresponde efectivamente a un sismo o se trata de ruido, para lo cual se acude al catálogo de eventos sísmicos que está publicado en la página web de INGEOMINAS, de donde se obtienen los datos del evento y se asigna a cada señal. En la **Tabla 2.2** se presenta el resumen de eventos registrados por las estaciones de la RAB a la fecha y en la **Figura 2.2** se ilustra el número de estaciones que registraron cada evento sísmico, es importante mencionar que las estaciones con un mayor número de eventos son aquellas que cuentan con sensores en profundidad (CUAGR y CGRAL), puesto que el nivel de activación del sensor es muy bajo, a diferencia de las estaciones ubicadas en superficie que tienen un nivel de disparo alto por el ruido ambiental del sitio, lo cual se debe hacer de este modo para no saturar de ruido la memoria, para que en el momento de ocurrir un evento sísmico importante esté disponible para su registro en la base de datos.

Como se observa en la Figura 2.2 los eventos con mayor cubrimiento fueron el sismo de Betulia Santander del 8 de noviembre de 1999, el sismo de Quetame Cundinamarca del 24 de mayo de 2008 y el sismo de Ortega Tolima del 29 de julio de 2010 con 16, 26 y 11 estaciones respectivamente.

A partir de la información procesada se compiló por cada año el catálogo de eventos registrados, el cual se presenta en el Anexo 1. En general cada hoja del catálogo presenta los datos generales del evento sísmico, las características de la estación de registro, los principales parámetros sísmicos de la señal analizada, las historias y espectros de aceleración velocidad y desplazamiento y el espectro de Amplitudes de Fourier, esto para cada componente del registro (EO, V y NS). De este modo se tienen tres hojas por cada registro en una estación tipo ETNA (superficie) y seis hojas para las estaciones tipo K2 (superficie y profundidad).

De manera complementaria al catálogo de eventos se actualizaron las fichas de registro histórico de eventos medidos en cada estación de la RAB con el fin de poder comparar de manera rápida todos los eventos registrados en un sitio determinado. Se representaron en términos de espectros de respuesta de aceleración, velocidad y espectros de respuesta normalizados por la aceleración máxima de la señal, en el Anexo 2 se compilan las fichas de cada estación.

No	Fecha D/M/A	Hora UT	Sismo	Magnitud (ML)	Prof. (km)	Coordenadas del Epicentro		Estaciones que registraron
						Lat. N	Long. E	
1	25-ene-99	18:19	Córdoba (Quin.)	6.2	Sup.	4.44	-75.71	CBART
2	25-ene-99	22:04	Córdoba (Quin.)	5.4	Sup.	4.41	-75.73	CBART
3	14-abr-99	07:26	Nido de Bucaramanga (Sant.)	6.1	170	6.82	-73.14	CBART
4	01-jun-99	21:42	Guayabetal (Cund.)	5.2	Sup.	4.29	-73.73	CEING, CBART
5	10-jun-99	03:22	Quetame (Cund.)	4.7	Sup.	4.31	-73.79	CBART

No	Fecha D/M/A	Hora UT	Sismo	Magnitud (ML)	Prof. (km)	Coordenadas del Epicentro		Estaciones que registraron
						Lat. N	Long. E	
6	17-jul-99	12:23	Sativasur (Boya.)	5.6	Sup.	6.10	-72.74	CEING, CUSAL, CCORP, CPSUB, CAVIA, CBART
7	08-nov-99	05:52	Betulia (Sant.)	6.5	160	6.92	-73.18	CEING, CUSAL, CCORP, CUAGR, CPSUB, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CBART, CDIOS, CTUNA, CARTI, CVITE, CGRAL, CRADI
8	05-feb-00	21:53	Nido de Bucaramanga (Sant.)	6	160	6.77	-73.21	CUAGR, CTVCA
9	12-sep-00	10:55	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.9	160	6.76	-73.18	CUAGR, CBART
10	08-nov-00	07:01	Juradó (Choc.)	6.4	Sup.	7.13	-77.94	CUAGR, CFLOD
11	24-nov-00	19:51	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.7	160	6.79	-73.02	CUAGR, CTVCA
12	17-dic-00	06:14	Nido de Bucaramanga (Sant.)	5.8	153	6.77	-72.97	CEING, CBART, CUAGR, CPSUB, CUSAQ, CTVCA, CLAGO
13	03-may-01	16:14	Los Santos (Sant.)	5.3	159	6.83	-73.06	CUAGR
14	18-may-01	15:04	Los Santos (Sant.)	5.5	159	6.82	-73.07	CBART, CTVCA, CUAGR
15	22-sep-01	03:23	Tuluá (Valle)	6.1	180	3.99	-76.09	CUAGR, CBART, CGRAL, CTVCA
16	19-nov-01	21:01	Cepitá (Sant.)	6.8	163	6.80	-72.97	CEING, CUAGR, CGRAL, CPSUB
17	12-may-02	06:23	Los Santos (Sant.)	5.2	164	6.85	-73.06	CUAGR
18	12-jul-02	18:08	Cepitá (Sant.)	5.3	174	6.84	-73.03	CUAGR
19	23-nov-02	23:56	La Uribe (Meta)	5.6	Sup.	3.31	-74.41	CAVIA, CUAGR, CUSAQ
20	22-ene-03	15:55	Colombia (Huil.)	5.2	Sup.	3.58	-74.54	CAVIA, CUAGR
21	03-oct-04	08:30	Los Santos (Sant.)	5.6	158	6.84	-73.04	CUAGR, CGRAL
22	15-nov-04	09:06	Océano Pacífico	6.7	24	4.81	-77.79	CUAGR, CEING
23	25-feb-05	06:41	Los Santos (Sant.)	5.8	153	6.78	-73.17	CUAGR
24	21-abr-05	03:39	Tadó (Choc.)	5.3	88	5.19	-76.39	CUAGR
25	26-sep-05	01:55	Perú (Mw)	7.5	132	-5.61	-76.37	CUAGR
26	06-may-07	04:47	Betulia (Sant.)	6	136	6.88	-73.26	CUSAL, CBANC
27	17-feb-08	21:16	Los Santos (Sant.)	5.6	143	6.84	-73.06	CUAGR, CGRAL
28	25-mar-08	07:38	Guaduas (Cund.)	4.7	Sup.	5.06	-74.72	CUAGR, CGRAL
29	28-mar-08	16:36	Zapatoca (Sant.)	5.3	135	6.88	-73.20	CUAGR
30	24-may-08	19:20	Quetame (Cund.)	5.7	Sup.	4.40	-73.81	CEING, CUSAL, CBOSA, CCORP, CUAGR, CUSAQ, CESCA, CBANC, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CNIÑO, CJABO, CBART, CUNMA, CCITE, CTIEM, CTIMI, CTUNA, CMARI, CSMOR, CTEJE, CVITE, CGRAL, CCKEN
31	24-may-08	19:23	Quetame (Cund.)	4.5	Sup.	4.42	-73.83	CUAGR, CMARI, CBART
32	24-may-08	20:08	Quetame (Cund.)	4.4	Sup.	4.41	-73.76	CMARI
33	24-may-08	20:21	Quetame (Cund.)	4.2	Sup.	4.37	-73.72	CGRAL
34	03-jul-09	10:04	Chaparral (Toli.)	5.0	Sup.	3.68	-75.63	CGRAL
35	12-sep-09	20:06	Venezuela	Mw: 6,3	Sup.	10.76	-67.85	CGRAL * Sismo Regional
36	27-oct-09	16:25	Los Santos (Sant.)	5.5	143.9	6.77	-73.04	CUAGR, CGRAL
37	29-jul-10	19:34	Ortega (Toli.)	5.4	Sup.	3.95	-75.19	CEING, CCORP, CUAGR, CUSAQ, CBANC, CBART, CUNMA, CTUNA, CMARI, CGRAL, CARAN

Nota: los eventos sísmicos superficiales corresponden a todos aquellos que se generan a una profundidad < 5 Km.

Tabla 2.2. Eventos registrados por la RAB

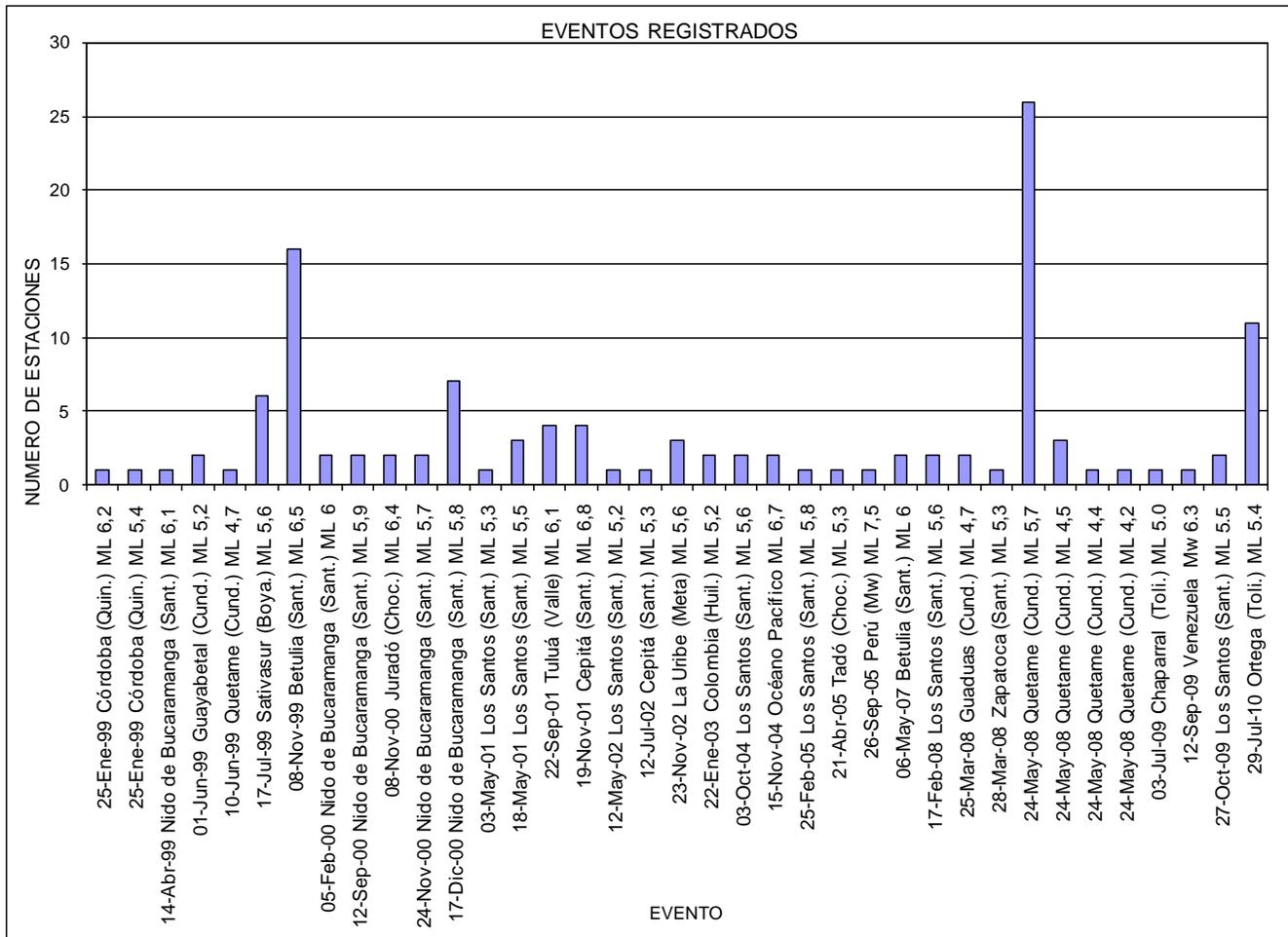


Figura 2.2. Número de estaciones que registraron cada evento sísmico

CAPITULO 3

3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Este capítulo presenta el conjunto de actividades realizadas para la caracterización del perfil geotécnico típico de las zonas en las cuales se encuentran localizadas cada una de las estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá. Esta tarea se efectúa con el propósito de identificar las características geotécnicas del depósito de suelo, para posteriormente determinar la influencia de estas en la respuesta dinámica del terreno.

3.1 METODOLOGÍA

El enfoque metodológico planteado para la caracterización del perfil geotécnico típico, subdivide las estaciones en dos grupos respecto a su localización topográfica, el primer grupo corresponde a las estaciones localizadas en la zona plana de la ciudad y el segundo grupo incluye aquellas ubicadas en las zonas de cerros y piedemonte.

Se debe anotar que para la realización de estas actividades únicamente se cuenta con información secundaria, circunstancia que puede ser sobrellevada con el número de estudios revisados y con la cercanía de esta información al punto de estudio, acciones encaminadas a reducir la incertidumbre en la determinación del perfil típico.

3.1.1 Estaciones de zona plana

El procedimiento para la determinación del perfil geotécnico de cada estación se describe en los siguientes pasos:

- Identificar la zona geológica, geotécnica y de respuesta sísmica en que se encuentra el área de estudio.
- Definir la profundidad del basamento rocoso.
- Identificar la información geotécnica relacionada aledaña al punto de estudio e incluirla en los análisis (en lo posible se debe incluir información que circunscriba el área de estudio).
- Graficar las principales propiedades índice en profundidad.
- Identificar la estratificación de la columna a partir de la descripción de los perfiles considerados en el análisis, el rango de valores y la variación de las propiedades índice de acuerdo al material en consideración y todo lo anterior en consonancia con la zona geológica-geotécnica del sitio de estudio.
- Complementar la columna estratigráfica hasta el contacto con el basamento rocoso, teniendo como base la información de las perforaciones profundas realizadas en la ciudad.
- Definir los rangos de variación de las propiedades índice para cada estrato, filtrar y operar los datos para la obtención de las propiedades promedio.
- Asignar las propiedades promedio a cada estrato y graficar el resultado en profundidad.

3.1.2 Estaciones de cerro y piedemonte

El procedimiento para la determinación del perfil geotécnico de cada estación se describe en los siguientes pasos:

- A partir del modelo digital del terreno se realiza el mapeo del aspecto de la ladera con el propósito de visualizar la dirección del buzamiento y en alguna medida las geoformas presentes.
- Efectuar secciones topográficas para identificar la geometría de la ladera y rasgos morfológicos como cambios de pendiente, acumulaciones de material o cicatrices de antiguos deslizamientos entre otros.
- Con los procesos anteriores se procede a marcar los contactos de las unidades geológicas de superficie en las secciones 2D y a partir de las descripciones litológicas y los rasgos morfológicos encontrados inferir el espesor y composición del depósito.
- Finalmente se realiza una visita de campo para verificar, refutar o ajustar las hipótesis planteadas anteriormente.

3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

El tratamiento de información para la obtención del perfil geotécnico típico, requirió de dos niveles de información, el primero concerniente a la información de exploración y caracterización geotécnica referente a proyectos de investigación y de desarrollo de infraestructura en la ciudad y el segundo corresponde a las coberturas de información geográficas disponibles para tal fin.

En relación con la información de exploración y caracterización geotécnica se incluyeron en este estudio cuatro diferentes fuentes relacionadas a continuación (ver Figura 3.1).

- Exploraciones del estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá "MZSB"
- Exploraciones para la línea del Metro suministradas por UNIANDES
- Exploraciones realizadas en los estudios de efectos locales.
- Exploraciones suministradas por la EAAB de su base de datos geotécnica "SISGEO"

Las coberturas de información geográficas empleadas para la caracterización de los perfiles en las temáticas de geología, geotecnia se mencionan a continuación.

- Zonificación geotécnica FOPAE 2010
- Zonificación respuesta sísmica FOPAE 2010
- Profundidad del basamento rocoso FOPAE 2010
- Modelo de elevación digital del terreno de ladera "DEM" FOPAE 2010

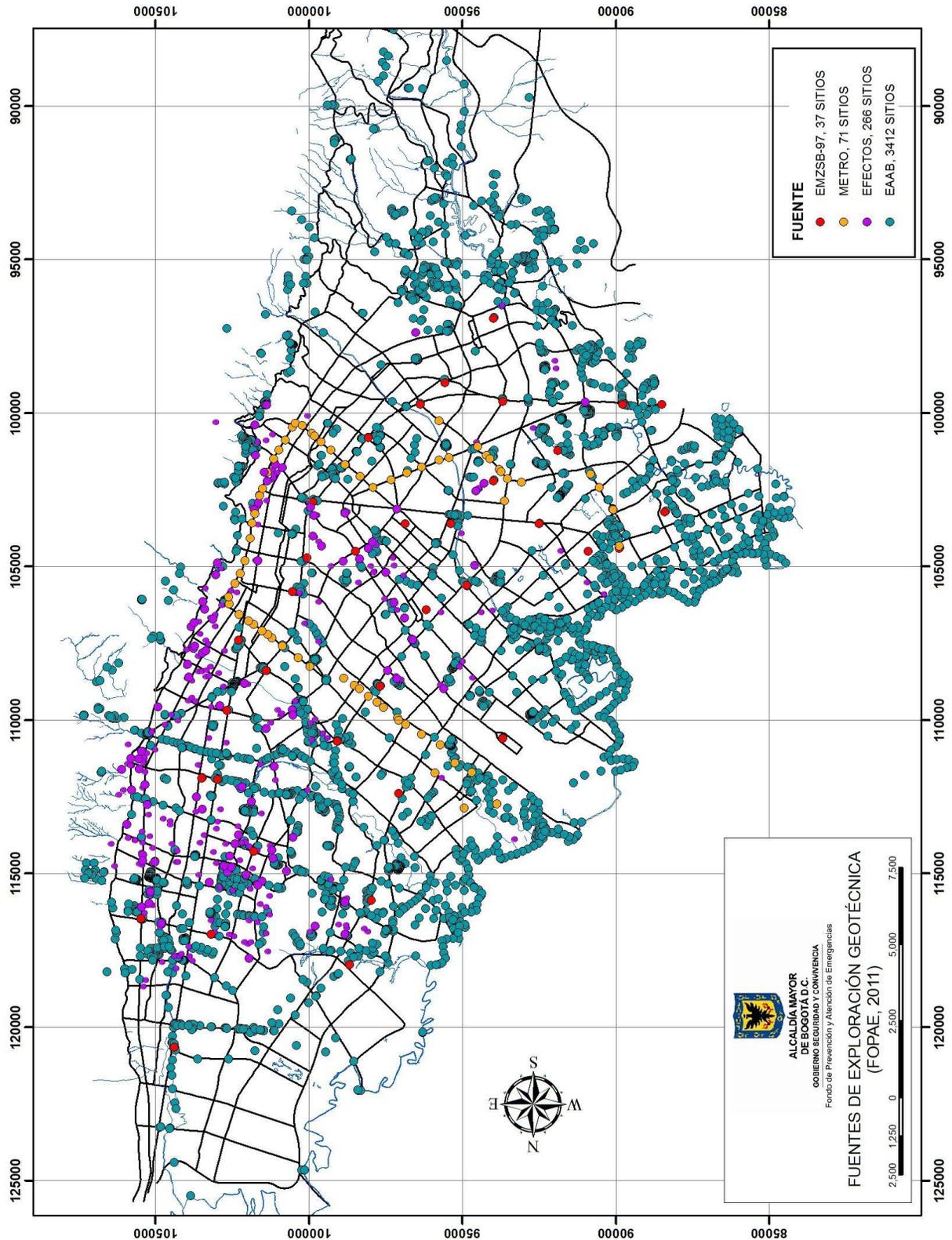


Figura 3.1. Fuentes de exploración geotécnica

3.3 PERFILES TÍPICOS ZONAS DE CERROS Y PIEDEMONTE

Trece de las treinta estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá se encuentran localizadas en las zonas de cerros y piedemonte de la ciudad (ver Tabla 3.1). Geológicamente la ciudad de Bogotá se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá y está rodeada por cerros constituidos por rocas de tipo areniscas, arcillolitas y conglomerados (Ingeominas, 1997).

CODIGO	NOMBRE	GEOLOGÍA	ZONA - AMZSB-10
CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	Coluvión	Piedemonte A
CPSUB	ACADEMIA DE POLICIA	Formación Guaduas	Cerro
CUSAQ	COL. ESCOLAR USAQUÉN	Complejo de conos	Piedemonte A
CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	Formación Guadalupe	Cerro
CTVCA	T.V. CABLE	Formación Guaduas	Cerro
CBART	COLEGIO SAN BARTOLOMÉ	Formación Cacho	Cerro
CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	Formación Guaduas	Cerro
CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Complejo de conos	Piedemonte B
CARTI	ESCUELA DE ARTILLERIA	Terraza baja	Piedemonte C
CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	Complejo de conos	Depósito de ladera
CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	Formación Guadalupe	Cerro
CVITE	TANQUES DE VITELMA	Depósito Fluvioglacial	Cerro
CBOG2	GAVIOTAS (INGEOMINAS)	Formación Guaduas	Cerro

Tabla 3.1. Estaciones de la RAB en zona de cerros y piedemonte

El procedimiento seguido para definir el perfil geotécnico típico se describe en la sección 3.1.2 y los resultados de este proceso son mostrados a continuación.

3.3.1 Estación Universidad de la Salle “CUSAL”

Esta estación se encuentra en la transición de las zonas de piedemonte A y Lacustre del sector noreste de la ciudad en la localidad de Usaquén a 2.560 msnm, en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 1%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 2%.

A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de suelos que inicia con 15 metros de depósito de material lacustre (arcillas blandas), seguido de 20 metros de depósitos de piedemonte.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 15	Arcilla de alta plasticidad	106	102	12.95
15 a 35	Arena limosa gris	28	25	17.00

Tabla 3.2. Perfil típico “CUSAL”

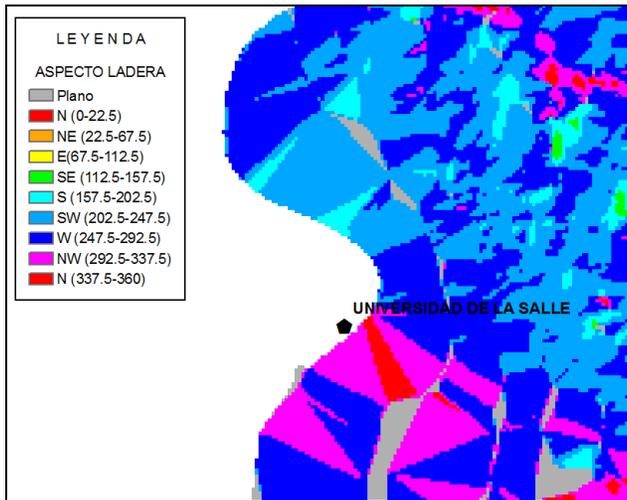


Figura 3.2. Aspecto de ladera “CUSAL”

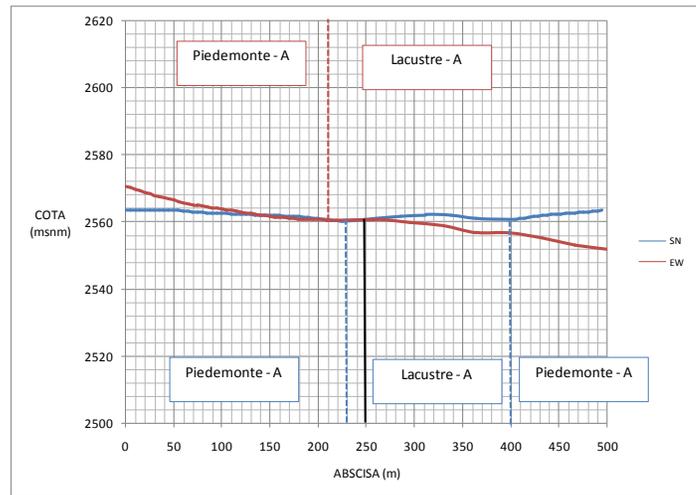


Figura 3.3. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CUSAL”

3.3.2 Estación Academia de Policía “CPSUB”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros occidentales de la ciudad (cerros de suba) en la localidad de Suba a 2.584 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente sur – oriente (ver Figura 3.4), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 8%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 12%.

Respecto a la geología se localizan en la zona arcillolitas y areniscas de la formación Guaduas, depósitos de ladera y piedemonte. A partir de las observaciones realizadas en la visita de campo efectuada se logró identificar que la estación se encuentra ubicada sobre un afloramiento de roca arenisca.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
N.A	Roca arenisca habana clara alterada con estratificación sub - horizontal	-	-	-

Tabla 3.3. Perfil típico “CPSUB”

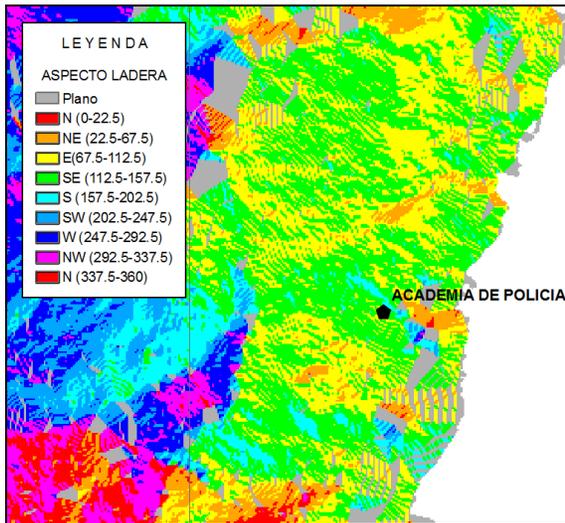


Figura 3.4. Aspecto de ladera “CPSUB”

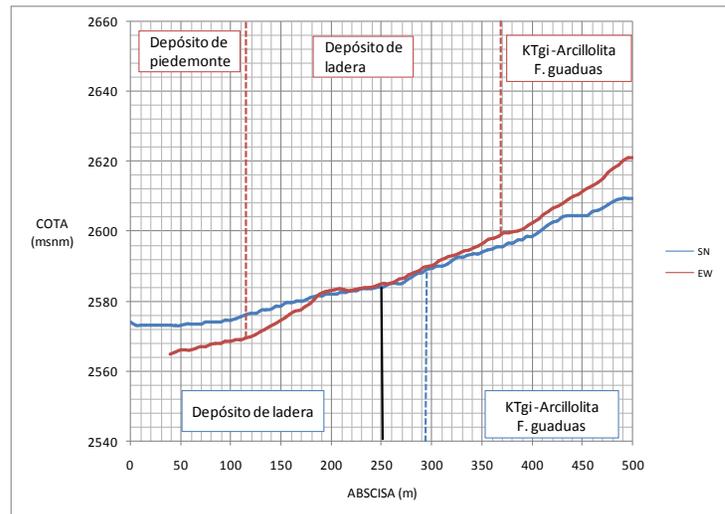


Figura 3.5. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CPSUB”

3.3.3 Estación Colonia Escolar de Usaquén “CUSAQ”

Esta estación se encuentra en la transición de las zonas de piedemonte A y Lacustre de la microzonificación de respuesta sísmica, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente oeste (ver Figura 3.6).

Con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 95 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con nueve materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.4	Relleno heterogéneo	26	16	17.07
2.4 a 3.5	Arcilla café oscuro con raíces	82	40	17.07
3.5 a 19.5	Limo arenoso café con lentes de grava	54	68	17.38
19.5 a 21.3	Arena fina orgánica café	20	0	17.66
21.3 a 37.8	Limo arcilloso orgánico café con lentes de arena	61	36	16.68
37.8 a 41.2	Arena fina café	22	0	18.15
41.2 a 43.3	Limo orgánico café de consistencia alta	29	36	14.72
43.3 a 46	Gravas gruesas de color gris con lentes de arena	15	15	16.18
46 a 95	Limo arcilloso gris	29	36	14.72

Tabla 3.4. Perfil típico “CUSAQ”

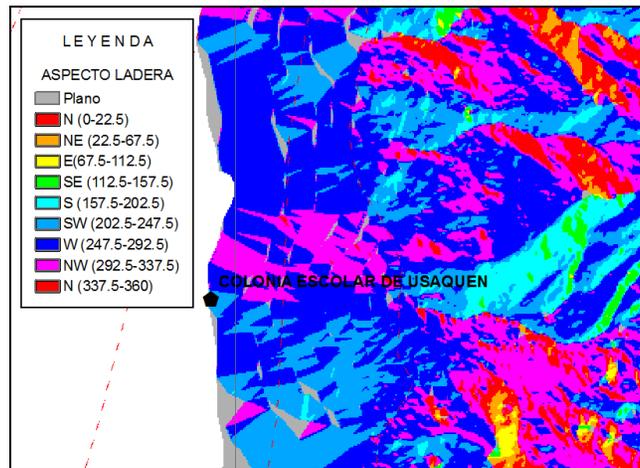


Figura 3.6. Aspecto de ladera “CUSAQ”

3.3.4 Estación Escuela de Caballería “CESCA”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros orientales de la ciudad en la localidad de Usaquén a 2.584 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente norte a noroeste (ver Figura 3.7), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 48%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 21%.

Respecto a la geología se encuentran areniscas de la formación Guadalupe y depósitos de piedemonte. A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de suelos residuales grava arenosos de máximo 4 metros de espesor.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 4	Suelo residual – grava arenosa	-	-	20

Tabla 3.5. Perfil típico “CESCA”

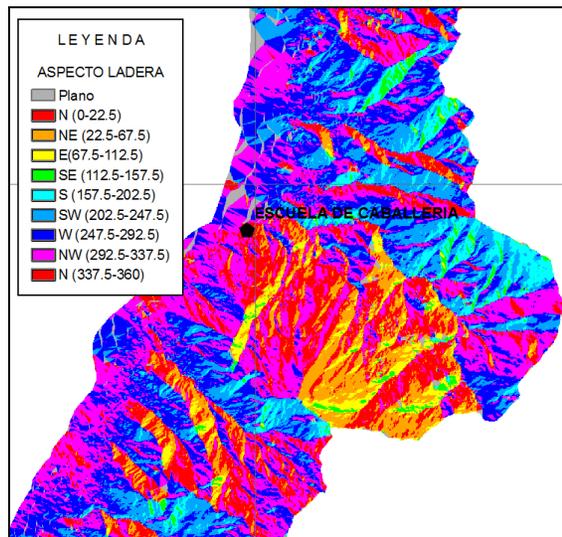


Figura 3.7. Aspecto de ladera “CESCA”

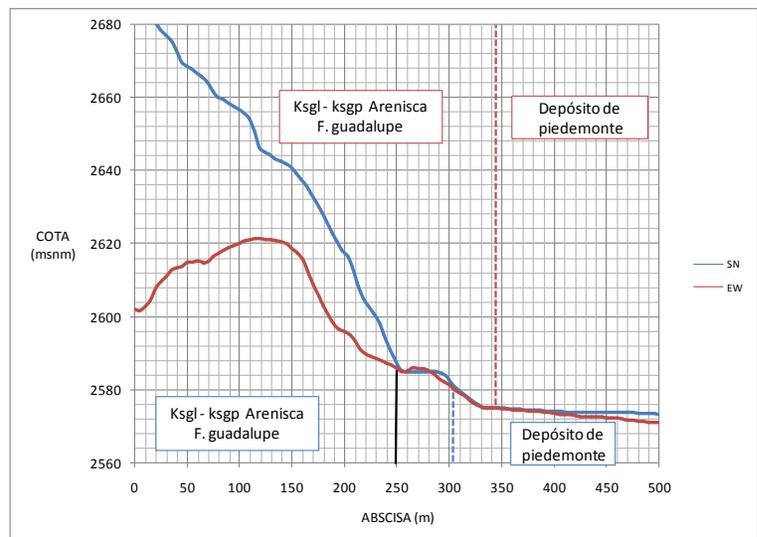


Figura 3.8. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CESCA”

3.3.5 Estación T.V. CABLE “CTVCA”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros occidentales de la ciudad (cerros de suba) en la localidad de Suba a 2.628 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente oeste a suroeste (ver Figura 3.9), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 10% y una geometría cóncava, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 28%.

Respecto a la geología se encuentran en la zona arcillolitas y areniscas de la formación Guaduas. A partir de las observaciones realizadas en la visita de campo efectuada se logró identificar que la estación se encuentra ubicada sobre un afloramiento de roca arenisca.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
N.A	Roca arenisca amarilla alterada	-	-	-

Tabla 3.6. Perfil típico “CTVCA”

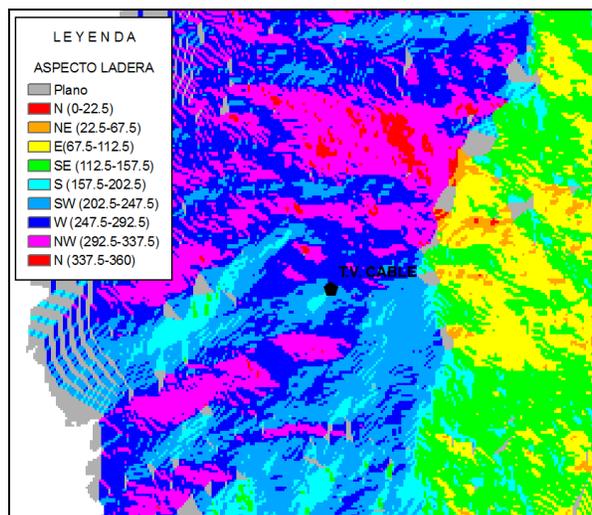


Figura 3.9. Aspecto de ladera “CTVCA”

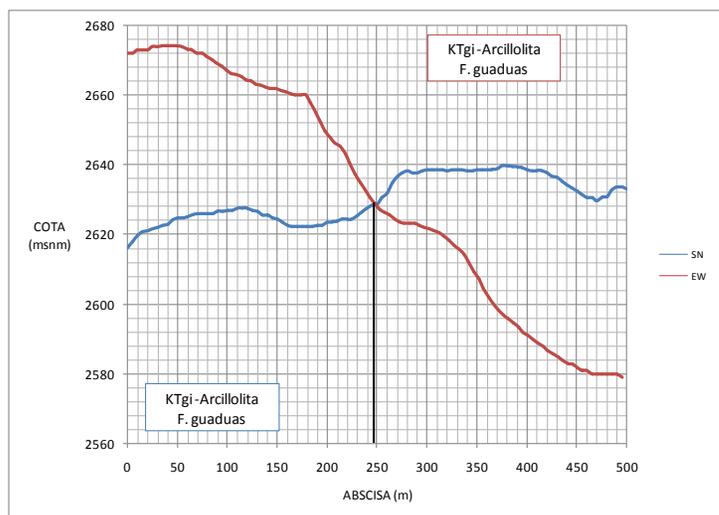


Figura 3.10. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CTVCA”

3.3.6 Estación Colegio San Bartolomé “CBART”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros orientales de la ciudad en la localidad de Santa Fe a 2.651 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente noroeste (ver Figura 3.11), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 24%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 27%.

Respecto a la geología se encuentran depósitos de ladera y areniscas de la formación Guaduas y Cacho. A partir de las observaciones realizadas en la visita de campo efectuada se logró identificar que la estación se encuentra ubicada sobre un afloramiento de roca arenisca.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
N.A	Roca arenisca habana sana	-	-	-

Tabla 3.7. Perfil típico “CBART”

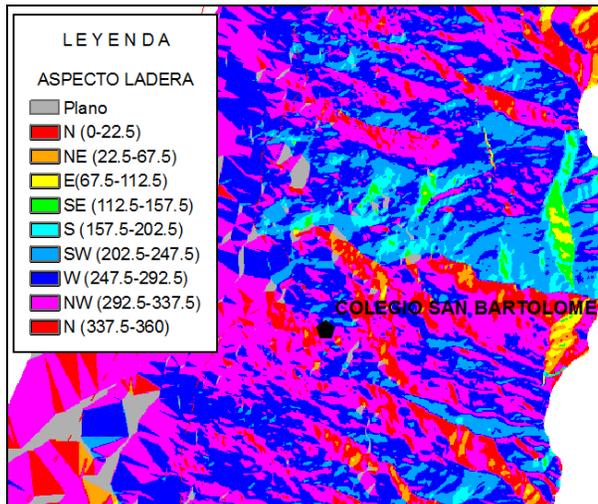


Figura 3.11. Aspecto de ladera “CBART”

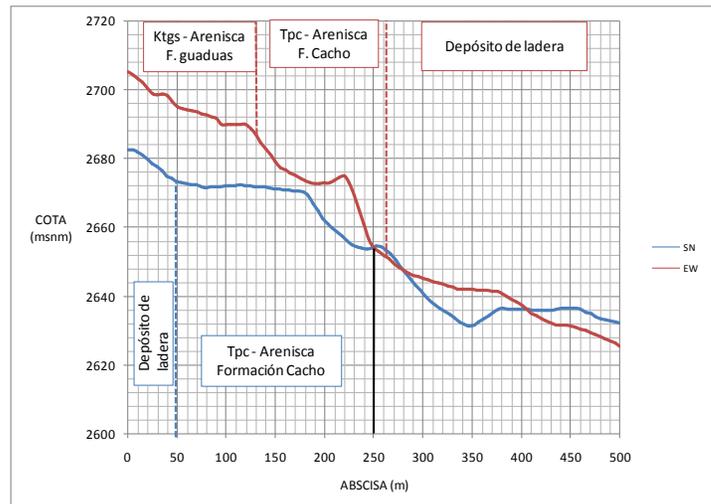


Figura 3.12. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CBART”

3.3.7 Estación Universidad Manuela Beltrán “CUNMA”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros orientales de la ciudad en la localidad de Chapinero a 2.676 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente oeste (ver Figura 3.13), en el perfil sur-norte se identifica una terraza, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 17%.

Respecto a la geología se encuentran depósitos de ladera y areniscas de la formación Guaduas y Guadalupe. A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de suelos coluviales gravo arenosos de máximo 8 metros de espesor.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 4	Grava areno limosa	-	-	18.0

Tabla 3.8. Perfil típico “CUNMA”

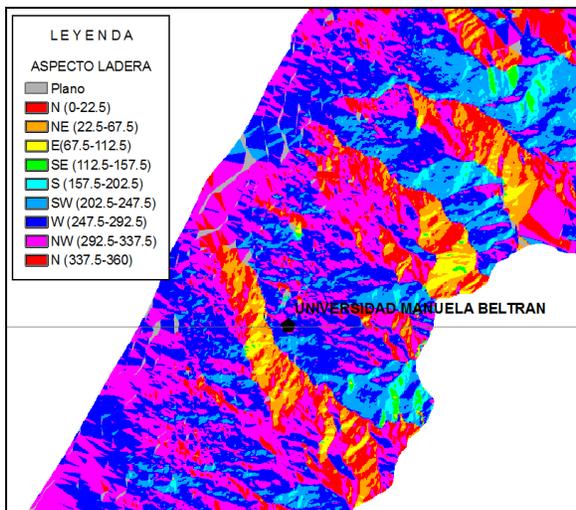


Figura 3.13. Aspecto de ladera “CUNMA”

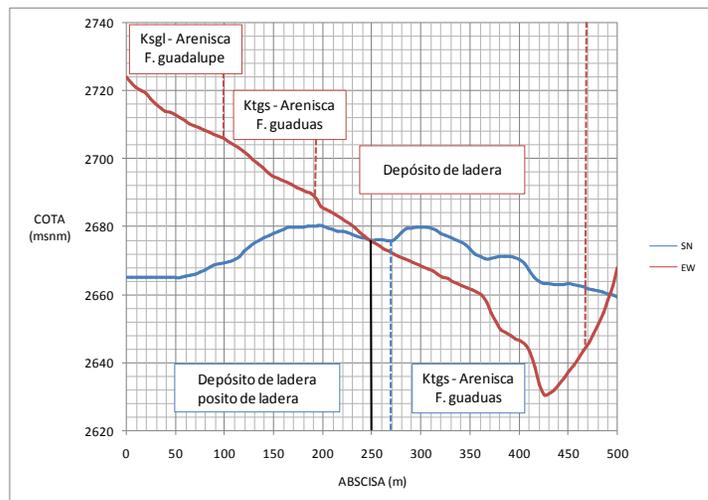


Figura 3.14. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CUNMA”

3.3.8 Estación Hospital San Juan de Dios “CDIOS”

Esta estación se encuentra en la transición de las zonas de piedemonte B y Aluvial 50 de la microzonificación de respuesta sísmica, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente noroeste (ver Figura 3.15).

Con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 50 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con cinco materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 1	Relleno heterogéneo	22	30	16.68
1 a 15	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arenas y gravas con presencia de turba	29	18	19.03
15 a 19	Arena gravo arcillosa gris oscuro	21	15	20.31
19 a 40	Arcillas y limos con intercalaciones de arenas y gravas y lentes de turba	37	18	18.53
40 a 50	Arcilla arenosa café de consistencia dura	21	14	16.68

Tabla 3.9. Perfil típico “CDIOS”

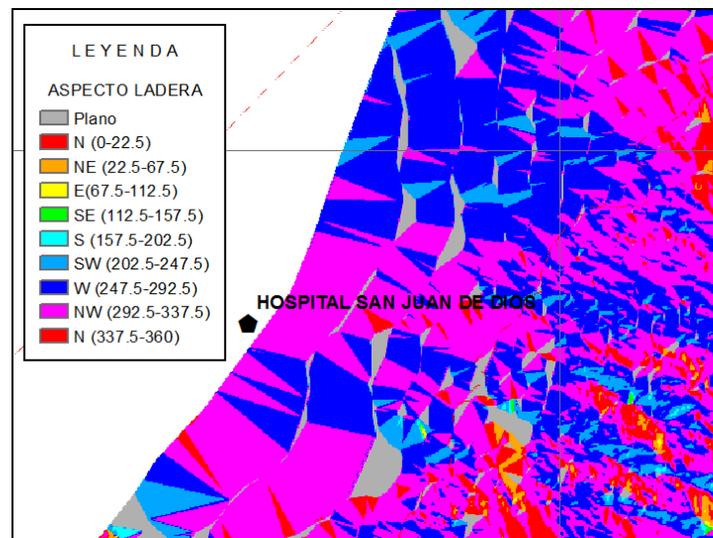


Figura 3.15. Aspecto de ladera “CDIOS”

1. Estación Escuela de Artillería “CARTI”

Esta estación se encuentra en el flanco derecho de la zona de depositación del río Tunjuelo al sur oriente de la ciudad en la localidad de Tunjuelito a 2.565 msnm, la geometría de superficie indica una pendiente muy suave, la cual fue medida en los perfiles sur-norte y este - oeste con valores de 0.4% y 1.5% respectivamente.

Respecto a la geología se encuentra una formación de terraza baja correspondiente a un depósito aluvial de cauce. A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de arenas y gravas de máximo 20 metros de espesor.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5	Arena limosa amarilla	15	8	18
5 a 20	Grava arenosa gris	6	-	18

Tabla 3.10. Perfil típico “CARTI”

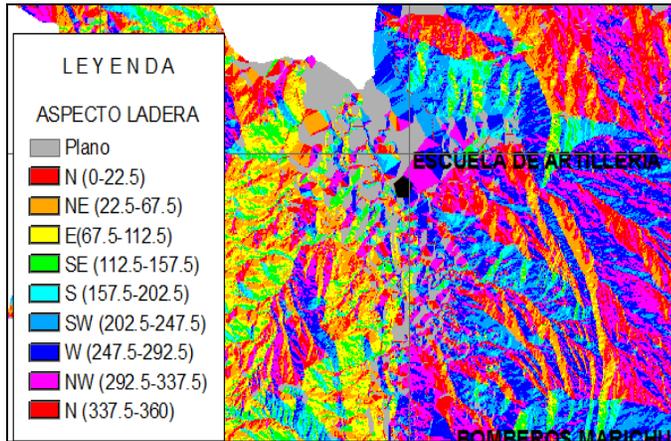


Figura 3.16. Aspecto de ladera "CARTI"

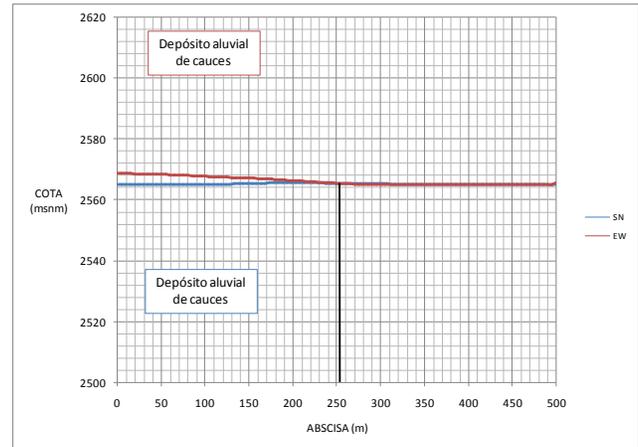


Figura 3.17. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación "CARTI"

3.3.9 Estación Bomberos Marichuela "CMARI"

Esta estación se encuentra en la zona de depósitos de ladera en el flanco derecho del valle del río Tunjuelo, en la región suroriental de la ciudad específicamente en la localidad de Usme a 2.685 msnm, en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 5%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 4%.

Respecto a la geología se tiene que la estación se localiza en la zona de complejo de conos por consiguiente se adopta un perfil de arenas limosas con presencia de gravas hasta de 20m de espesor.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 20	Arena gravo limosa	12	5	18

Tabla 3.11. Perfil típico "CMARI"

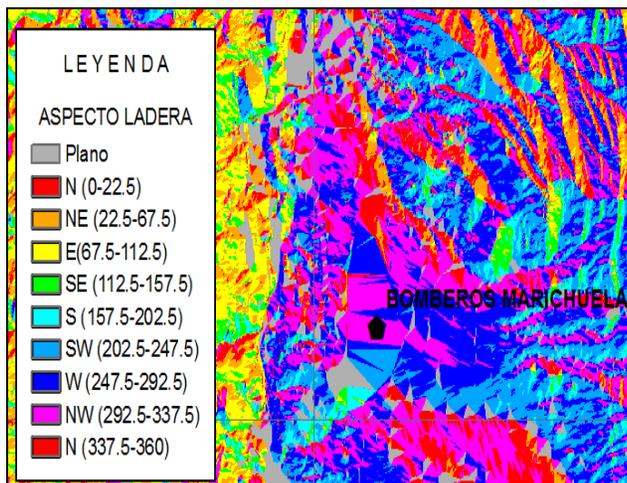


Figura 3.18. Aspecto de ladera "CMARI"

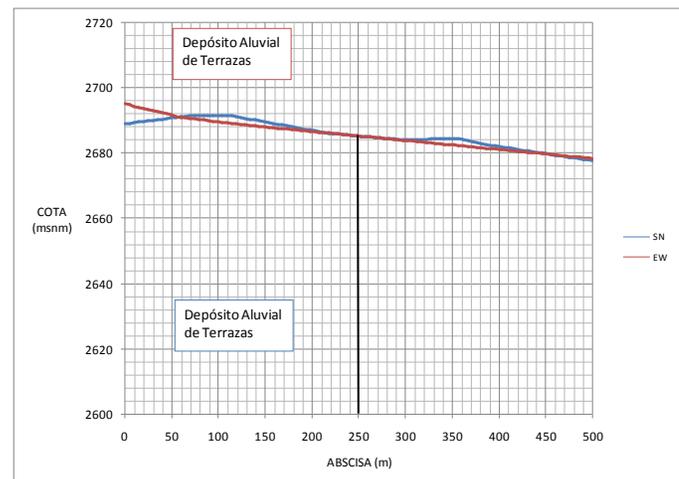


Figura 3.19. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación "CMARI"

3.3.10 Estación Colegio Sierra Morena “CSMOR”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros sur occidentales de la ciudad en la localidad de ciudad bolívar a 2.789 msnm, específicamente se ubica en el filo del cerro como indica la Figura 3.21, la dirección del buzamiento en las caras de la ladera presentes es preferentemente noreste y suroeste (ver Figura 3.20 y Figura 3.21), en el perfil sur - norte se identifica una pendiente promedio de 43% en la cara suroeste y de 27% en la cara noreste, mientras que en el perfil este - oeste una pendiente promedio de 15% en la cara sur - occidental y de 26% en la cara nor – oriental.

Respecto a la geología se encuentra en superficie la formación Guadalupe - arenisca tierna. A partir de las observaciones realizadas en la visita de campo efectuada se logró identificar que la estación se encuentra ubicada sobre un afloramiento de roca arenisca.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
N.A.	Roca arenisca alterada	-	-	22

Tabla 3.12. Perfil típico “CSMOR”

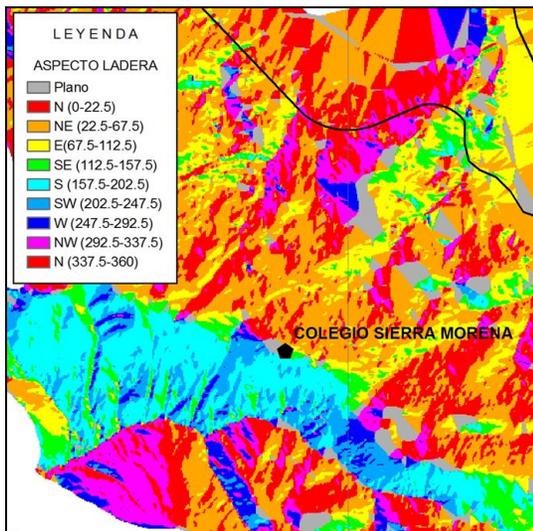


Figura 3.20. Aspecto de ladera “CSMOR”

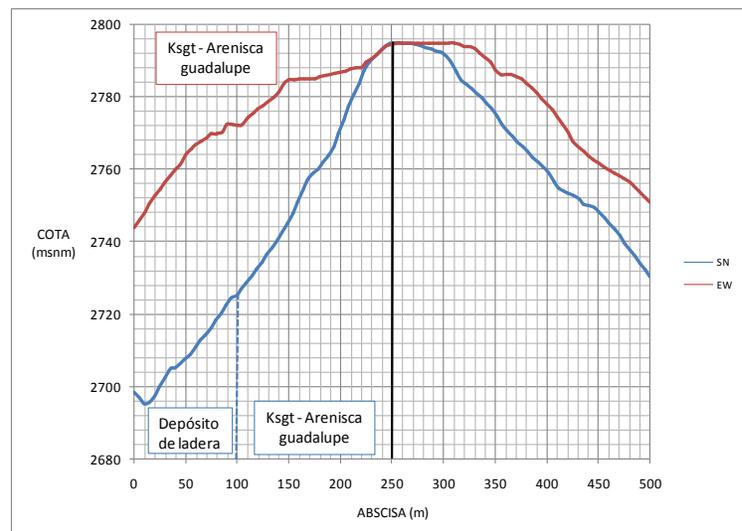


Figura 3.21. Perfil altimétrico Sur – Norte y Este – Oeste, estación “CSMOR”

3.3.11 Estación Tanques de Vitelma “CVITE”

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros sur orientales de la ciudad en la localidad de San Cristóbal a 2.768 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente suroeste (ver Figura 3.22), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 4%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 2.6%.

Respecto a la geología se encuentra en superficie un depósito fluvio-glaciar que suprayace al segmento superior de la formación guaduas. A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de ladera matriz soportado de entre 10 a 15m de espesor compuesto por gravas, arenas y bloques.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 15	Grava arenosa con presencia de bloques	-	-	18

Tabla 3.13. Perfil típico “CVITE”

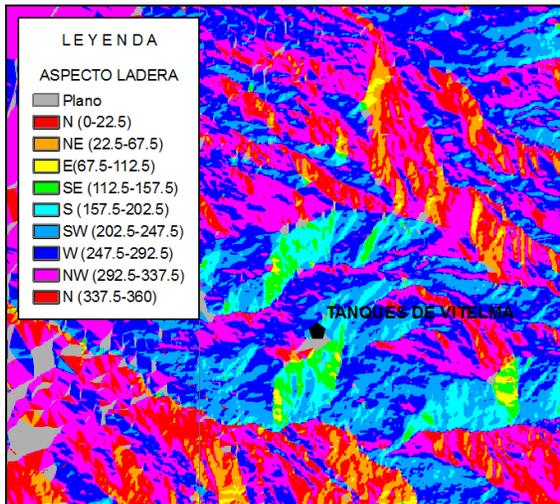


Figura 3.22. Aspecto de ladera "CVITE"

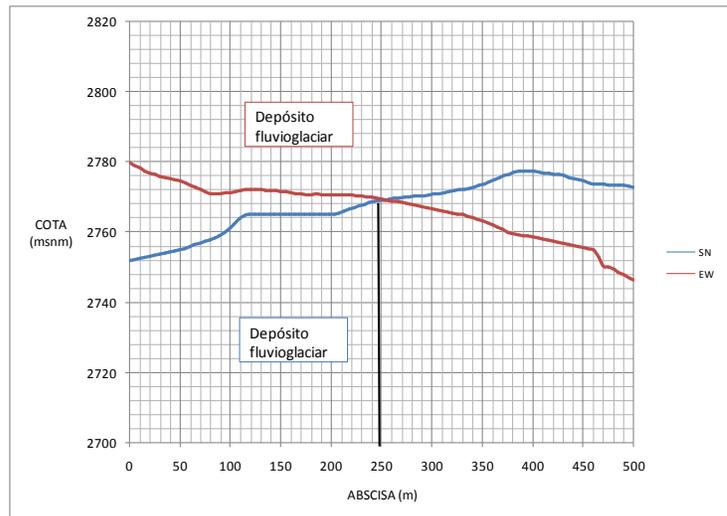


Figura 3.23. Perfil altimétrico Sur - Norte y Este - Oeste, estación "CVITE"

3.3.12 Estación Gaviotas - Ingeominas "CBOG2"

Esta estación se encuentra en la zona de los cerros orientales de la ciudad en la localidad de Santa Fe a 2.692 msnm, la dirección del buzamiento en la cara de la ladera es preferentemente sur (ver Figura 3.24), en el perfil sur-norte se identifica una pendiente promedio de 21%, mientras que en el perfil este - oeste se tiene una pendiente promedio de 42%, aunque la estación se localiza en una terraza de aproximadamente 150m.

Respecto a la geología se encuentran areniscas de la formación Guaduas y Cacho. A partir de las consideraciones anteriores se propone un depósito de suelos residuales entre arenosos y limosos de máximo 2 metros de espesor.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2	Arena limosa amarillo	-	-	19

Tabla 3.14. Perfil típico "CBOG2"

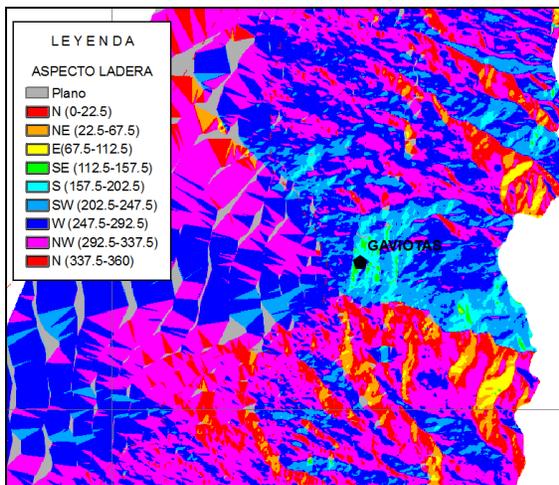


Figura 3.24. Aspecto de ladera "CBOG2"

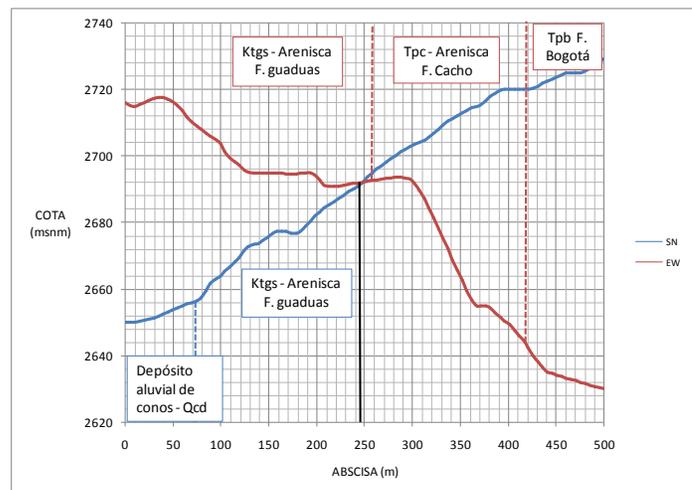


Figura 3.25. Perfil altimétrico Sur - Norte y Este - Oeste, estación "CBOG2"

3.4 PERFILES TÍPICOS DE LAS ZONAS LACUSTRE Y ALUVIAL

Veinte de las treinta estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá se encuentran localizadas en la zona plana de la ciudad, esto para dar cubrimiento a esta amplia extensión de terreno. La interpretación geológica del depósito de suelos distingue, en superficie la formación Sabana constituida por arcillas de origen lacustre y la formación Subachoque que subyace a la formación Sabana se constituye por arcillas arenosas de origen aluvial.

De acuerdo con la zonificación geotécnica se identifican tres perfiles típicos en esta región, el primero corresponde a la zona lacustre tipificado por arcillas de alta plasticidad y de consistencias blandas a muy blandas, el segundo describe la zona aluvial compuesta por materiales de tipo arenoso de baja plasticidad y de densidades que varían de sueltas a compactas y finalmente una zona de transición entre los dos perfiles anteriormente descritos en la que se distinguen intercalaciones de materiales arenosos y arcillosos con un comportamiento intermedio entre el perfil lacustre y aluvial. En el Anexo 3 se presentan las fichas del perfil típico para cada una de las estaciones de la RAB localizadas en la zona plana.

En la zona lacustre se encuentra trece estaciones como se muestra en la Tabla 3.15, para los cuales se procedió conforme a lo descrito en la sección 3.1.1 para definir el perfil geotécnico típico.

CODIGO	NOMBRE	GEOLOGÍA	ZONA RESPUESTA SÍSMICA
CEING	E. Colombiana de Ingeniería	Llanura de inundación	Lacustre 200
CCORP	Universidad Corpas	Terraza alta	Lacustre 300
CUAGR	Uniagraria	Terraza alta	Lacustre 200
CBANC	Banco de la República	Terraza alta	Lacustre 50 – Piedemonte A
CFLOD	Parque la Florida	Llanura de inundación	Lacustre 500
CFONT	Pta. Bombeo Fontibón	Llanura de inundación	Lacustre - Aluvial 300
CNIÑO	Centro de Estudios del Niño	Llanura de inundación	Lacustre 300
CJABO	Jardín Botánico	Terraza alta	Lacustre 300
CTIEM	Club el Tiempo	Terraza alta	Lacustre 500
CLAGO	Colegio Laureano Gómez	Terraza alta	Lacustre 300
CAVIA	Avianca	Terraza alta	Lacustre 500
CBOG1	Ingeominas	Terraza alta	Lacustre 200
CREAC	Reactor Nuclear (Ingeominas)	Terraza alta	Lacustre 300

Tabla 3.15. Estaciones de la RAB en zona lacustre

3.4.1 Estación Escuela Colombiana de Ingeniería “CEING”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 200 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 130 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.1 m y la columna estratigráfica se caracterizó con doce materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 4	Arcilla gris claro a amarillo con oxidaciones	46	39	15.70
4 a 14.4	Arcilla gris con oxidaciones	148	124	12.91
14.4 a 16.5	Turba	323	192	11.97
16.5 a 25	Arcilla gris marrón	132	117	12.83
25 a 30	Arcilla gris marrón	100	81	14.19
30 a 38	Arcilla marrón amarillento	122	115	13.93
38 a 40	Arcilla marrón amarillento con turba	201	179	13.15
40 a 56	Arcilla gris oliva	92	90	14.36
56 a 67	Arcilla gris con turba y presencia de arena fina	53	39	16.38
67 a 85.5	Arcilla arenosa y arena gris marrón	29	25	17.76
85.5 a 97	Arcilla gris marrón	39	42	16.19
97 a 130	Arena gris de grano fino y arena arcillosa marrón	17	17	22.56

Tabla 3.16. Perfil típico “CEING”

3.4.2 Estación Universidad Corps “CCORP”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 300 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.1 m y la columna estratigráfica se caracterizó con diecisiete materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 1.5	Paleosuelo marrón amarillento oscuro	79	40	15.70
1.5 a 11.5	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	152	141	13.00
11.5 a 17.5	Arcilla limosa gris oliva a marrón amarillento	147	119	12.82
17.5 a 19	Arcilla turbosa marrón amarillento quemado	185	154	12.07
19 a 25	Arcilla marrón amarillento oscuro	106	102	12.95
25 a 29	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	132	111	12.85
29 a 37	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	120	95	13.73
37 a 40	Arcilla turbosa marrón amarillento quemado	117	78	14.62
40 a 45	Arcilla limosa marrón amarillento quemado	100	76	14.42
45 a 52.5	Arcilla gris oliva a gris marrón	45	21	16.25
52.5 a 72	Arcilla gris oliva a gris marrón	92	86	14.32
72 a 100	Arcilla limosa gris oliva a marrón	51	43	16.19
100 a 125	Arcilla arenosa gris oliva	32	20	17.76
125 a 135	Arena muy fina ligeramente limosa a arcilla limosa gris oliva	23		19.62
135 a 183	Arcilla limosa gris marrón	37	38	16.19
183 a 250	Arcilla gris marrón	40	48	15.70
250 a 300	Arcilla gris marrón	40	48	15.70

Tabla 3.17. Perfil típico “CCORP”

3.4.3 Estación Uniagraria “CUAGR”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 200 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 130 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con dieciséis materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5	Arcilla marrón	100	125	15.21
5 a 10	Arcilla gris	160	200	13.73
10 a 17	Arcilla gris a marrón	160	200	13.73
17 a 24	Arcilla gris con presencia de turba	150	195	14.22
24 a 28	Arcilla gris verdosa	120	150	14.72
28 a 30	Arcilla orgánica	200	265	10.79
30 a 35	Arcilla marrón con presencia de turba	150	195	13.73
35 a 37.5	Arcilla arenosa gris marrón	80	100	15.70
37.5 a 45	Arcilla gris verdosa	130	170	14.72
45 a 56.5	Arcilla gris	100	125	15.21
56.5 a 65	Arcilla gris marrón con presencia de turba	60	70	16.19
65 a 67	Arcilla orgánica	160	210	12.75
67 a 85.5	Arcilla arenosa gris marrón	50	40	17.17
85.5 a 97	Arcilla gris marrón	50	55	16.68
97 a 115	Arena fina gris verdoso	30	25	17.17
115 a 130	Arena fina marrón	25	20	17.66

Tabla 3.18. Perfil típico “CUAGR”

3.4.4 Estación Banco de la República “CBANC”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de transición entre Lacustre – 50 y el piedemonte A ubicado en las inmediaciones de los cerros de suba, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 40 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2.1m y la columna estratigráfica se caracterizó con cuatro materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.8	Limo arcilloso carmelito	69	40	13.73
2.8 a 11.6	Arcilla gris oscura orgánica	133	108	13.39
11.6 a 12.5	Arena gris oscura con fragmentos de gravas	17	22	18.64
12.5 a 40	Arcilla gris de consistencia dura	25	15	15.21

Tabla 3.19. Perfil típico “CBANC”

2. Estación Parque la Florida “CFLOD”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 500 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 500 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con catorce materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 3	Relleno heterogéneo	53	65	16.28
3 a 7	Arcilla gris oscura con intercalaciones de arena	25	12	19.13
7 a 10	Arena gris a café medio suelta	22	4	17.17
10 a 28	Arcilla café con intercalaciones de material orgánico	142	130	13.03
28 a 40	Arcilla marrón	115	101	13.35
40 a 70	Arcilla gris	97	88	14.11
70 a 90	Arcilla marrón a gris oliva	79	67	15.13
90 a 110	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa	44	46	17.17
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	29	20	19.36
132 a 147	Arcilla gris oliva	34	30	17.17
147 a 159.5	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	35	15.30
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	15	19.63
225 a 240	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla	28	16	20.31
240 a 500	Arcilla arenosa Marrón	41	51	17.56

Tabla 3.20. Perfil típico “CFLOD”

3.4.5 Estación Pta. Bombeo Fontibón “CFONT”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de transición entre Lacustre – 300 y el Aluvial - 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 275 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2.7 m y la columna estratigráfica se caracterizó con trece materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.5	Arcilla limosa gris claro	38	43	16.04
2.5 a 5	Arcilla arenosa y/o arena arcillosa gris a gris verdosa	45	44	16.77
5 a 15.4	Arcilla limosa carmelita	106	106	14.16
15.4 a 40	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arena	103	84	13.68
40 a 70	Arcilla gris	84	79	14.22
70 a 90	Arcilla marrón a gris oliva	66	63	15.35
90 a 110	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa	45	44	16.73
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	40	19.36
132 a 147	Arcilla gris oliva	41	37	16.24

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
147 a 159.5	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	26	17.17
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	26	21	19.46
225 a 240	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla	28	16	20.31
240 a 275	Arcilla arenosa Marrón	41	51	17.56

Tabla 3.21. Perfil típico “CFONT”

3.4.6 Estación Centro de Estudios del Niño “CNIÑO”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 225 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.5 m y la columna estratigráfica se caracterizó con doce materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5	Limo arcilloso gris oscuro orgánico	78	67	14.32
5 a 16	Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris carmelito	149	137	12.92
16 a 24	Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris marrón	137	128	13.24
24 a 40	Arcilla limosa gris a marrón	124	113	13.36
40 a 50	Arcilla limosa marrón	91	69	14.37
50 a 70	Arcilla gris	80	80	14.19
70 a 90	Arcilla marrón a gris oliva	66	63	15.35
90 a 110	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa	45	44	16.73
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	40	19.36
132 a 147	Arcilla gris oliva	41	37	16.24
147 a 159.5	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	26	17.17
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de Arena	26	21	19.46

Tabla 3.22. Perfil típico “CNIÑO”

3.4.7 Estación Jardín Botánico “CJABO”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 275 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.5 m y la columna estratigráfica se caracterizó con doce materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.5	Rellenos superficiales heterogéneos	45	45	17.34
2.5 a 8	Arcilla gris con intercalaciones carmelitas	113	108	14.63
8 a 18	Arcilla limosa gris marrón	142	122	13.33
18 a 30	Arcilla ligeramente limosa marrón a gris	121	118	13.05
30 a 40	Arcilla limosa gris amarillento	108	91	13.51
40 a 58	Arcilla algo limosa gris marrón con turba	83	83	14.33
58 a 70	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arena	38	33	18.68
70 a 90	Arcilla limosa gris oscuro con intercalaciones de arena	74	60	15.63
90 a 159.5	intercalaciones de arena fina con arcilla limosa gris oliva	30	24	18.23
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	16	19.69
225 a 240	Arena de grano fino ligeramente arcillosa marrón	28	16	20.31
240 a 275	Arcilla arenosa marrón	41	51	17.56

Tabla 3.23. Perfil típico “CJABO”

3.4.8 Estación Club el tiempo “CTIEM”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 500 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 450 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con trece materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 1.2	Relleno	70	55	16.28
1.2 a 8	Arcilla gris de consistencia dura	107	110	13.90
8 a 15	Arcilla limosa gris a carmelito	140	141	12.70
15 a 40	Arcilla limosa gris a carmelito	119	107	13.45
40 a 72	Arcilla gris verdosa a café	88	80	14.73
72 a 90	Arcilla gris verdosa	68	62	15.71
90 a 110	Arcilla algo limosa gris verdosa a marrón	39	45	17.17
110 a 132	Arena marrón de grano fino ligeramente arcillosa	29	20	19.36
132 a 147	Arcilla gris verdosa	34	30	17.17
147 a 159.5	Arena arcillosa café de grano fino	29	21	17.27
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a arcilla arenosa café	25	13	19.70
225 a 240	Arena arcillosa café de grano fino	29	16	20.31
240 a 450	Arcilla arenosa café	38	47	17.56

Tabla 3.24. Perfil típico “CTIEM”

3.4.9 Estación Colegio Laureano Gómez “CLAGO”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 250 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3 m y la columna estratigráfica se caracterizó con diez materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 3	Relleno	65	62	16.28
3 a 14	Limo amarillo orgánico a la base	142	96	13.09
14 a 23	Arcilla limosa gris a café	195	173	12.18
23 a 39.5	Arcilla gris a café con turba a la base	128	99	13.32
39.5 a 72	Arcilla algo limosa gris verdosa a café	97	76	14.46
72 a 90	Arcilla limosa gris verdosa a café	59	51	15.87
90 a 110	Arcilla limosa gris marrón a arcilla arenosa gris verdosa	40	43	17.17
110 a 135	Arena muy fina ligeramente arcillosa gris verdosa	30	23	18.81
135 a 155	Arcilla limosa gris	40	39	15.30
155 a 250	Arcilla café	35	42	19.39

Tabla 3.25. Perfil típico “CLAGO”

3.4.10 Estación Avianca “CAVIA”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 500 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 360 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con quince materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.8	Relleno heterogéneo	71	57	16.28
2.8 a 8	Arcilla limosa gris	110	110	14.62
8 a 15	Arcilla limosa gris oliva a gris marrón	134	121	12.92
15 a 21	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	153	135	12.71

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
21 a 40	Arcilla gris a marrón	120	109	13.23
40 a 70	Arcilla gris oliva	88	77	15.01
70 a 73	Arenas limosa y/o limos arenosos café	25	25	17.17
73 a 90	Arcilla marrón a gris oliva	72	65	15.50
90 a 110	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa	37	42	16.58
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	29	20	19.36
132 a 147	Arcilla gris oliva	34	30	17.17
147 a 159.5	Arena arcillosa de grano fino marrón	33	24	17.27
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	13	19.70
225 a 240	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla	31	16	20.31
240 a 360	Arcilla arenosa Marrón	35	51	17.56

Tabla 3.26. Perfil típico "CAVIA"

3.4.11 Estación INGEOMINAS "CBOG1"

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 200 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el registro de exploración se define la profundidad de depósito en 180 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5 m y la columna estratigráfica se caracterizó con veintidós materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5	Arcilla ligeramente limosa, gris	43	45	17.66
5 a 7	Arcilla gris claro	79	92	16.19
7 a 12	Arcilla gris marrón	127	151	13.73
12 a 17	Arcilla gris oliva	119	149	13.54
17 a 21	Arcilla marrón	116	143	14.03
21 a 23	Turba	300	270	9.81
23 a 30	Arcilla marrón	87	122	14.22
30 a 38	Arena arcillosa fina a media, marrón	28	17	19.13
38 a 44.5	Arcilla limosa marrón	52	46	17.17
44.5 a 52.5	Arcilla gris verdosa con presencia de turba	81	104	15.21
52.5 a 58	Turba	120	155	13.15
58 a 67	Arcilla arenosa gris oliva	37	38	18.64
67 a 69	Turba	120	155	12.75
69 a 80	Intercalaciones de arena y arcilla	26	23	19.13
80 a 100	Intercalaciones de arena y arcilla	25	22	19.13
100 a 120	Intercalaciones de arena y arcilla	20	14	19.13
120 a 140	Intercalaciones de arena y arcilla	27	24	19.13
140 a 152	Intercalaciones de arena y arcilla	27	0	19.13
152 a 157	Arcilla gris y marrón	29	27	17.66
157 a 159	Turba	120	155	12.75
159 a 180	Intercalaciones de arena y arcilla	40	42	19.13

Tabla 3.27. Perfil típico "CBOG1"

3.4.12 Estación Reactor Nuclear - Ingeominas "CREAC"

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 230 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con trece materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 4.5	Arcilla arenosa limosa marrón a arcilla gris	43	43	16.93
4.5 a 7.5	Arcilla limosa gris verdosa	77	79	15.30
7.5 a 11	Arcilla limosa gris marrón	128	124	13.31
11 a 20	Arcilla limosa gris marrón con lentes de arena	86	74	14.62

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
20 a 26	Arcilla limosa café oscuro con presencia de turba	111	129	13.16
26 a 30	Arcilla limosa gris marrón algo arenosa	76	76	15.15
30 a 34	Arcilla limosa gris verdosa con lentes de arena	41	31	16.43
34 a 46	Arcilla arenosa a arcilla arcillosa café rojizo	33	20	18.02
46 a 56	Arcilla café rojiza a arcilla limosa gris verdosa con presencia de turba	74	69	15.34
56 a 73	Arcilla limosa a arcilla arenosa gris	53	70	15.49
73 a 110	Intercalaciones de arena fina ligeramente arcillosa gris y arcilla ligeramente limosa café	25	30	16.79
110 a 154	Intercalaciones de arena fina ligeramente arcillosa gris y arcilla ligeramente limosa café	29	21	18.57
154 a 230	Arcilla limosa café a arcilla arenosa gris	27	16	19.35

Tabla 3.28. Perfil típico "CREAC"

En la zona aluvial se encuentra siete puntos de estudio como se muestra en la Tabla 3.29, para los cuales se procedió conforme a lo descrito en la sección 3.1.1 para definir el perfil geotécnico típico.

CODIGO	NOMBRE	GEOLOGÍA	ZONA RESPUESTA SÍSMICA
CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	Complejo de conos	Aluvial 100
CTIMI	PARQUE TIMIZA	Complejo de conos	Aluvial 200
CTUNA	PARQUE EL TUNAL	Terraza baja	Aluvial 50
CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	Complejo de conos	Aluvial 200
CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	Complejo de conos	Aluvial 100
CCKEN	COL KENNEDY	Terraza baja	Aluvial 300
CCITE - CARAN	CITEC - BOMBEROS PUENTE ARANDA	Terraza alta	Lacustre Aluvial 300

Tabla 3.29. Estaciones de la RAB en zona aluvial

3.4.13 Estación Colegio Fernando Mazuera "CBOSA"

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 100 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos y las perforaciones aledañas se propone una profundidad de depósito de 90 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con dieciséis materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 8	Arcilla limosa algo arenosa	35	24	17.94
8 a 12	Arena limosa algo arcillosa gris a carmelita	24	11	18.34
12 a 17	Arcilla limosa y/o limo arcilloso algo arenoso carmelito a arena limosa carmelita	32	29	16.97
17 a 18	Turba	95	80	11.77
18 a 25	Limo arcilloso con intercalaciones de arena	29	12	18.54
25 a 27	Turba	196	94	11.04
27 a 31	Arena limosa	30	4	19.13
31 a 33	Arcilla limosa	35	24	18.88
33 a 35	Arena limosa gris	26	5	19.13
35 a 40	Arcilla verde carmelita	25	12	17.27
40 a 42	Arena limosa	25	15	20.60
42 a 45	Madera	60	80	12.75
45 a 48	Arcilla	23	15	17.66
48 a 51	Turba	100	54	13.87
51 a 62	Arena gris verdosa */rojiza	22	15	19.82
62 a 90	Gravas	3	0	20.60

Tabla 3.30. Perfil típico "CBOSA"

3.4.14 Estación Parque Timiza “CTIMI”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 200 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 150 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 11.8 m y la columna estratigráfica se caracterizó con once materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5.5	Arena de grano fino a medio color marrón amarillento	20.61	3.90	15.70
5.5 a 10.5	Arena arcillosa de grano fino marrón con intercalaciones de arcilla gris	27.83	16.78	16.68
10.5 a 12	Arcilla gris oliva	76.10	88.83	15.30
12 a 25	Arena de grano fino marrón	27.98	15.49	15.01
25 a 30	Arena arcillosa de grano fino marrón	28.19	23.35	20.60
30 a 40	Arcilla limosa gris oliva a marrón	25.03	12.32	15.21
40 a 44	Arena de grano fino marrón	28.95	15.42	20.99
44 a 65	Arcilla arenosa marrón a gris	22.92	14.63	16.06
65 a 70	Arena de grano fino marrón con intercalaciones de arcilla arenosa gris	22.00	25.55	19.37
70 a 110	Arcilla arenosa marrón amarillento	21.40	20.06	20.11
110 a 150	Arena arcillosa de grano muy fino marrón amarillento	21.43	17.67	18.64

Tabla 3.31. Perfil típico “CTIMI”

3.4.15 Estación Parque el Tunal “CTUNA”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 50 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 50 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 1.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con seis materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 3	Arcilla limosa a arena arcillosa marrón oscuro con lentes de turba	23	18	19.35
3 a 8	Arcilla marrón	42	30	15.65
8 a 10.5	Arcilla orgánica gris	91	66	17.17
10.5 a 30	Arena algo arcillosa marrón de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	24	28	18.65
30 a 39.5	Arcilla limosa algo arenosa marrón	26	24	18.97
39.5 a 50	Arena gris verdoso de grano fino a grueso	10	3	18.15

Tabla 3.32. Perfil típico “CTUNA”

3.4.16 Estación Escuela de Tejedores “CTEJE”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 200 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 130 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con ocho materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 8	Arcilla gris carmelita de consistencia media, presenta intercalaciones de arena fina	30	26	15.21
8 a 14	Arena arcillosa de grano medio a arcilla arenosa café grisáceo con presencia de gravas finas	25	12	17.39
14 a 32	Arena algo limosa gris de grano fino a grueso con presencia de lentes de grava	25	12	17.69
32 a 35	Turba con trazas de arena	123	73	13.73
35 a 50	Arena limosa bien densa con intercalaciones de limos, arcillas y lentes de grava	25	12	19.91
50 a 65	Arcilla limo arenosa gris verdosa	29	23	18.54

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
65 a 110	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	21	18	20.40
110 a 130	Arena arcillosa de grano fino marron	21	18	20.40

Tabla 3.33. Perfil típico “CTEJE”

3.4.17 Estación Escuela General Santander “CGRAL”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 100 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 90 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con ocho materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 4	Arena	25	10	17.17
4 a 9	Arena	25	10	17.17
9 a 14	Arena	25	10	17.17
14 a 16	Arcilla	100	120	13.73
16 a 21	Arena	40	20	16.68
21 a 25.5	Arena	40	20	16.68
25.5 a 30	Arcilla orgánica	200	250	10.79
30 a 35	Arena	40	20	17.66
35 a 40	Arena	40	20	17.66
40 a 45	Arena	20	0	18.15
45 a 50	Arena	20	0	18.15
50 a 53	Arena	20	20	18.15
53 a 55	Arcilla	80	120	11.77
55 a 90	Arena	20	20	18.15

Tabla 3.34. Perfil típico “CGRAL”

3.4.18 Estación Col Kennedy “CCKEN”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Aluvial – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 250 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 5.0 m y la columna estratigráfica se caracterizó con dieciséis materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 5	Arcilla limosa gris verdosa	35	37	17.30
5 a 12	Arena limosa gris clara de grano fino	26	11	19.44
12 a 21	Arcilla limo arenosa café	40	50	15.99
21 a 24	Limo con turba	172	175	12.46
24 a 30	Arena arcillosa de grano fino	27	19	17.66
30 a 45	Arcilla limosa dura	30	15	16.77
45 a 50	Arena limosa de grano fino	23	18	19.82
50 a 65	Arcilla arenosa gris a marrón	37	31	17.66
65 a 70	Arena marrón de grano fino a arcilla limosa gris	16	26	18.64
70 a 110	Arcilla limosa algo arenosa café	24	23	18.44
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	24	18	19.36
132 a 147	Arcilla gris verdosa	34	30	17.17
147 a 159.5	Arena arcillosa marrón de grano fino	29	21	17.27
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	13	19.70
225 a 240	Arcilla limosa gris	28	16	20.31
240 a 250	Arena de grano fino ligeramente arcillosa	40	51	17.56

Tabla 3.35. Perfil típico “CCKEN”

3.4.19 Estación CITEC “CCITE” – Bomberos Puente Aranda “CARAN”

Esta estación se encuentra localizada en la zona de Lacustre Aluvial – 300 de la microzonificación de respuesta sísmica, con base en el mapa de espesor de sedimentos se propone una profundidad de depósito de 250 metros, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.6 m y la columna estratigráfica se caracterizó con trece materiales como se describe a continuación.

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2	Rellenos superficiales heterogéneos	31	38	14.72
2 a 6	Arcilla habana de consistencia dura	46	55	16.45
6 a 12	Arcilla limosa gris carmelita	69	80	14.62
12 a 17	Arena arcillosa a arcilla arenosa gris carmelita	31	34	14.96
17 a 35	Arcilla carmelita a gris claro con presencia de turba entre los 25-27m	79	86	14.12
35 a 44	Arena fina café con intercalaciones de limo	25	10	19.13
44 a 62	Arcilla limosa algo arenosa gris verdosa con lentes de turba	47	69	15.60
62 a 80	Arcilla limosa y/o limo arcilloso café de consistencia dura	37	38	16.91
80 a 96	Arena limosa con intercalaciones de arcilla y lentes de turba	24	16	18.34
96 a 159.5	Intercalaciones de arena fina con arcilla limo arenosa gris verdosa a gris marrón	34	30	17.87
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con presencia de lentes de arena	26	15	19.69
225 a 240	Arena de grano fino marrón con intercalaciones de arcilla	29	16	20.31
240 a 250	Arcilla arenosa marrón	38	47	17.56

Tabla 3.36. Perfil típico “CCITE”

3.5 SÍNTESIS

De acuerdo a los perfiles tipificados en la zonas de lacustre se encontró de manera general un predominio de materiales arcillosos de alta plasticidad y de consistencia blanda con presencia de dos o tres estratificaciones de turba y algunos lentes de arena aproximadamente hasta los 70 metros, de esta profundidad y hasta los 100 metros aproximadamente se encuentran arcillas de baja a alta plasticidad y de consistencias que varían entre firmes y blandas con intercalaciones de arenas arcillosas de grano fino de compacidades variables, segmento que se identifica como la formación Sabana, de este punto y profundizándose se identifican arcillas y limos de baja plasticidad, mezcladas o intercaladas con arenas finas, materiales que según la interpretación geológica son asociados con la formación Subachoque.

Por su parte los perfiles tipificados en la zona aluvial presentan de forma generalizada capas de arena y arcillas intercaladas de la superficie hasta el basamento, de manera similar que para la zona lacustre se identifican hasta tres estratos de turba desde la superficie hasta los 60 metros aproximadamente.

Adicionalmente se requiere complementar la exploración geotécnica directa o indirecta con el fin de reducir la incertidumbre en la estimación tanto del perfil como de las propiedades geomecánicas, específicamente en las estaciones de Cerros y piedemonte:

- Bomberos Marichuela “CMARI”
- Escuela de Artillería “CARTI”
- Academia de Policía “CPSUB”
- Escuela de Caballería “CESCA”
- Tanques de Vitelma “CVITE”
- CITEC “CCITE”
- COL Kennedy “CCKEN”
- Hospital San Juan de Dios “CDIOS”
- Club del Tiempo “CTIEM”
- Parque el Tunal “CTUNAL”

- Aluvial y Lacustre: Banco de la República “CBANC”
- Colegio Fernando Mazuera “CBOSA”
- Planta de Bombeo Fontibón “CFONT”
- Escuela General Santander “CGRAL”
- Universidad de la Salle “CUSAL”

CAPITULO 4

4 SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA MODELACIÓN

Este capítulo presenta el análisis particular de las señales registradas por la RAB en el evento sísmico de Quetame Cundinamarca del 24 de mayo del 2008, en consonancia con las zonas de respuesta sísmica y con el propósito de verificar la influencia de la duración de las señales en la respuesta medida tanto en superficie como en roca, de tal forma que se identifique el rango temporal para realizar la comparación de los espectros en los procesos de modelación realizados con posterioridad.

4.1 METODOLOGÍA

Para comparar la respuesta sísmica medida en las estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá y la obtenida por los modelos de respuesta unidimensional, se procedió con la elaboración de los espectros de aceleraciones siguiendo la metodología de las ventanas de tiempo, la cual busca representar únicamente el periodo de tiempo en el cual el sistema se encuentra en vibración forzada, con lo cual se garantiza que las ondas que dominan la excitación del depósito son las ondas de cuerpo y no las de superficie, esto con el objeto de poder emplear modelos unidimensionales de propagación vertical de ondas (Ley de Snell) y de esta manera obtener un mejor nivel de representatividad en el proceso de modelación.

Para ilustrar el procedimiento anteriormente descrito se presenta en la **Figura 4.1** un ejemplo para la estación de Ingeominas en el que se separa en el acelerograma el pre-evento, el movimiento forzado y el movimiento libre amortiguado, para de esta manera obtener los correspondientes espectros de respuesta tanto en roca como en superficie presentados en la **Figura 4.2** para diferentes ventanas de tiempo quitando el pre-evento, observándose las principales diferencias en los espectros ocurren a periodos de más de 1.4 segundos para los cuales domina la respuesta las ondas de superficie como las Rayleigh y las Love que no pueden representarse en modelos en una dimensión.

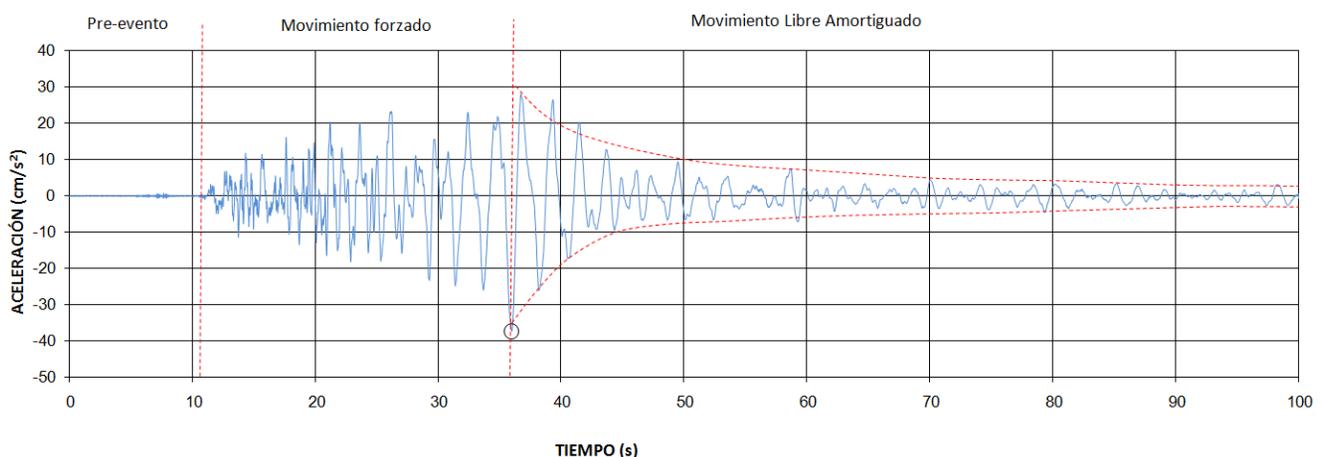


Figura 4.1. Acelerograma evento Quetame estación Ingeominas CBOG1 en superficie "SH"

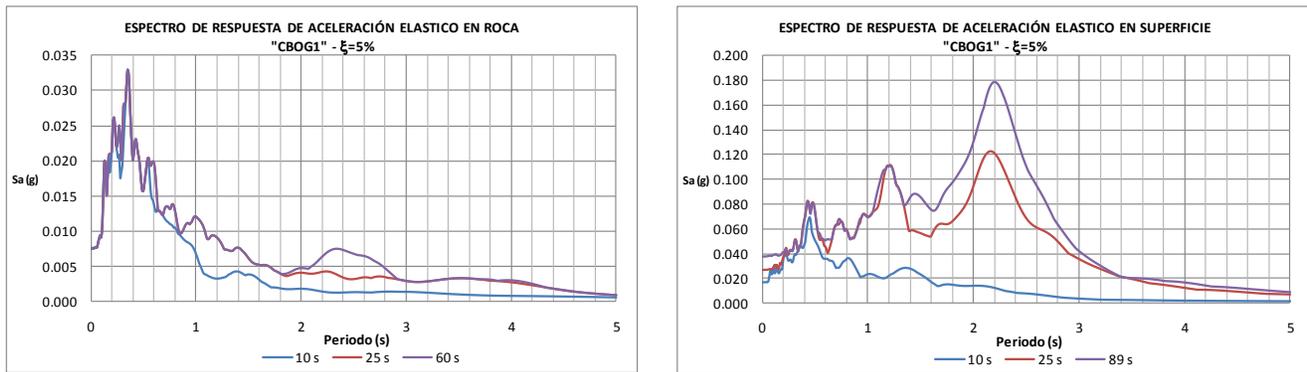


Figura 4.2. Espectros de de respuesta de aceleración elásticos CBOG1 en roca y superficie

4.2 SISMO DE QUETAME

El sismo de Quetame – Cundinamarca ocurrió el día 24 de mayo de 2008 a las 14:20 hora local, 26 estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá RAB y 3 estaciones de Ingeominas registran el evento. El epicentro se localizó a 8.6 km al noreste de la cabecera municipal de Quetame, en las coordenadas 4.399° N y 73.814°W, catalogado como un evento de origen superficial de magnitud local “ML” 5.7 y magnitud de momento “Mw” 5.9. el evento se localiza aproximadamente a una distancia en línea recta de 35 a 40 m de los cerros orientales, a 42 km de la estación de Ingeominas y a 50 km del Parque La Florida en la ciudad de Bogotá. El análisis del mecanismo focal indica que el plano de falla posee un azimut de 198°, un buzamiento de 83° y corresponde a una falla de rumbo lateral derecha, evento asociado a la falla el naranjal.¹

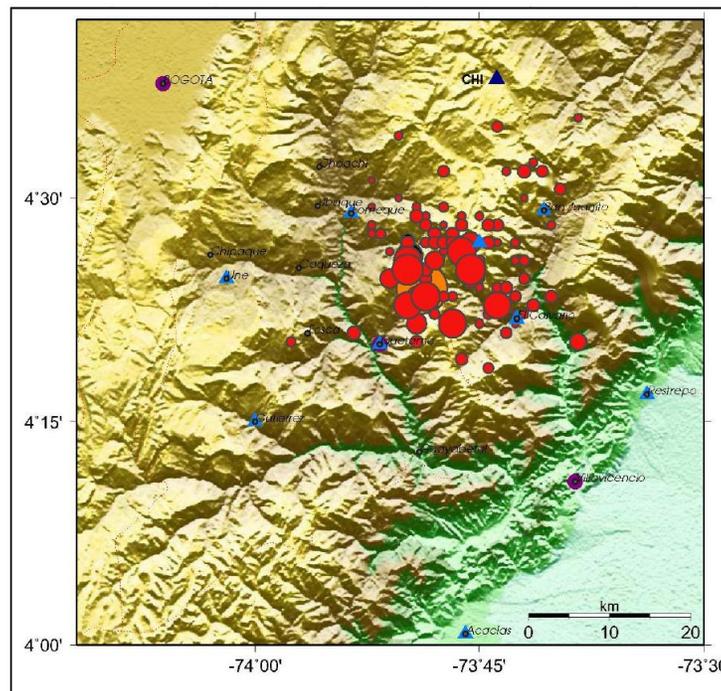


Figura 4.3. Localización del epicentro y réplicas del sismo de Quetame (Ingeominas, 2008)

¹ Informe Preliminar No.2. Aspectos Sismológicos y evaluación preliminar de daños, INGEOMINAS, junio de 2008.

4.3 ESPECTROS DE RESPUESTA

A continuación se presenta los espectros de respuesta calculados por el procedimiento descrito de ventanas de tiempo, en donde se agruparán cada una de las estaciones que registraron el evento de acuerdo a la zona de respuesta correspondiente a la que pertenecen.

4.3.1 Estaciones de cerros

En esta zona de respuesta sísmica se encuentran cinco estaciones, en el sur oriente de la ciudad se ubican las estaciones de Sierra Morena en los cerros de Ciudad Bolívar y la estación Vitelma en la localidad de San Cristóbal, en el centro oriente se encuentra la estación del Colegio San Bartolomé, en el Nororient se localiza la estación Escuela de Caballería y en los cerros de suba la estación TV Cable. Nótese en los espectros calculados que no hay efecto de ondas de superficie, debido a que estas estaciones se encuentran localizadas en unidades superficiales de roca, por esta misma circunstancia la respuesta dominante del terreno se presenta a bajos periodos, especialmente a periodos fundamentales de 0.2, 0.4 y 0.9 segundos aproximadamente.

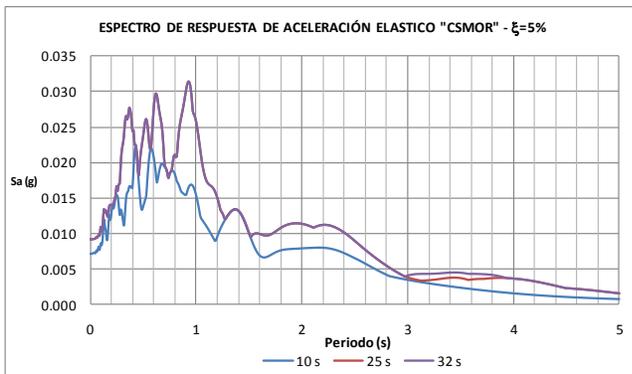


Figura 4.4. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Sierra Morena

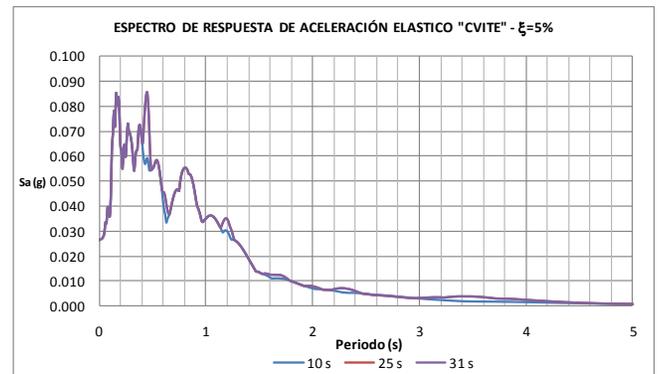


Figura 4.5 Espectro de respuesta de aceleraciones estación Vitelma

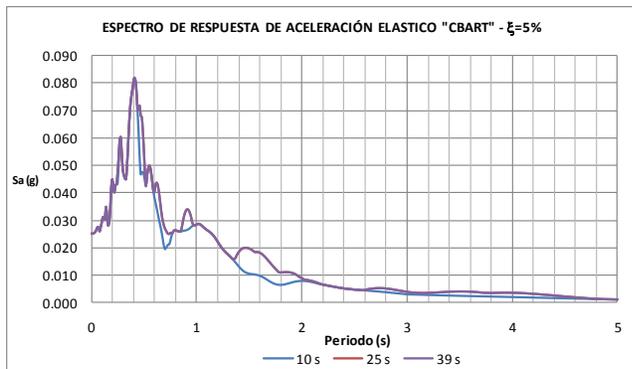


Figura 4.6. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colegio San Bartolomé

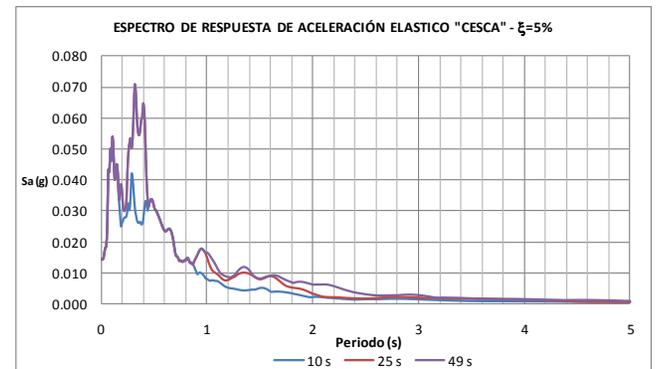


Figura 4.7. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela de Caballería

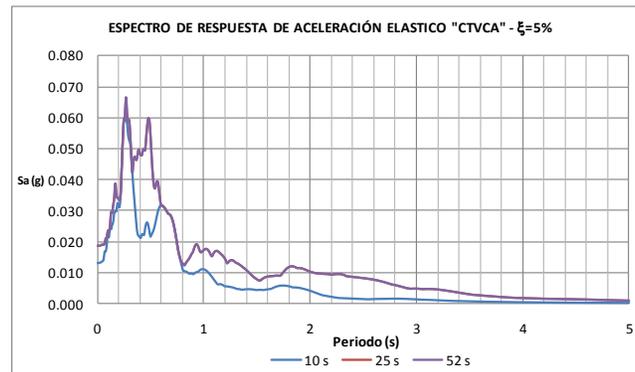


Figura 4.8. Espectro de respuesta de aceleraciones estación TVCABLE

4.3.2 Estaciones en depósitos de ladera

En esta zona de respuesta sísmica se encuentran dos estaciones, en el sur oriente de la ciudad la estación de Bomberos Marichuela y en el centro oriente la estación Universidad Manuela Beltrán. Se observa que los niveles de amplificación son aproximadamente iguales pese a que las estaciones se encuentran distantes, sin embargo en términos de periodos fundamentales la respuesta se encuentra concentrada entre los 0.2 y 0.4 segundos, las diferencias específicas entre una y otra estación son principalmente controladas por las características morfológicas del depósito que determinan el efecto topográfico del terreno, adicionalmente no se aprecian efectos de ondas superficiales en los espectros calculados.

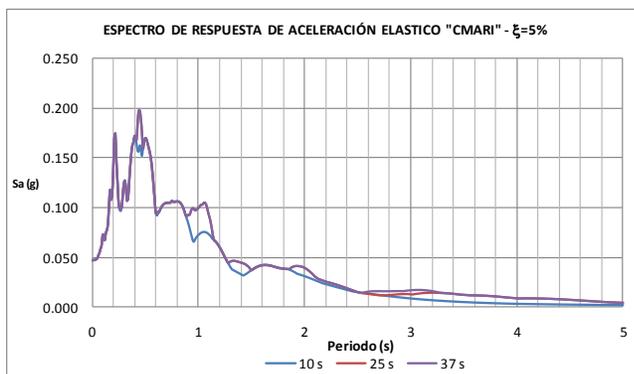


Figura 4.9. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Bomberos Marichuela.

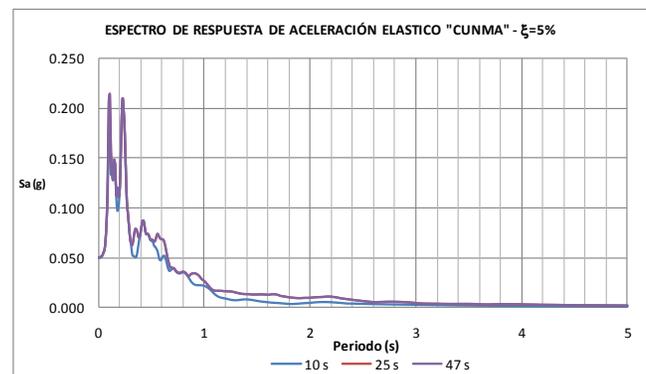


Figura 4.10. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad Manuela Beltrán

4.3.3 Estaciones en piedemontes

En esta zona de respuesta sísmica se localizan dos estaciones, en el nororiente de la ciudad Colonia Escolar de Usaquén y Universidad de la Salle. Nótese que en esta zona es visible el efecto de ondas superficiales principalmente en periodos de más de 1.2 segundos, el periodo fundamental de mayor amplificación se encuentra entre los 0.45 a 0.65 segundos, sin embargo la amplificación en la estación de Usaquén es mayor, también se observa amplificaciones considerables para periodos alrededor de los 1.1 y 2.0 segundos atribuibles a la influencia de la vibración de las zonas de lacustre 50 que colindan con la zona de piedemonte.

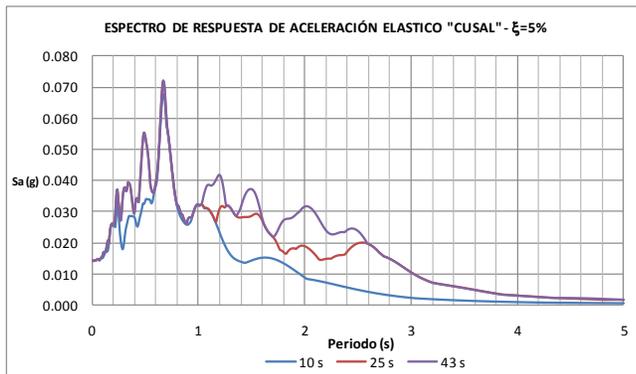


Figura 4.11. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad de la Salle.

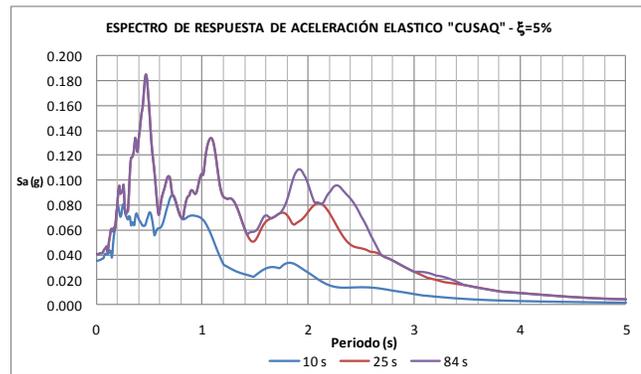


Figura 4.12. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colonia Escolar de Usaquén

4.3.4 Estaciones de lacustre

Esta zona de respuesta sísmica es la de mayor extensión en la ciudad y en ella se encuentran localizadas diez estaciones, en el lacustre 50 al noroccidente de la ciudad se encuentra la estación del Banco de la Republica, en la zona de lacustre 200 se localizan en el norte las estaciones de Escuela Colombiana de Ingeniería y Uniagraria y en el centro se halla Ingeominas, en el lacustre 300 al occidente se encuentra el Centro de Estudios del Niño, jardín Botánico y Universidad Corpas, en el lacustre 500 se ubican el edificio de Avianca, el Club del Tiempo y Parque la Florida.

Específicamente en la zona lacustre el efecto de las ondas de superficie son más visibles sobre todo para depósitos de suelo superiores a los 100 metros, esta zona se caracteriza en tres periodos fundamentales el primero alrededor de los 0.4 segundos de menor amplificación, posteriormente un pico intermedio entre 0.8 y 1.2 segundos, finalmente un periodo dominante entre 1.8 y 2.2 segundos para depósitos entre 100 y 300 m de profundidad y entre 2.6 y 3.0 segundos para depósitos más profundos, aunque para estos últimos las amplificaciones medidas no fueron considerables debido a la baja energía del sismo registrado. Adicionalmente se observa un efecto de amplificación para periodos de más de 2.0 segundos en los registros de roca en las estaciones con sensor Downhole (Uniagraria, Ingeominas), este comportamiento se asocia con el proceso de reflexión de las ondas, las cuales no corresponden al tren de ondas principal del sismo (ver **Figura 4.16** y **Figura 4.18**).

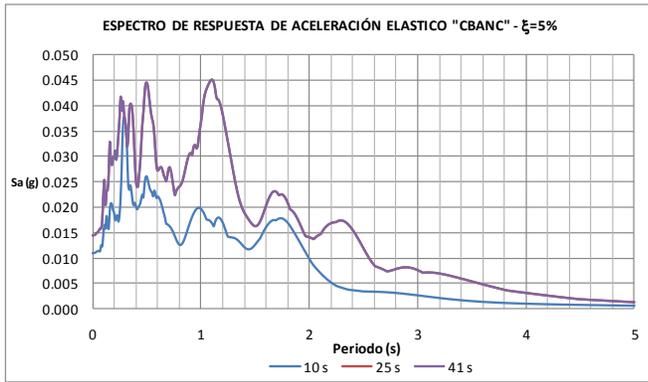


Figura 4.13. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Club Banco de la Republica

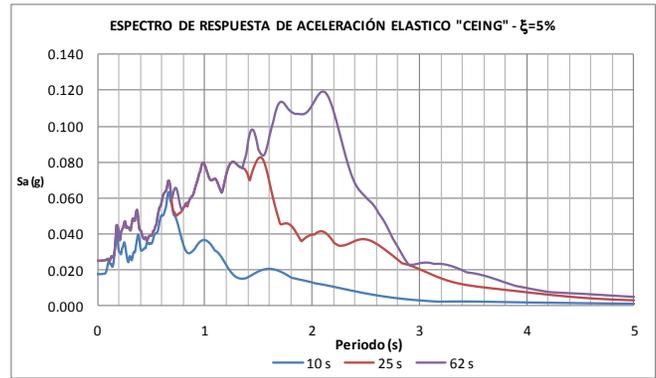


Figura 4.14. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela Colombiana de Ingeniería

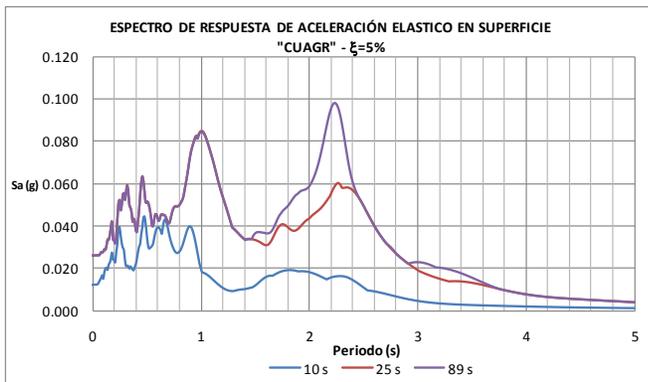


Figura 4.15. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Uniagraria - Superficie

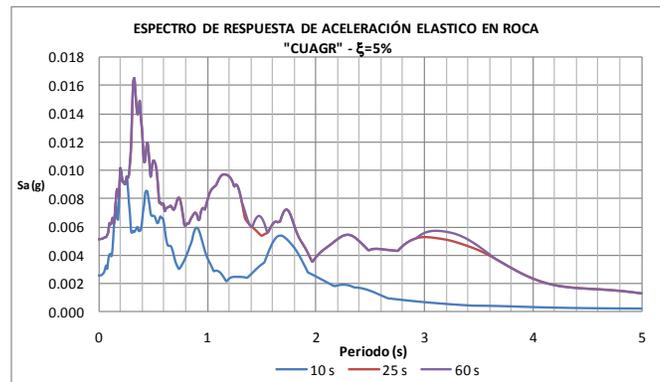


Figura 4.16. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Uniagraria - Roca

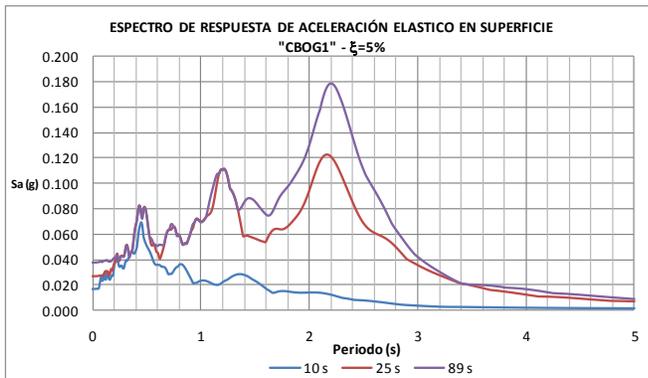


Figura 4.17. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Ingeominas - Superficie

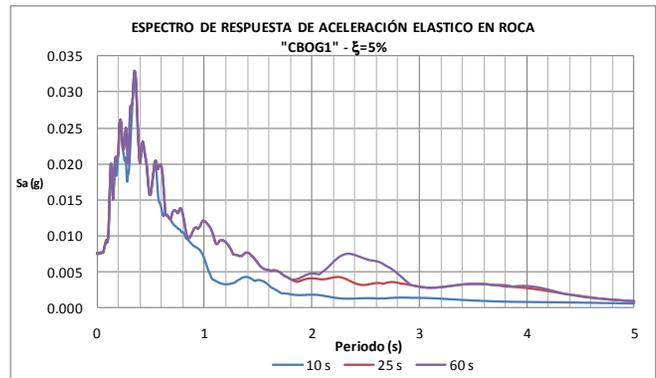


Figura 4.18. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Ingeominas - Roca

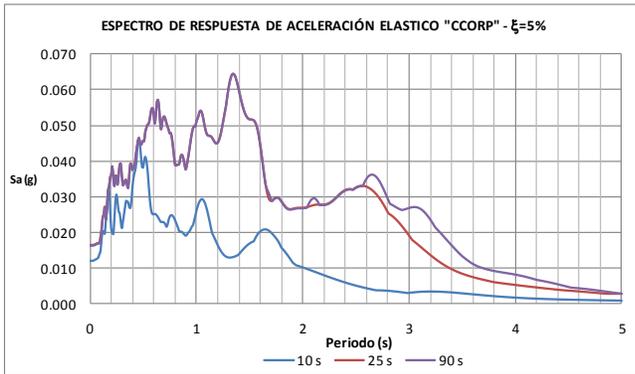


Figura 4.19. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Universidad Corpsas

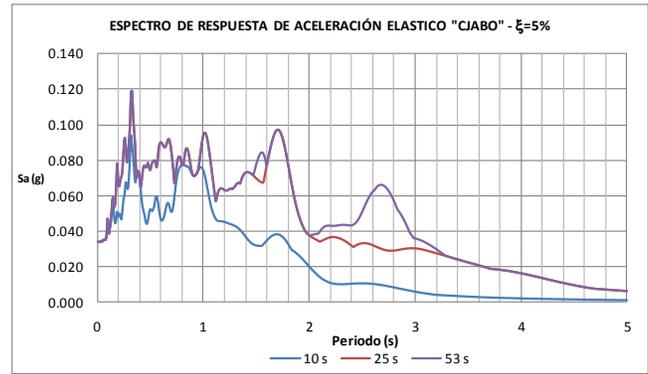


Figura 4.20. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Jardín Botánico

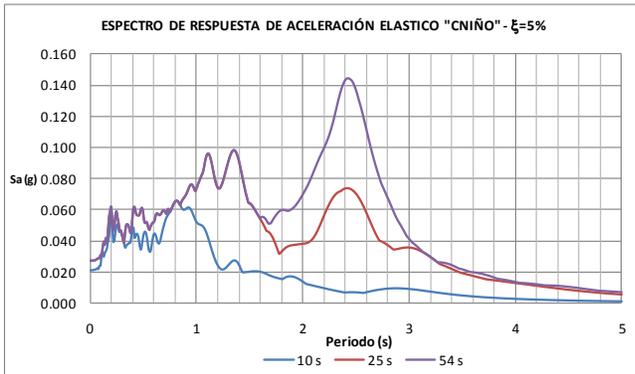


Figura 4.21. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Centro de Estudios del Niño

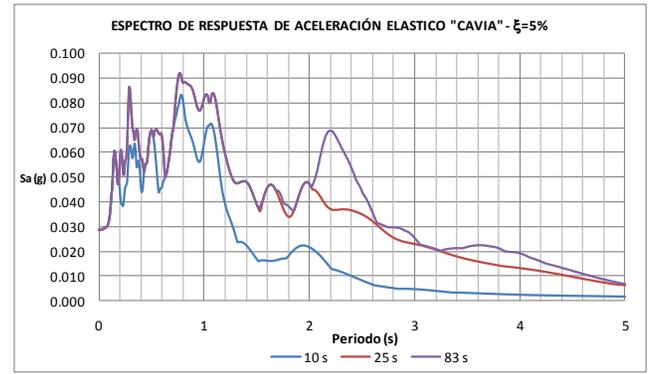


Figura 4.22. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Avianca

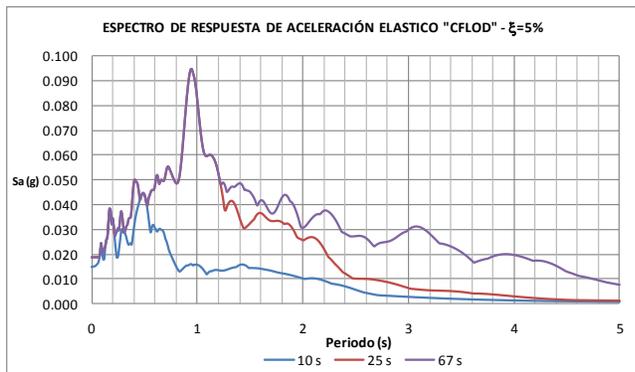


Figura 4.23. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Parque la Florida

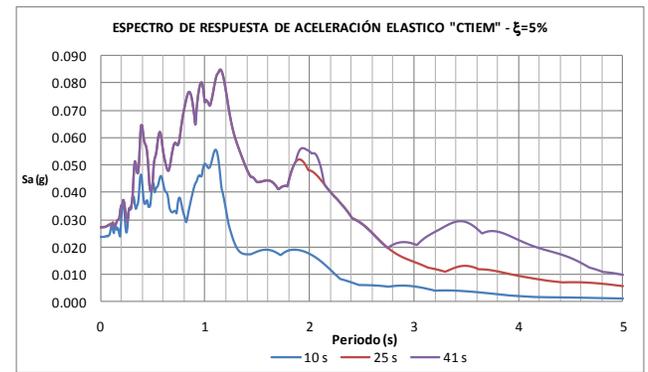


Figura 4.24. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Club El Tiempo

4.3.5 Estaciones de lacustre - aluvial

Esta zona de respuesta sísmica corresponde a la transición entre la zona lacustre y la zona aluvial, en donde se localizan dos estaciones, CITEC Y Planta de Bombeo Fontibón ambas ubicadas en lacustre aluvial 300. Nótese que el comportamiento que exhibe la estación CITEC se asemeja bastante al de la zona aluvial 200 mientras que la estación de la Planta de Bombeo de Fontibón tiene más correspondencia con las estaciones ubicadas en la zona profunda de lacustre.

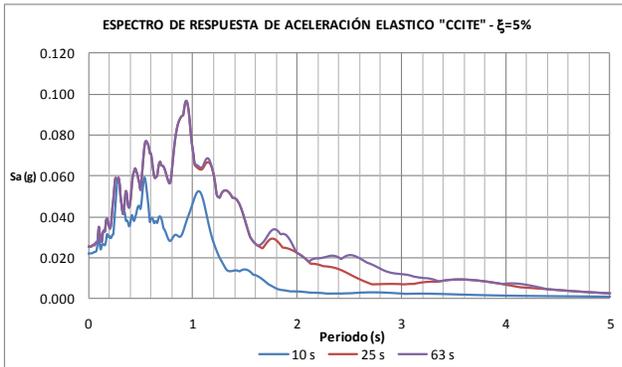


Figura 4.25. Espectro de respuesta de aceleraciones estación CITEC

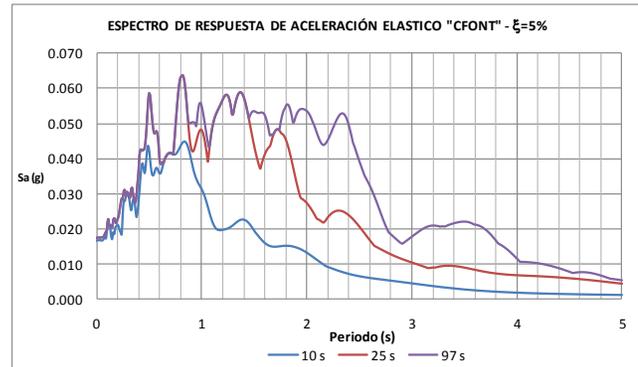


Figura 4.26. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Planta de Bombeo Fontibón

4.3.6 Estaciones de aluvial

En esta zona de respuesta sísmica se encuentran localizadas seis estaciones, en aluvial 50 al suroriente se encuentra la estación Tunal, en la zona de aluvial 100 se localizan las estaciones de Escuela de tejedores, General Santander y Colegio Fernando Mazuera, en el aluvial 200 se encuentra la estación Parque Timiza y finalmente en la zona aluvial 300 se encuentra la estación Col. Kennedy.

En la zona aluvial el efecto de las ondas de superficie es menor que en las zonas de lacustre pero igualmente visible, sobre todo para depósitos de suelo superiores a los 100 metros, esta zona se caracteriza en tres periodos fundamentales el primero alrededor de los 0.5 segundos, posteriormente un pico alrededor de 1.0 segundo, finalmente un periodo de aproximadamente 2.0 segundos pero de menor amplitud que los anteriores, la estación Col Kennedy ubicada en la zona más profunda difiere un poco de este comportamiento en parte por la baja energía liberada por el sismo. Adicionalmente se observa que el espectro calculado para la señal en roca en la estación de Escuela General Santander presenta un comportamiento atípico frente a la respuesta obtenida del resto de sensores en roca, razón por la cual se presume que este sensor no se encuentra localizado en el basamento rocoso, lo que con lleva a limitar el uso de esta señal para efectos de calibración de modelos (ver Figura 4.32).

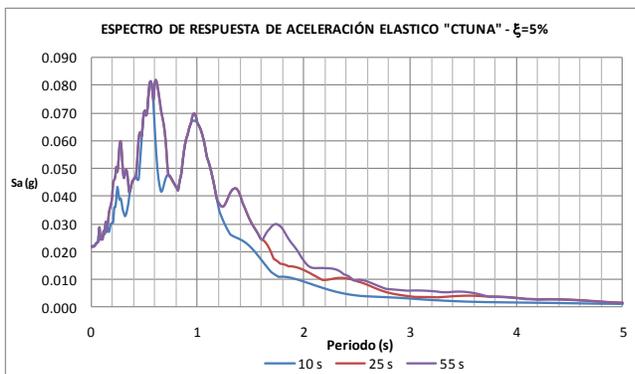


Figura 4.27. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Tunal

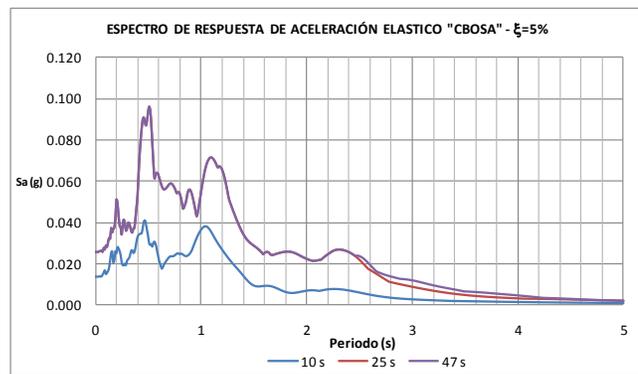


Figura 4.28. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Colegio Fernando Mazuera

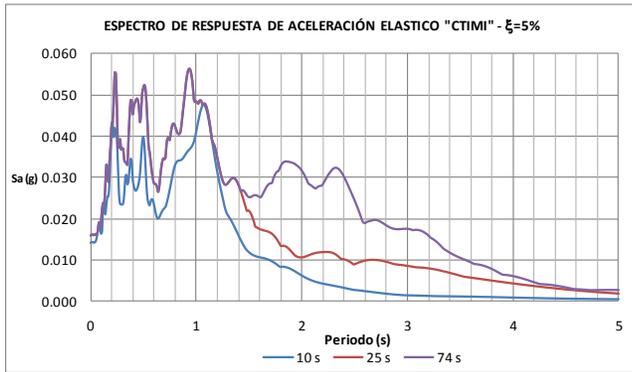


Figura 4.29. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Parque Timiza

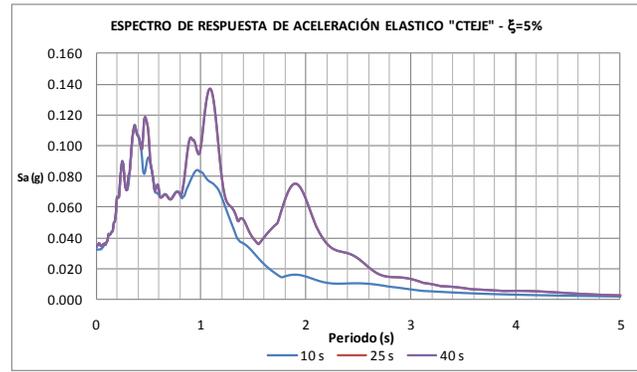


Figura 4.30. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela Tejedores

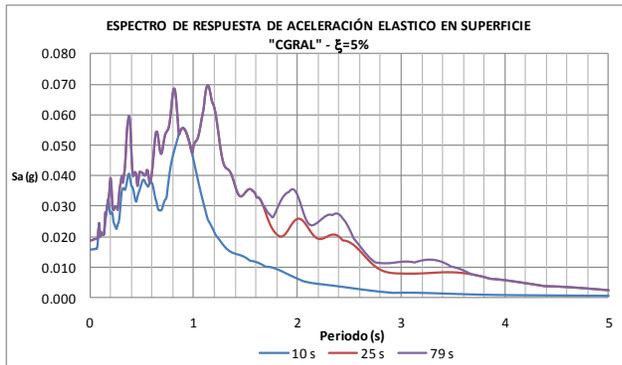


Figura 4.31. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela General Santander - Superficie

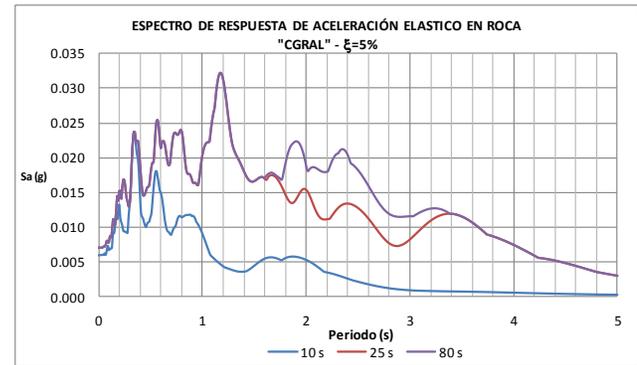


Figura 4.32. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Escuela General Santander - Roca

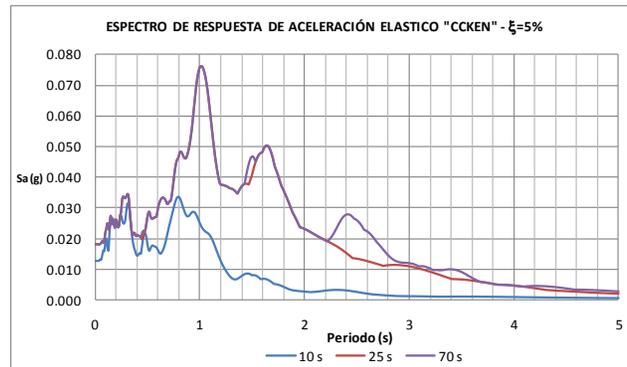


Figura 4.33. Espectro de respuesta de aceleraciones estación Col. Kennedy

4.4 SÍNTESIS

Las señales seleccionadas para representar la excitación sísmica a nivel del basamento rocoso son las medidas en las estaciones con sensor Down Hole como Uniagraria (CUAGR), Ingeominas (CBOG1) y en menor medida la estación de la Escuela General Santander (CGRAL) debido a incertidumbres relacionadas con el nivel de referencia en roca en el cual fue instalado (ver Figura 4.31), también se emplearon en este proceso las señales de las estaciones ubicadas en afloramientos rocosos dentro de las que se encuentran Escuela de Caballería (CESCA), TVCABLE (CTVCA) y Colegio Sierra Morena

(CSMOR). Estas señales se tuvieron el tratamiento descrito en la sección 4.1 del presente informe en lo relacionado a las ventanas de tiempo, seleccionando así las señales recortadas a 25 segundos en las estaciones “CUAGR”, “CBOG1”, “CTVCA” y “CESCA” para evaluaciones en los depósitos de lacustre y señales recortadas a 12 y 15 segundos para las estaciones “CGRAL” y “CBOG1” en especial para los depósitos aluviales. Para los análisis presentados en este informe se trabajó con las señales en sentido transversal es decir en la dirección de mayor contenido de ondas de corte.

CAPITULO 5

5 MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL

Este capítulo presenta la valoración de la respuesta sísmica del depósito de suelos de la ciudad de Bogotá, obtenido a partir de modelos de respuesta unidimensionales, considerando como excitación sísmica la inducida por el sismo de Quetame - Cundinamarca. Estas valoraciones contemplaron tres actividades, la primera relacionada a la selección e interpretación de señales tanto en roca como en superficie a partir de la técnica de ventanas de tiempo que se ilustra en el capítulo 4, la segunda actividad correspondió en evaluar algunas de las propiedades dinámicas del depósito de suelos de la ciudad de Bogotá para los sitios en los cuales se encuentran localizadas las estaciones de la red de acelerógrafos de Bogotá – RAB (estaciones Down Hole y en superficie) por último se emplean modelos unidimensionales del tipo lineal equivalente para evaluar la respuesta sísmica en superficie.

El análisis de respuesta unidimensional se realizó por medio del software EERA, 2000, que soluciona la ecuación de movimiento en una formulación desacoplada en esfuerzos totales en el dominio de las frecuencias, a partir de la implementación de un modelo lineal equivalente, que busca representar el comportamiento no lineal del suelo empleando un sistema lineal elástico amortiguado bajo el enfoque del método de los elementos finitos (Bardet, 2000).

El modelo empleado para la obtención de las curvas dinámicas de los materiales corresponde al propuesto por Díaz-Parra, 2007, que parte de las formulaciones propuestas por Stokoe, 2004 y Matasovic, 1993, La ventaja de emplear este modelo es que fue desarrollado para el ambiente geológico local y sus resultados han sido debidamente comprobados en los proyectos de microzonificación sísmica ejecutados en la ciudad. El procedimiento para obtener las curvas de degradación del módulo y amortiguamiento se resume en: determinar la relación de vacíos y estado de esfuerzos promedio del material analizado, calcular los parámetros dinámicos γ_{ref} y D_{min} y obtener los valores de degradación del módulo (G/G_0) y amortiguamiento (D) para los niveles de deformación cortante de interés.

5.1 METODOLOGÍA

El proceso de calibración de los perfiles geotécnicos elaborados en el capítulo 3 del presente informe y de los sitios con sensor Down Hole consistió en modificar gradualmente las velocidades de onda cortante de referencia de acuerdo al intervalo de variación estimado, relacionando para este fin el tipo de material y las propiedades básicas en consideración, de manera tal que la respuesta del modelo lograra reproducir en términos de amplitud y periodos dominantes, la respuesta medida en superficie en la estación. El proceso para la calibración de los modelos de respuesta dinámica unidimensional se resume en los siguientes pasos:

1. Definir el perfil estratigráfico del sitio con sus respectivas propiedades geotécnicas.
2. Definir las curvas de degradación y amortiguamiento de los materiales que componen el perfil.
3. Selección de señales por ventanas de tiempo.
4. Adoptar un perfil de velocidad de onda cortante.
5. Verificar que los valores promedio de la velocidad de onda y amortiguamiento estén de acuerdo con las mediciones in situ.

6. Modelar la respuesta dinámica y calcular el espectro de respuesta en superficie.
7. Comparar con el espectro de respuesta medido en amplitud y periodos dominantes.
8. Si el resultado es satisfactorio el modelo se considera adecuado.
9. Si el resultado no es satisfactorio se procede a modificar gradualmente las velocidades de onda cortante de referencia de acuerdo con su intervalo de variación estimado y se vuelve al paso 6.

Cabe anotar que los registros sísmicos empleados en la calibración de las propiedades dinámicas corresponden a un sismo de baja energía, por lo tanto se espera que la respuesta del depósito se efectúe en el rango de bajas deformaciones, caracterizado por un comportamiento lineal, representado a su vez por la no degradación de la rigidez y por amortiguamientos bajos que se manifiestan en la respuesta del depósito en amplificaciones considerables respecto a los registros en roca.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir del retro análisis realizados en veinte estaciones localizadas en la planicie de Bogotá, tres de ellas con sensores down hole, con lo cual se logra cubrir el amplio espectro de posibilidades en términos de respuesta sísmica en la ciudad tanto en términos de la profundidad del depósito de suelos como también en lo relacionado con la textura y consistencia de los materiales cubriendo tanto la zona de depósito de suelos blandos, como la zona de suelos aluviales y sus correspondientes transiciones.

5.2 ESTACIONES DE PIEDEMONTE

Dos de las estaciones se encuentran localizadas en la zona de piedemonte A en el nororiente de la ciudad, Universidad de la Salle y Colonia Escolar de Usaquén. Debido a la heterogeneidad de los materiales y a influencia de las zonas vecinas el comportamiento presentado es heterogéneo, sin embargo se distinguen tres modos de vibración a 1.7, 1.1 y 0.7 segundos, la amplificación es del orden de 10 veces la registrada en roca y la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 170 y 190 m/s y para el depósito completo varía entre 190 y 220 s m/s.

5.3 ESTACIONES LACUSTRE

La zona lacustre se encuentra representada por un total de 10 estaciones de la RAB que abarcan de manera general esta unidad de respuesta, en sus cinco sub-zonas para las cuales se comentan los resultados obtenidos a continuación.

Lacustre 200 o menos: Esta región cuenta con cuatro estaciones, dos de las cuales son del tipo down hole, se encontró de las modelaciones realizadas en base a las respuestas medidas del sismo de Quetame, que el terreno exhibe dos modos fundamentales de vibración, que para depósitos de menos de 100 metros se encuentran a 1,5 y 1,2 segundos aproximadamente y el nivel de amplificación está entre 5 y 10 veces respecto al nivel de aceleraciones registrados en roca, la velocidad de onda de corte promedio esta alrededor de los 140 m/s. por su parte los depósitos de 100 a 200 metros presentan modos fundamentales de vibración a 2.6 y 1.1 segundos aproximadamente, con niveles de amplificación entre 8 y 13 veces, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 100 y 160 m/s y para el depósito completo varía entre 190 y 220 m/s para las estaciones en el norte y alrededor de los 280 m/s para las del centro de la ciudad (Ingeominas).

Lacustre 300: Esta zona cuenta con tres estaciones, todas localizadas en superficie, se encontró de las modelaciones realizadas en base a las respuestas medidas del sismo de Quetame, que el terreno exhibe dos modos fundamentales de vibración, el primero entre 3.5 y 3.8 segundos y el segundo entre 1.4 y 1.7 segundos, la variación tiene una relación directa con la profundidad del depósito, los niveles de amplificación para el primer modo son del orden de 8 a 20 veces respecto al nivel de aceleraciones registrados en roca, para el segundo modo el nivel de amplificación se encuentra entre 12 y 14 veces, se resalta la visible excitación para el conjunto de los periodos entre 0,3 a 1 segundo que amplifican entre 5 y 8

veces, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 115 y 140 m/s y para el depósito completo varía entre 260 y 290 m/s.

Lacustre 500: Esta zona contiene tres estaciones que varían respecto al espesor del depósito entre 360 a 500 metros, las respuestas modeladas exhiben 3 modos fundamentales de vibración aunque debido a la baja energía del sismo solo se observan amplificaciones considerables en los modos de periodo más bajo, el primer modo presenta un periodo entre 4.9 y 5.8 segundos, el segundo entre 1.8 y 2.4 segundos y el último entre 0.9 y 1.5 segundos. En el primer modo las amplificaciones son del orden de 7 a 10 veces, en el segundo y tercer modo las amplificaciones son del orden de 6 a 8 veces, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 120 y 140 m/s, la velocidad de onda de corte promedio para los depósitos de menos de 400 metros es del orden de los 280 m/s y para profundidades mayores se tienen velocidades del orden de los 340 m/s.

5.4 ESTACIONES LACUSTRE ALUVIAL

La zona de lacustre aluvial 300 cuenta con dos estaciones una hacia el segmento medio de la zona y otra más distal, en las que se identifican tres modos fundamentales de vibración, el primero entre los 3.5 y 4.0 segundos, el segundo entre 1.4 y 1.8 segundos y el tercero con periodos entre 0.8 y 1.2 segundos, se distinguen amplificaciones del orden de 6 a 9 veces, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 105 y 185 m/s y para el depósito completo varía entre 270 y 290 m/s.

5.5 ESTACIONES ALUVIAL

La zona aluvial se encuentra representada por seis estaciones distribuidas en cada una en dos sub-zonas para las cuales se comentan los resultados obtenidos a continuación.

Aluvial 200 o menos: Esta región cuenta con cinco estaciones, una de ellas tipo down hole, se encontró que la respuesta de terreno exhibe tres modos fundamentales de vibración que varían conforme a la profundidad del depósito, que se encuentran a 2.1, 1.2 y 0.5 segundos aproximadamente, el nivel de amplificación está entre 4 y 9 veces respecto al nivel de aceleraciones registrados en roca, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m varía entre 200 y 270 m/s y para el depósito completo varía entre 270 y 300 m/s.

Aluvial 300: Esta zona cuenta con tan solo una estación, la cual presenta tres modos de vibración a 4.0, 1.4 y 0.9 segundos con amplificación del orden de 7 veces en relación con las aceleraciones registradas en roca, la velocidad de onda de corte para los primeros 50 m es de 180 m/s y para el depósito completo es de 250 m/s.

• Universidad de la Salle - Piedemonte

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CUSAL 1	1	CH	Arcilla de alta plasticidad	0	5	25.00	0.694	100.00	1.55	170	127
CUSAL 2	2	CH	Arcilla de alta plasticidad	5	10	25.00	0.694	100.00	1.55	170	148
CUSAL 3	3	CH	Arcilla de alta plasticidad	10	15	25.00	0.694	100.00	1.55	170	157
CUSAL 4	4	SM	Arena limosa gris	15	20	10.00	0.534	24.00	1.75	215	209
CUSAL 5	5	SM	Arena limosa gris	20	25	10.00	0.534	24.00	1.75	215	218
CUSAL 6	6	SM	Arena limosa gris	25	30	10.00	0.534	24.00	1.75	230	242
CUSAL 7	7	SM	Arena limosa gris	30	35	10.00	0.534	24.00	1.75	230	249

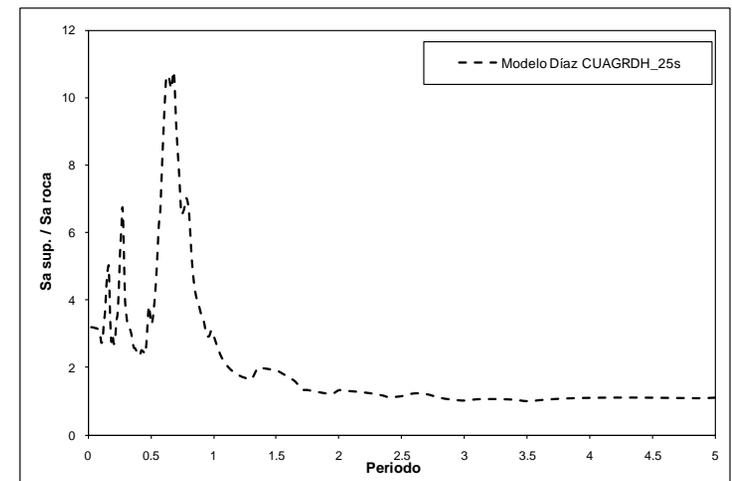
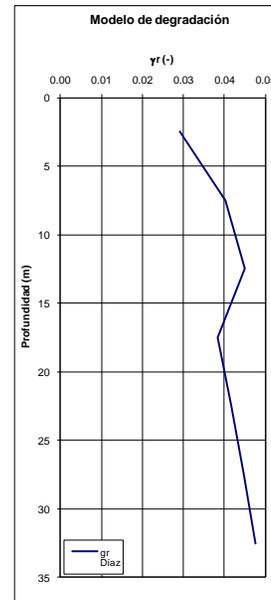
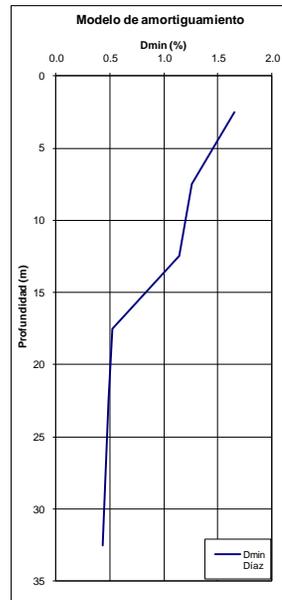
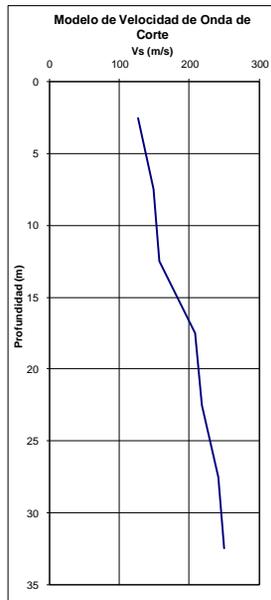
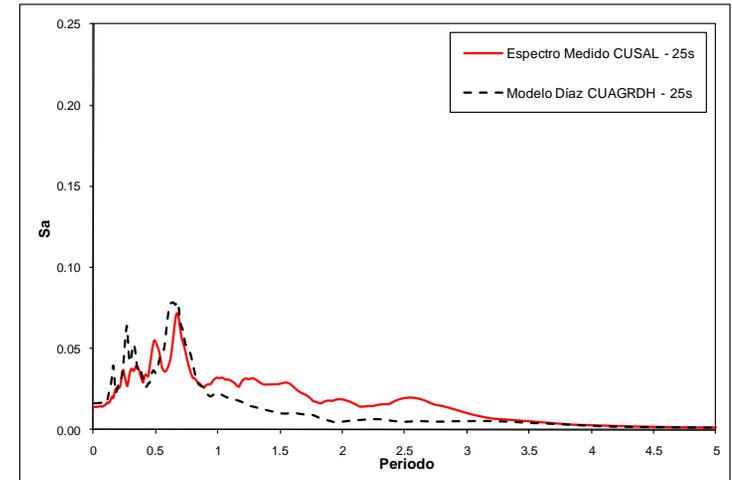


Figura 5.1. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CUSAL"

● Colonia Escolar de Usaquén - Piedemonte

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CUSAQ 1	R		Relleno heterogeneo	0	2.4	25.85	0.714	16.43	1.74	180	127
CUSAQ 2	CH		Arcilla café oscuro con raices	2.4	3.5	81.50	2.050	39.70	1.74	150	123
CUSAQ 3	ML		Limo arenoso café con lentes de grava	3.5	8	53.70	1.383	68.10	1.77	150	132
CUSAQ 4	ML		Limo arenoso café con lentes de grava	8	13.5	53.70	1.383	68.10	1.77	150	142
CUSAQ 5	ML		Limo arenoso café con lentes de grava	13.5	19.5	53.70	1.383	68.10	1.77	150	150
CUSAQ 6	SP		Arena fina organica café	19.5	21.3	20	0.774	0	1.80	240	248
CUSAQ 7	MH		Limo arcilloso organico café con lentes de arena	21.3	26	60.57	1.548	35.86	1.70	80	84
CUSAQ 8	MH		Limo arcilloso organico café con lentes de arena	26	32	60.57	1.548	35.86	1.70	80	87
CUSAQ 9	MH		Limo arcilloso organico café con lentes de arena	32	37.8	60.57	1.548	35.86	1.70	210	234
CUSAQ 10	SP		Arena fina café	37.8	41.2	22.20	0.827	0	1.85	240	273
CUSAQ 11	MH		Limo organico café de consistencia alta	41.2	43.3	29.00	0.790	35.80	1.50	210	242
CUSAQ 12	GP		Gravas gruesas de color gris con lentes de arena	43.3	46	14.90	0.652	14.50	1.65	280	324
CUSAQ 13	ML		Limo arcilloso gris	46	50	29.00	0.790	35.80	1.55	210	246
CUSAQ 14	ML		Limo arcilloso gris	50	55	29.00	0.990	35.80	1.55	210	248
CUSAQ 15	ML		Limo arcilloso gris	55	60	29.00	0.990	35.80	1.55	220	263
CUSAQ 16	ML		Limo arcilloso gris	60	65	29.00	0.990	35.80	1.55	220	266
CUSAQ 17	ML		Limo arcilloso gris	65	70	29.00	0.990	35.80	1.55	220	269
CUSAQ 18	ML		Limo arcilloso gris	70	95	29.00	0.990	35.80	1.55	220	276

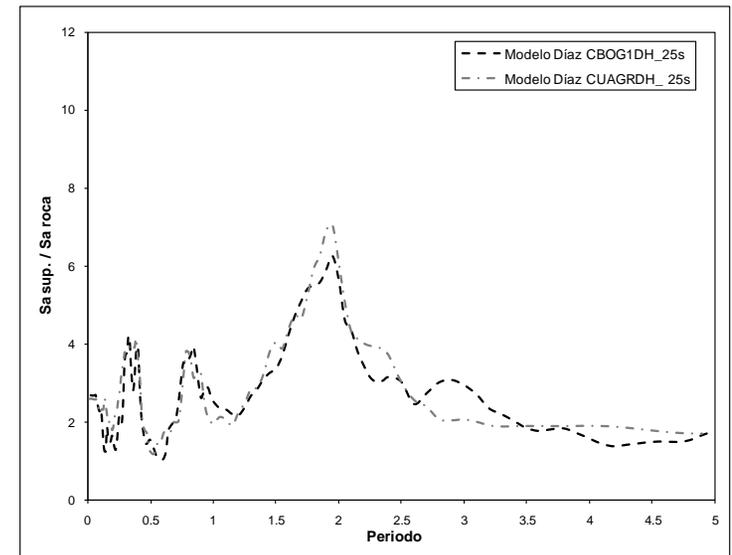
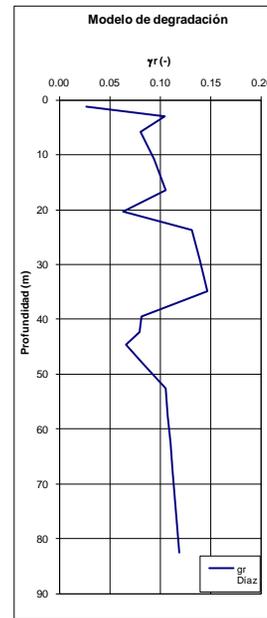
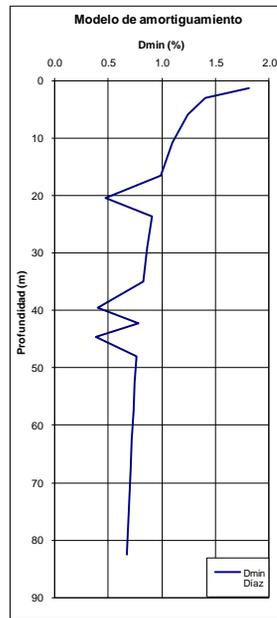
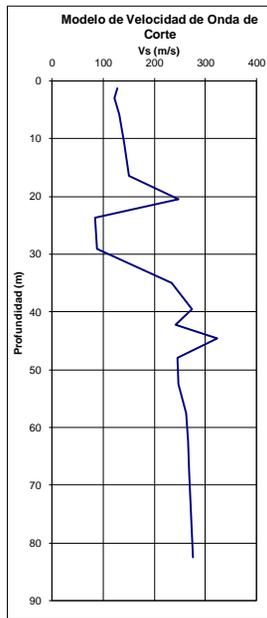
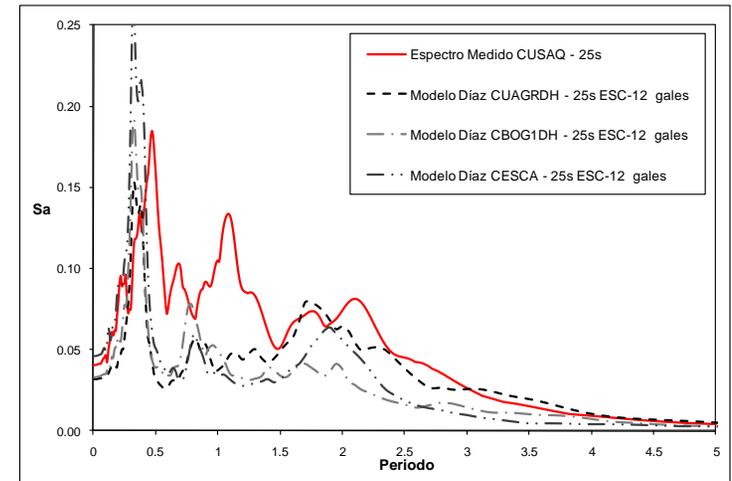


Figura 5.2. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CUSAQ"

● Club Banco de la República - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CBANC	1	MH	Limo arcilloso carmelito	0	2.8	69	1.75	40	1.40	120	81
CBANC	2	CH	Arcilla gris oscura orgánica	2.8	7	133	3.286	108	1.37	100	79
CBANC	3	CH	Arcilla gris oscura orgánica	7	11.6	133	3.286	108	1.37	100	84
CBANC	4	SM	Arena gris oscura con fragmentos de gravas	11.6	12.5	17	0.502	22	1.90	270	234
CBANC	5	CL	Arcilla gris de consistencia dura	12.5	16	25	0.694	15	1.35	155	138
CBANC	6	CL	Arcilla gris de consistencia dura	16	20	25	0.694	15	1.35	155	141
CBANC	7	CL	Arcilla gris de consistencia dura	20	24	25	0.694	15	1.35	155	145
CBANC	8	CL	Arcilla gris de consistencia dura	24	28	25	0.694	15	1.35	155	148
CBANC	9	CL	Arcilla gris de consistencia dura	28	32	25	0.694	15	1.35	155	151
CBANC	10	CL	Arcilla gris de consistencia dura	32	36	25	0.694	15	1.35	155	154
CBANC	11	CL	Arcilla gris de consistencia dura	36	50	25	0.694	15	1.35	155	159

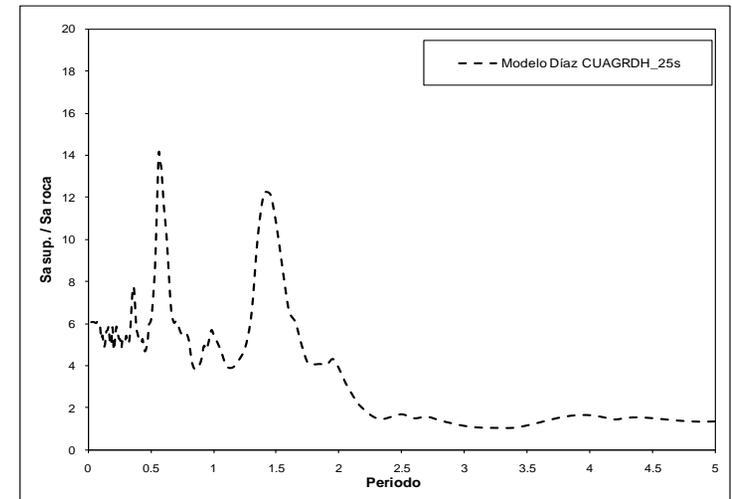
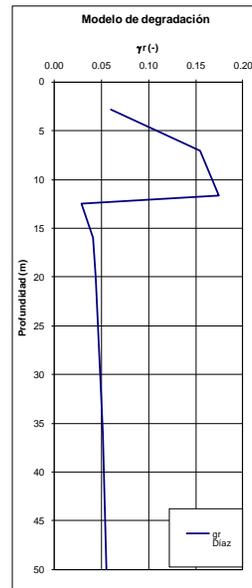
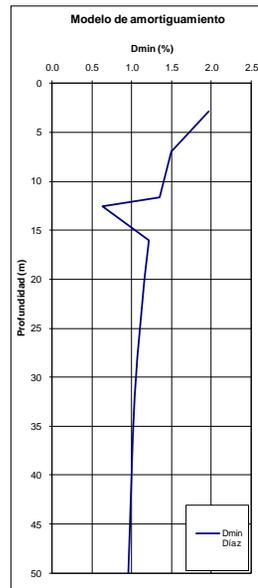
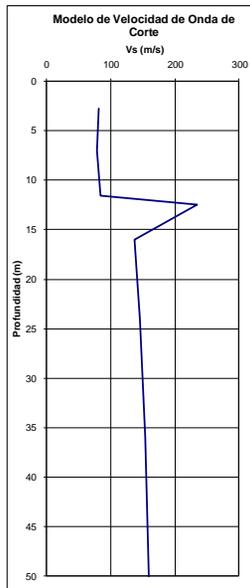
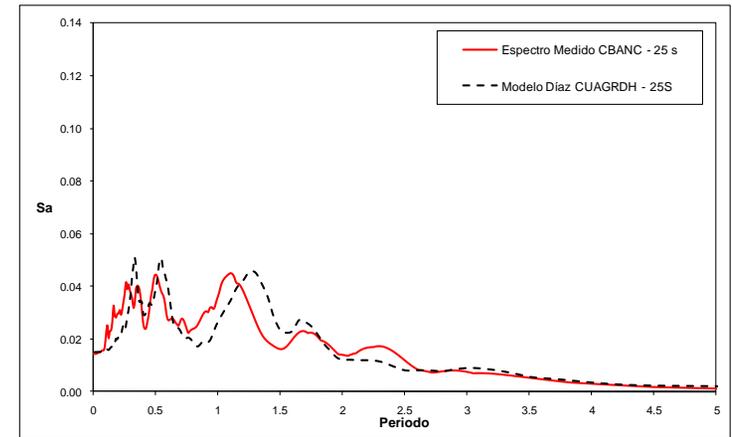


Figura 5.3. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CBANC"

• Escuela Colombiana de ingeniería - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CEING	1	CL	Arcilla gris claro	0	4	46	1.19608	39	1.60	115	87
CEING	2	CH	Arcilla gris con oxidaciones	4	9	148.04	3.64706	124.51	1.32	110	97
CEING	3	CH	Arcilla gris con oxidaciones	9	14.4	148.04	3.64706	124.51	1.32	110	102
CEING	4	PT	Turba	14.4	16.5	322.76	7.84029	192.02	1.22	80	75
CEING	5	CH	Arcilla gris marrón	16.5	21	132.22	3.26739	117.97	1.31	105	100
CEING	6	CH	Arcilla gris marrón	21	25	132.22	3.26739	117.97	1.31	105	102
CEING	7	CH	Arcilla gris marrón	25	30	100.12	2.49688	81.39	1.45	110	109
CEING	8	CH	Arcilla marrón amarillento	30	34	121.97	3.02138	114.50	1.42	105	107
CEING	9	CH	Arcilla marrón amarillento	34	38	121.97	3.02138	114.50	1.42	105	108
CEING	10	PT	Arcilla marrón amarillento con Turba	38	40	201.15	4.9216	178.50	1.34	80	84
CEING	11	CH	Arcilla gris oliva	40	48	92.33	2.30985	90.35	1.46	110	117
CEING	12	CH	Arcilla gris oliva	48	56	92.33	2.30985	90.35	1.46	110	120
CEING	13	CH	Arcilla gris con turba y presencia de arena fina	56	67	53.22	1.37128	39.37	1.67	140	158
CEING	14	CL	Arcilla arenosa y arena gris marrón	67	76	29.15	0.7936	24.74	1.81	180	211
CEING	15	CL	Arcilla arenosa y arena gris marrón	76	85.5	29.15	0.7936	24.74	1.81	205	248
CEING	16	CH	Arcilla gris marrón	85.5	97	39.15	1.03348	42.75	1.65	205	255
CEING	17	SC	Arena gris de grano fino y arena arcillosa marrón	97	107	16.61	0.49268	16.70	2.00	215	275
CEING	18	SC	Arena gris de grano fino y arena arcillosa marrón	107	117	16.61	0.49268	16.70	2.00	215	282
CEING	19	SC	Arena gris de grano fino y arena arcillosa marrón	117	130	16.61	0.49268	16.70	2.00	215	289

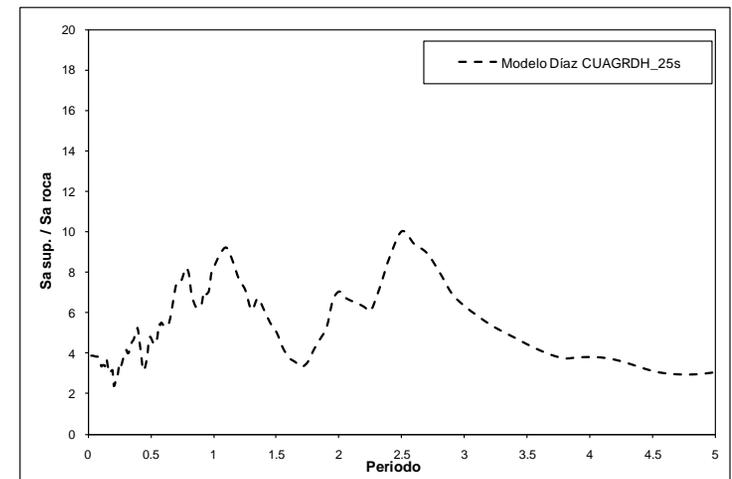
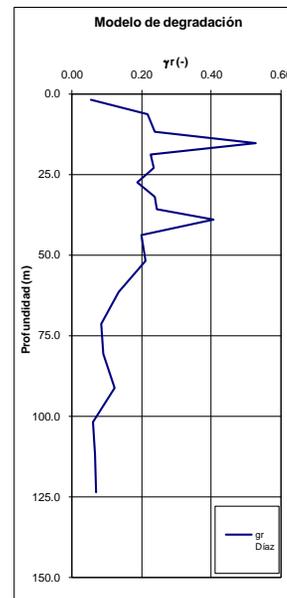
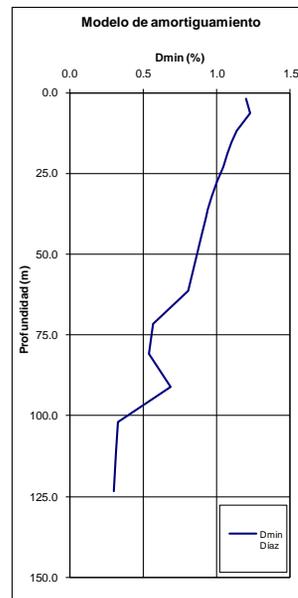
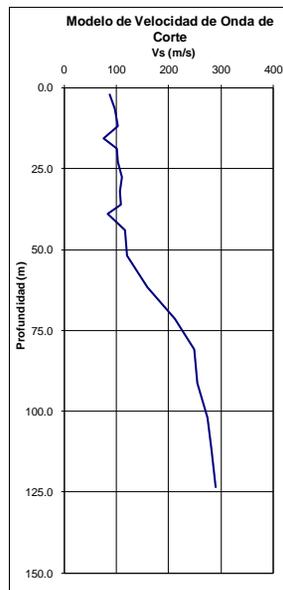
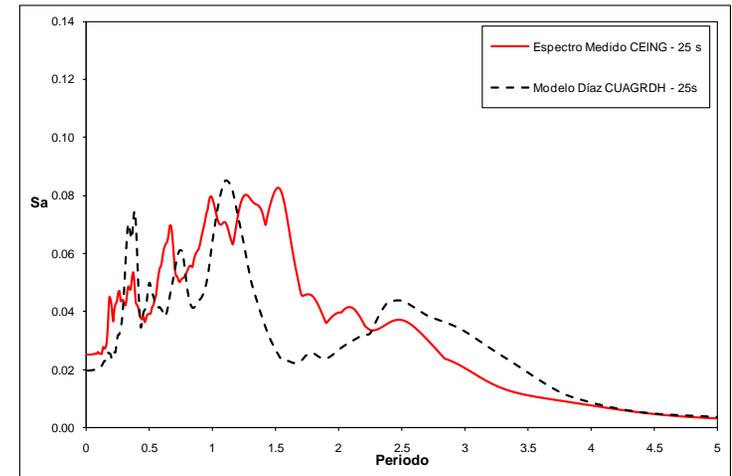


Figura 5.4. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CEING"

• Uniagraria - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CUAGR 1	1	CH	Arcilla	0	5	100	2.494	125	1.55	115	90
CUAGR 2	2	CH	Arcilla	5	10	160	3.934	200	1.40	110	100
CUAGR 3	3	CH	Arcilla	10	17	160	3.934	200	1.40	110	104
CUAGR 4	4	CH	Arcilla	17	24	150	3.694	195	1.45	110	108
CUAGR 5	5	CH	Arcilla	24	28	120	2.974	150	1.50	115	117
CUAGR 6	6	OH	Arcilla orgánica	28	30	200	4.894	265	1.10	90	92
CUAGR 7	7	CH	Arcilla	30	35	150	3.694	195	1.40	115	119
CUAGR 8	8	CL	Arcilla arenosa	35	37.5	80	2.014	100	1.60	140	147
CUAGR 9	9	CH	Arcilla	37.5	45	130	3.214	170	1.50	115	124
CUAGR 10	10	CH	Arcilla	45	56.5	100	2.494	125	1.55	130	145
CUAGR 11	11	CH	Arcilla	56.5	65	60	1.534	70	1.65	165	190
CUAGR 12	12	OH	Arcilla orgánica	65	67	160	3.934	210	1.30	95	111
CUAGR 13	13	CL	Arcilla arenosa	67	85.5	50	1.294	40	1.75	180	217
CUAGR 14	14	CH	Arcilla	85.5	97	50	1.294	55	1.70	180	225
CUAGR 15	15	SC	Arena fina	97	115	30	1.014	25	1.75	255	329
CUAGR 16	16	SC	Arena fina	115	130	25	0.894	20	1.80	260	346

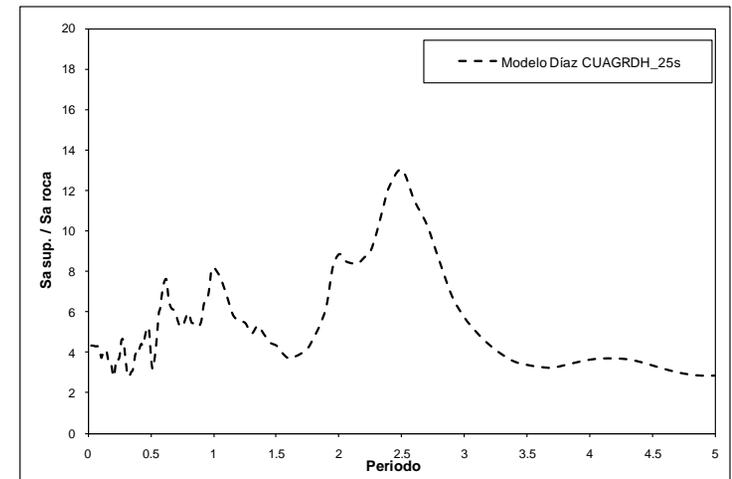
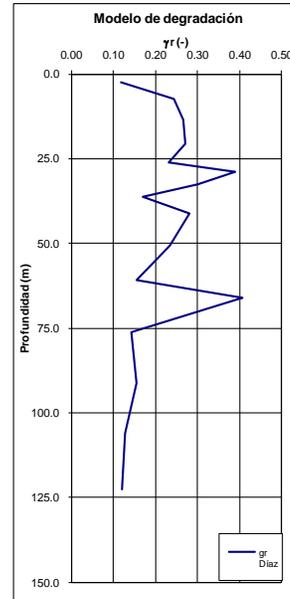
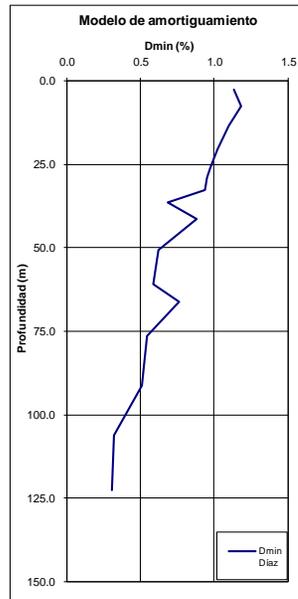
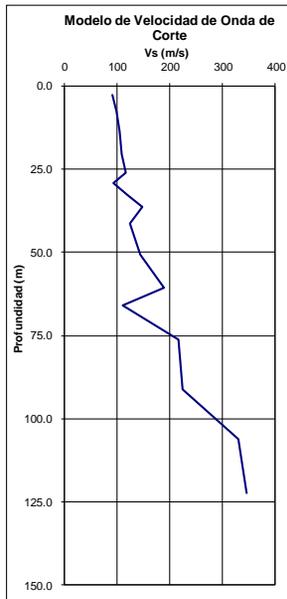
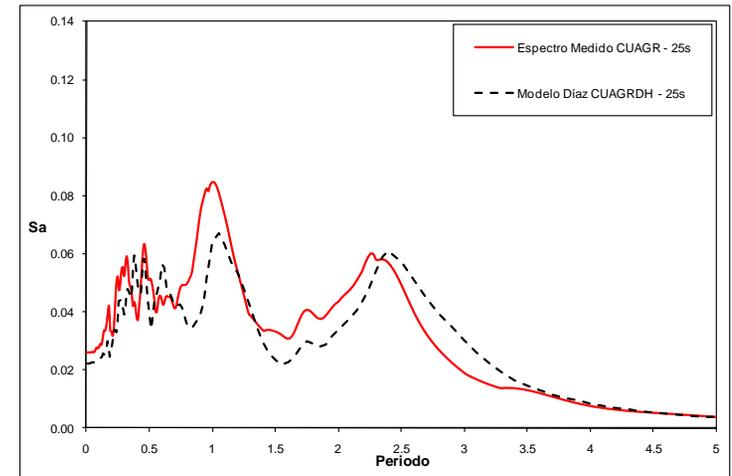


Figura 5.5. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CUAGR"

● Ingeominas - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CBOG1	1	CH-MH	Arcilla ligeramente limosa, gris.	0	5	43	1.10	45	1.80	190	153
CBOG1	2	CH	Arcilla, gris rosado palido.	5	7	79	1.90	92	1.65	160	147
CBOG1	3	CH	Arcilla, gris marrón.	7	12	127	2.91	151	1.40	105	99
CBOG1	4	CH	Arcilla, gris oliva.	12	17	119	2.88	149	1.38	105	102
CBOG1	5	CH	Arcilla, marrón.	17	21	116	2.78	143	1.43	105	105
CBOG1	6	PT	Turba.	21	23	300	5.50	270	1.00	85	85
CBOG1	7	CH	Arcilla, marrón amarillento oscuro.	23	30	87	2.70	122	1.45	160	164
CBOG1	8	CL	Arena arcillosa fina-media, marrón amarillo.	30	38	28	0.96	17	1.95	230	246
CBOG1	9	CH	Arcilla limosa, marrón amarillento oscuro.	38	44.5	52	1.32	46	1.75	160	179
CBOG1	10	CH	Arcilla, gris oliva, turba arcillosa negra.	44.5	52.5	81	2.10	104	1.55	140	161
CBOG1	11	PT	Turba	52.5	58	120	2.95	155	1.34	130	151
CBOG1	12	CH	Arcilla arenosa gris oliva	58	67	37	1.00	38	1.90	230	274
CBOG1	13	PT	Turba	67	69	120	2.95	155	1.30	230	279
CBOG1	14	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	69	80	26	1.05	23	1.95	230	284
CBOG1	15	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	80	100	25	1.05	22	1.95	230	297
CBOG1	16	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	100	120	20	0.95	14	1.95	230	310
CBOG1	17	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	120	140	27	1.05	24	1.95	270	377
CBOG1	18	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	140	152	27	1.05	0	1.95	270	386
CBOG1	19	CH	Arcilla gris y marrón	152	157	29	0.90	27	1.80	270	391
CBOG1	20	PT	Turba	157	159	120	2.00	155	1.30	150	218
CBOG1	21	CL	Intercalaciones de arena y arcilla	159	180	40	1.15	42	1.95	270	397

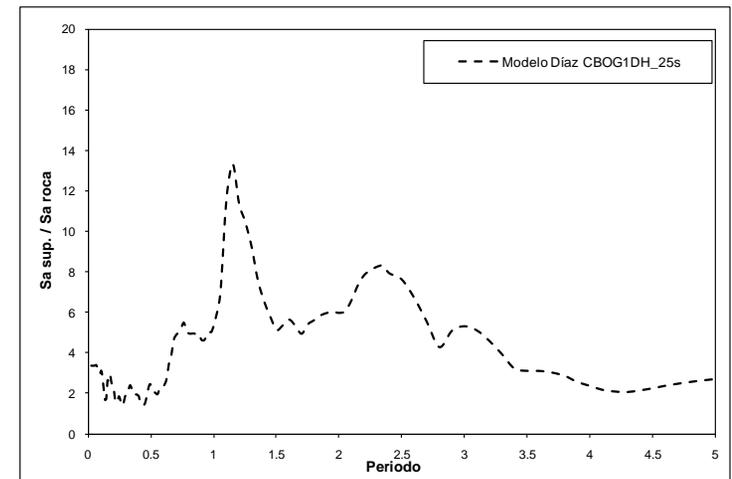
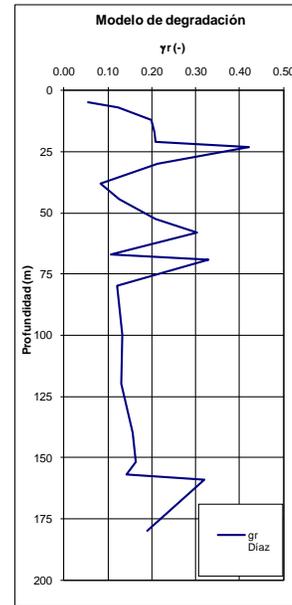
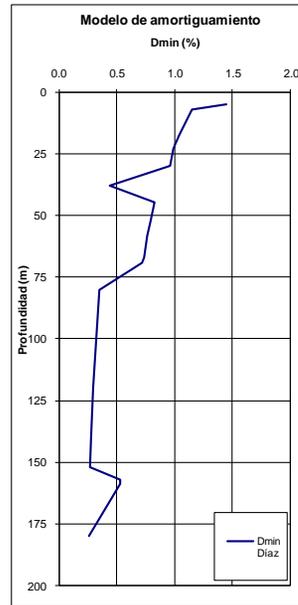
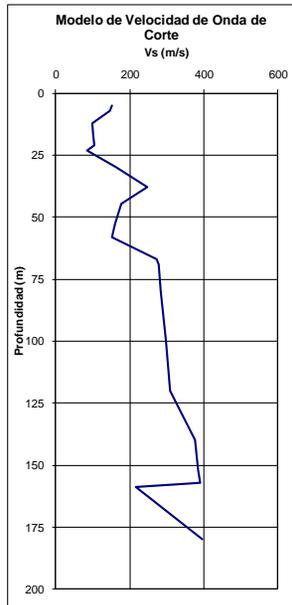
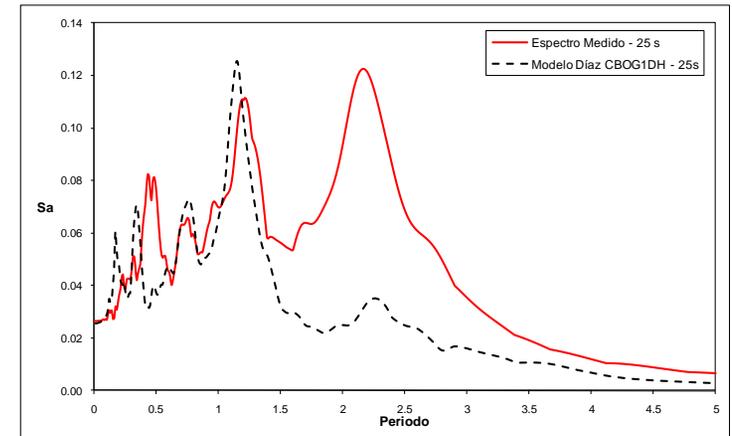


Figura 5.6. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CBOG1"

• Universidad Corps - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CCORP	1	CL	Paleosuelo marrón amarillento oscuro	0	1.5	79	1.9924	40	1.60	180	115
CCORP	2	CH	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	1.5	6.5	152	3.73157	141	1.33	125	103
CCORP	3	CH	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	6.5	11.5	152	3.73157	141	1.33	125	112
CCORP	4	CH	Arcilla limosa gris oliva a marrón amarillento	11.5	17.5	147	3.62049	119	1.31	125	116
CCORP	5	CH - PT	Arcilla turbosa marrón amarillento quemado	17.5	19	185	4.53232	154	1.23	80	76
CCORP	6	CH	Arcilla marrón amarillento oscuro	19	25	106	2.63396	102	1.32	130	125
CCORP	7	CH	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	25	29	132	3.25788	111	1.31	130	128
CCORP	8	CH	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	29	37	120	2.97796	95	1.40	130	131
CCORP	9	CH - PT	Arcilla turbosa marrón amarillento quemado	37	40	117	2.91202	78	1.49	160	165
CCORP	10	CH	Arcilla limosa marrón amarillento quemado	40	45	100	2.49445	77	1.47	160	168
CCORP	11	CL	Arcilla gris oliva a gris marrón	45	52.5	45	1.17496	21	1.66	180	195
CCORP	12	CH	Arcilla gris oliva a gris marrón	52.5	62	92	2.29914	86	1.46	150	167
CCORP	13	CH	Arcilla gris oliva a gris marrón	62	72	92	2.29914	86	1.46	150	172
CCORP	14	CL	Arcilla limosa gris oliva a marrón	72	85	51	1.31326	44	1.75	190	225
CCORP	15	CL	Arcilla limosa gris oliva a marrón	85	100	51	1.31326	44	1.75	190	234
CCORP	16	CL	Arcilla arenosa gris oliva	100	125	32	0.86584	20	1.81	240	310
CCORP	17	SC	Arena muy fina ligeramente limosa a arcilla li	125	135	23	0.6556	-	2.00	240	321
CCORP	18	CL	Arcilla limosa gris marrón	135	157	37	0.98695	38	1.75	238	327
CCORP	19	CL	Arcilla limosa gris marrón	157	183	37	0.98695	38	1.75	238	337
CCORP	20	CL	Arcilla gris marrón	183	235	40	1.06109	48	1.75	250	369
CCORP	21	CL	Arcilla gris marrón	235	250	40	1.06109	48	1.75	250	379

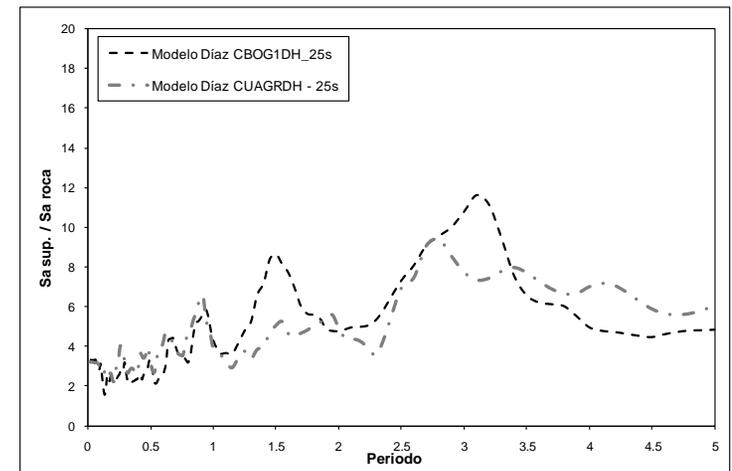
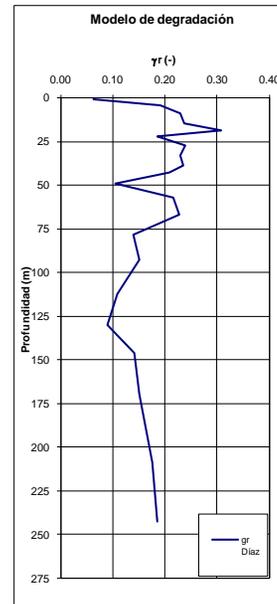
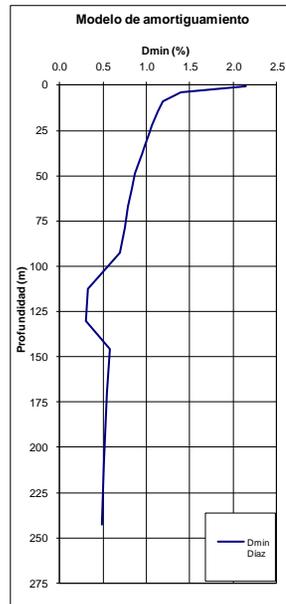
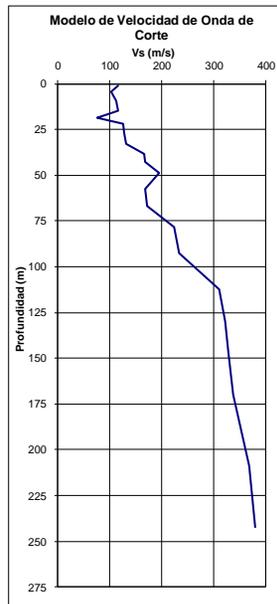
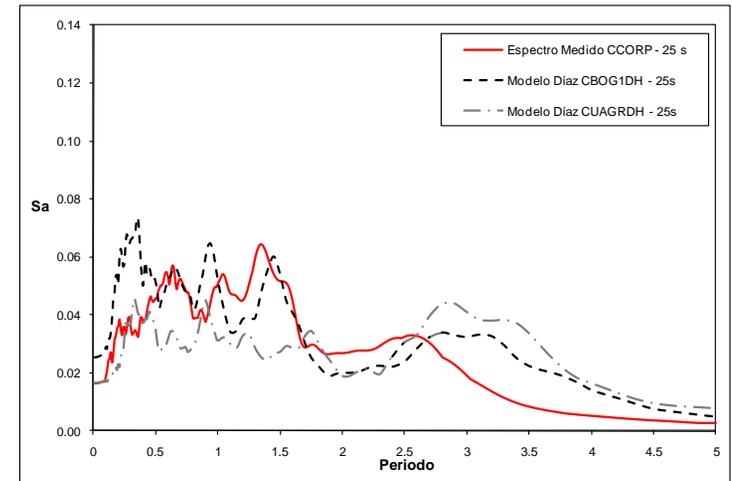


Figura 5.7. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CCORP"

• Jardín Botánico -Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CJABO 1	1	R	Relleno Heterogeneo	0	2.5	45	1.174	45	1.768	190	135
CJABO 2	2	CH	Arcilla gris con intercalaciones carmelitas	2.5	8	113	2.811	108	1.492	90	77
CJABO 3	3	CH	Arcilla limosa gris marrón	8	13	142	3.491	122	1.359	80	73
CJABO 4	4	CH	Arcilla limosa gris marrón	13	18	142	3.491	122	1.359	80	75
CJABO 5	5	CH	Arcilla ligeramente limosa marrón a gris	18	24	121	2.999	118	1.330	110	106
CJABO 6	6	CH	Arcilla ligeramente limosa marrón a gris	24	30	121	2.999	118	1.330	110	109
CJABO 7	7	CH	Arcilla limosa gris amarillento	30	35	108	2.680	91	1.377	130	132
CJABO 8	8	CH	Arcilla limosa gris amarillento	35	40	108	2.680	91	1.377	130	134
CJABO 9	9	CH	Arcilla algo limosa gris marrón con turba	40	49	83	2.085	83	1.461	150	159
CJABO 10	10	CH	Arcilla algo limosa gris marrón con turba	49	58	83	2.085	83	1.461	150	164
CJABO 11	11	CL-ML	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de aren	58	64	38	1.006	33	1.904	180	203
CJABO 12	12	CL-ML	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de aren	64	70	38	1.006	33	1.904	180	209
CJABO 13	13	CH	Arcilla limosa gris oscuro con intercalaciones de arena	70	80	74	1.865	60	1.593	160	190
CJABO 14	14	CH	Arcilla limosa gris oscuro con intercalaciones de arena	80	90	74	1.865	60	1.593	160	195
CJABO 15	15	SC	intercalaciones de arena fina con arcilla limosa gris oliva	90	110	30	0.811	24	1.858	230	291
CJABO 16	16	SC	intercalaciones de arena fina con arcilla limosa gris oliva	110	130	30	0.811	24	1.858	230	304
CJABO 17	17	SC	intercalaciones de arena fina con arcilla limosa gris oliva	130	159.5	30	0.811	24	1.858	230	317
CJABO 18	18	CL	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	159.5	190	25	0.703	16	2.000	270	389
CJABO 19	19	CL	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	190	225	25	0.703	16	2.000	270	406
CJABO 20	20	SC	Arena de grano fino ligeramente arcillosa marrón	225	240	28	0.769	16	2.070	270	416
CJABO 21	21	CH	Arcilla arenosa marrón	240	275	41	1.069	51	1.790	220	346

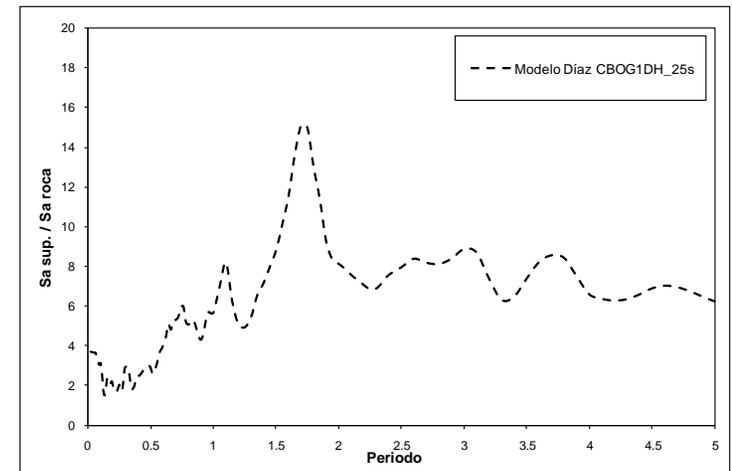
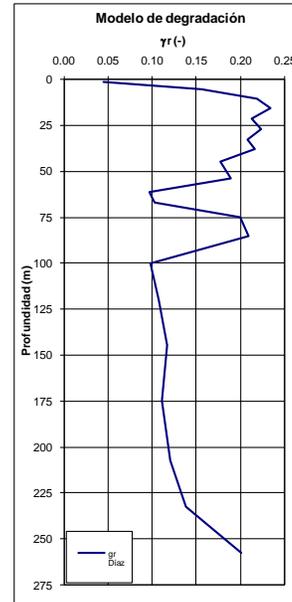
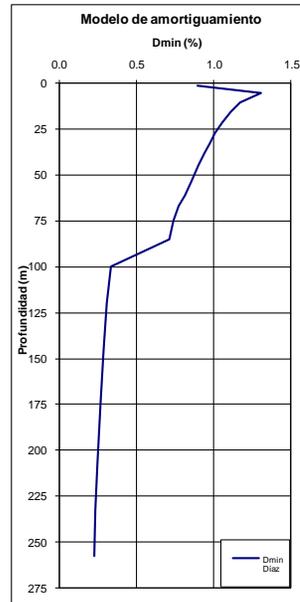
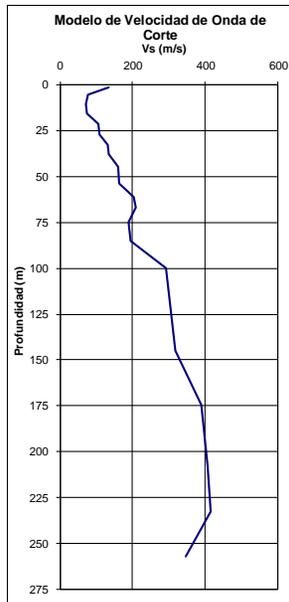
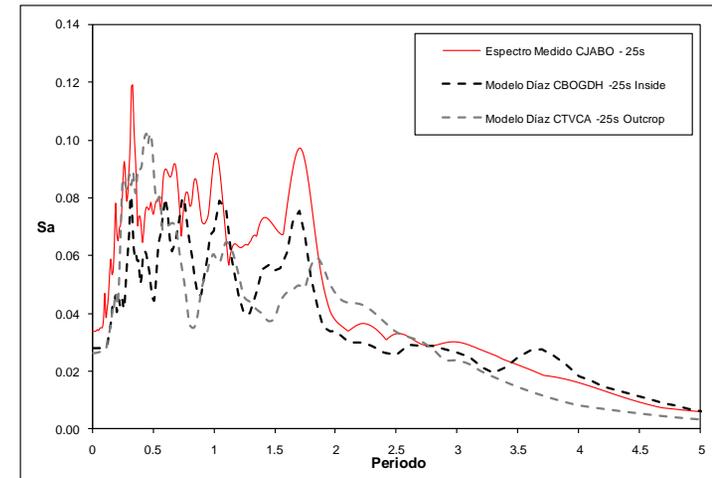


Figura 5.8. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CJABO"

● Centro de Estudios del Niño - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CNINO 1	OH		Suelo organico marron grisaceo ó limo arcilloso gris oscuro orgánico	0	5	78	1.960	67	1.460	180	134
CNINO 2	CH		Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris camélito	5	10	149	3.659	137	1.317	85	73
CNINO 3	CH		Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris camélito	10	16	149	3.659	137	1.317	85	76
CNINO 4	CH		Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris marrón	16	20	137	3.380	128	1.350	120	111
CNINO 5	CH		Limo arcillosos y/o arcilla limosa gris marrón	20	24	137	3.380	128	1.350	120	114
CNINO 6	CH		arcilla limosa gris a marrón	24	32	124	3.082	113	1.362	140	137
CNINO 7	CH		arcilla limosa gris a marrón	32	40	124	3.082	113	1.362	140	142
CNINO 8	CH		arcilla limosa marrón	40	45	91	2.280	69	1.465	160	166
CNINO 9	CH		arcilla limosa marrón	45	50	91	2.280	69	1.465	160	169
CNINO 10	CH		Arcilla gris	50	60	80	2.007	80	1.446	170	185
CNINO 11	CH		Arcilla gris	60	70	80	2.007	80	1.446	170	190
CNINO 12	CH		Arcilla marrón a gris oliva	70	80	66	1.671	63	1.565	175	201
CNINO 13	CH		Arcilla marrón a gris oliva	80	90	66	1.671	63	1.565	175	207
CNINO 14	CH		Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien	90	100	45	1.177	44	1.705	220	267
CNINO 15	CH		Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien	100	110	45	1.177	44	1.705	220	273
CNINO 16	CL		Arena arcillosa de grano fino marrón	110	120	35	0.941	40	1.973	230	293
CNINO 17	CL		Arena arcillosa de grano fino marrón	120	132	35	0.941	40	1.973	230	301
CNINO 18	SC		Arcilla gris oliva	132	147	41	1.084	37	1.655	220	295
CNINO 19	CL		Arena arcillosa de grano fino marrón	147	159.5	35	0.944	26	1.750	220	301
CNINO 20	SC		Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	159.5	190	26	0.723	21	1.983	255	361
CNINO 21	SC		Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	190	225	26	0.723	21	1.983	255	377

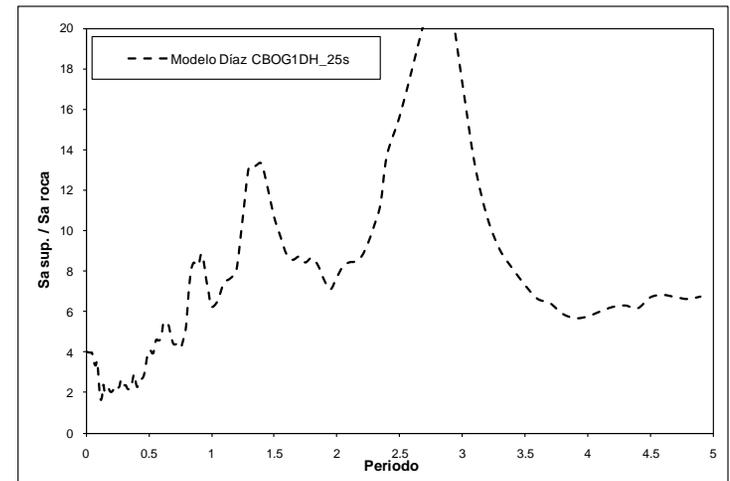
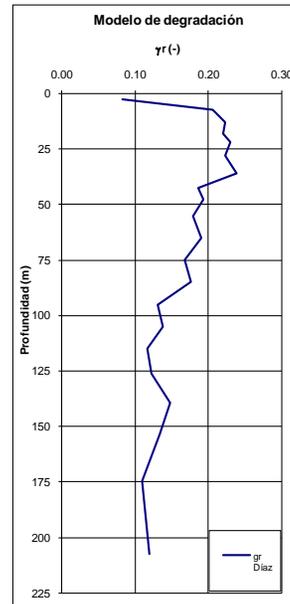
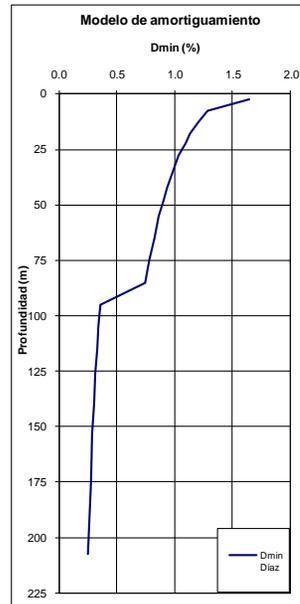
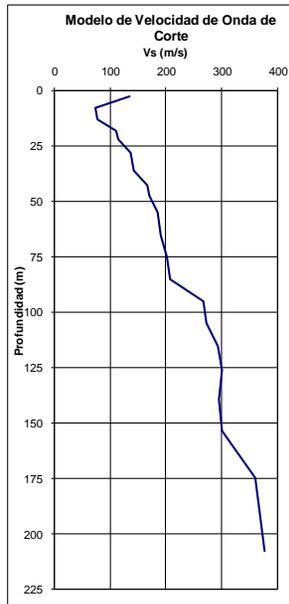
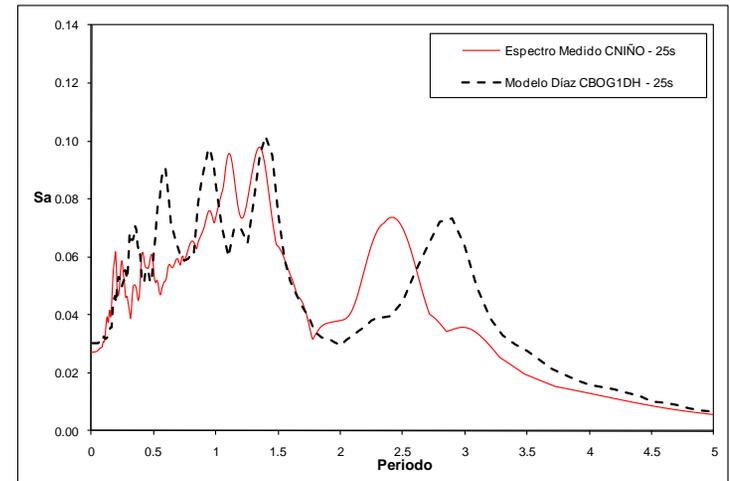


Figura 5.9. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CNINO"

• Avianca - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CAVIA 1	1	R	Relleno heterogeneo	0	2.8	71	1.790	57	1.66	120	86
CAVIA 2	2	CH	Arcilla limosa gris	2.8	8	110	2.734	110	1.490	80	68
CAVIA 3	3	CH	Arcilla limosa gris oliva a gri marrón	8	15	134	3.312	121	1.318	80	73
CAVIA 4	4	CH	Arcilla limosa marrón amarillento oscuro	15	21	153	3.773	135	1.30	80	76
CAVIA 5	5	CH	Arcilla gris a marrón	21	30	120	2.969	109	1.349	130	127
CAVIA 6	6	CH	Arcilla gris a marrón	30	40	120	2.969	109	1.349	130	132
CAVIA 7	7	CH	Arcilla gris oliva	40	55	88	2.213	77	1.53	170	182
CAVIA 8	8	CH	Arcilla gris oliva	55	70	88	2.213	77	1.53	170	192
CAVIA 9	9	SC	Arenas limosa y/o limos arenosos café	70	73	25	0.694	25	1.75	200	232
CAVIA 10	10	CH	Arcilla marrón a gris oliva	73	81	72	1.822	65	1.58	160	188
CAVIA 11	11	CH	Arcilla marrón a gris oliva	81	90	72	1.822	65	1.58	160	192
CAVIA 12	12	CL	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de are	90	100	37	0.984	42	1.69	180	221
CAVIA 13	13	CL	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de are	100	110	37	0.984	42	1.69	180	226
CAVIA 14	14	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	110	132	29	0.790	20	1.97	230	300
CAVIA 15	15	CL	Arcilla gris oliva	132	147	34	0.918	30	1.750	210	284
CAVIA 16	16	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	147	159.5	33	0.887	24	1.760	230	318
CAVIA 17	17	CL	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	159.5	190	25	0.693	13	2.008	210	300
CAVIA 18	18	CL	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	190	225	25	0.693	13	2.008	210	313
CAVIA 19	19	SC	Arena de grano medio a fino marrón con intercalacio	225	240	31	0.845	16	2.070	230	352
CAVIA 20	20	CH	Arcilla arenosa Marrón	240	300	35	0.930	51	1.790	210	331
CAVIA 21	21	CH	Arcilla arenosa Marrón	300	360	35	0.930	51	1.790	210	343

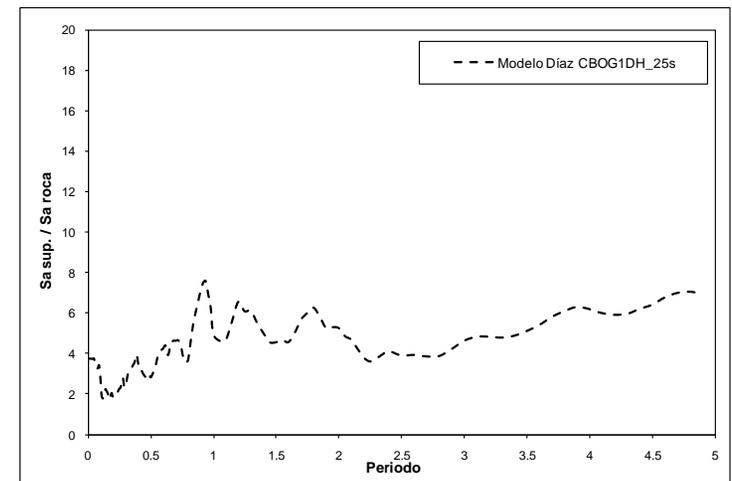
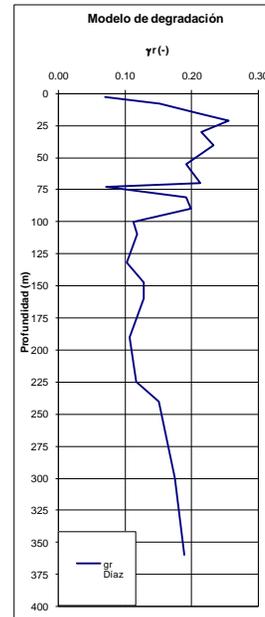
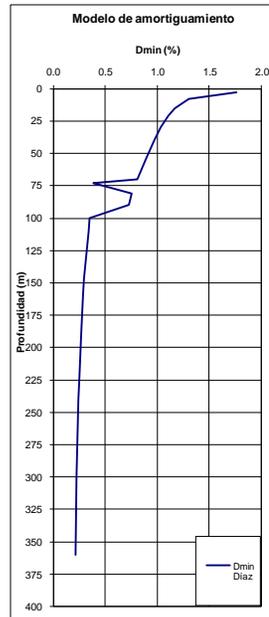
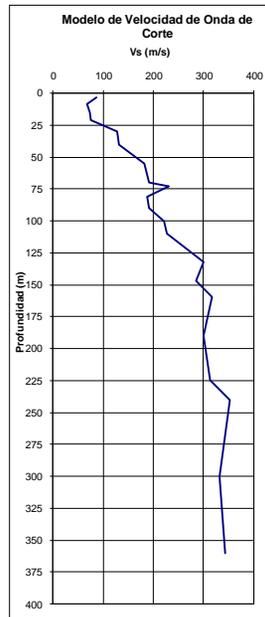
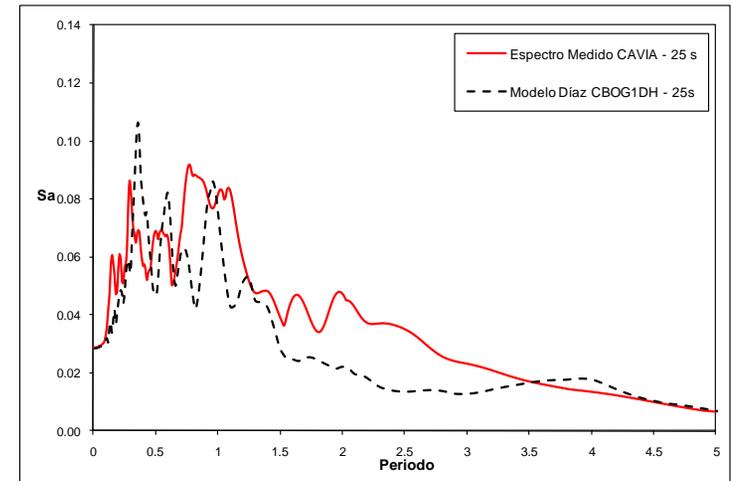


Figura 5.10. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CAVIA"

● Parque la Florida - Lacustre

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CFLOD	1	R	Relleno heterogeneo	0	3	53	1.368	65	1.66	220	160
CFLOD	2	CH	Arcilla gris oscura con intercalaciones de arena	3	7	25	0.685	12	1.95	180	156
CFLOD	3	SC	Arena gris a café medio suelta	7	10	22	0.821	4	1.75	200	185
CFLOD	4	CH	Arcilla café con intercalaciones de material orgánico	10	19	142	3.500	130	1.33	120	116
CFLOD	5	CH	Arcilla café con intercalaciones de material orgánico	19	28	142	3.500	130	1.33	120	120
CFLOD	6	CH	Arcilla marrón	28	34	115	2.851	101	1.36	125	128
CFLOD	7	CH	Arcilla marrón	34	40	115	2.851	101	1.36	125	131
CFLOD	8	CH	Arcilla gris	40	55	97	2.425	88	1.44	135	146
CFLOD	9	CH	Arcilla gris	55	70	97	2.425	88	1.44	135	153
CFLOD	10	CH	Arcilla marrón a gris oliva	70	80	79	1.994	67	1.54	165	192
CFLOD	11	CH	Arcilla marrón a gris oliva	80	90	79	1.994	67	1.54	165	197
CFLOD	12	CL	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien d	90	100	44	1.155	46	1.75	230	282
CFLOD	13	CL	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien d	100	110	44	1.155	46	1.75	230	289
CFLOD	14	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	110	132	29	0.990	20	1.97	240	313
CFLOD	15	CL	Arcilla gris oliva	132	147	34	0.918	30	1.75	240	325
CFLOD	16	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	147	159.5	35	1.131	35	1.56	240	331
CFLOD	17	CL	Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	159.5	190	25	0.687	15	2.00	215	306
CFLOD	18	CL	Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	190	225	25	0.687	15	2.00	215	319
CFLOD	19	SC	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla	225	240	28	0.969	16	2.07	270	412
CFLOD	20	CH	Arcilla arenosa Marrón	240	370	41	1.069	51	1.79	255	410
CFLOD	21	CH	Arcilla arenosa Marrón	370	500	41	1.069	51	1.79	255	437

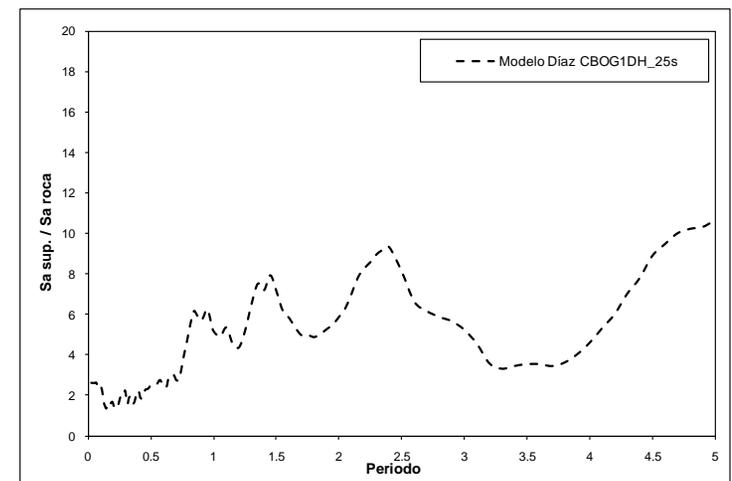
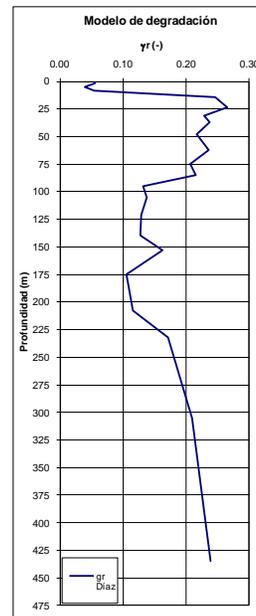
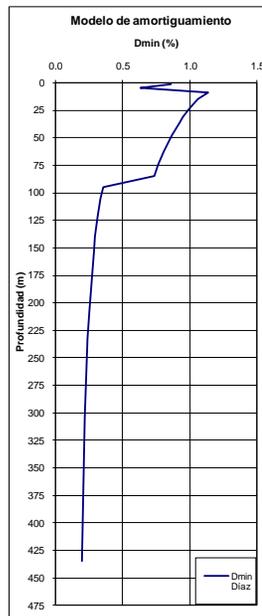
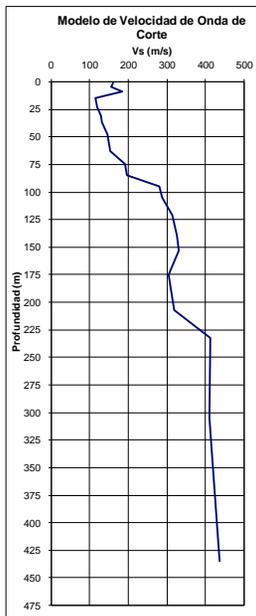
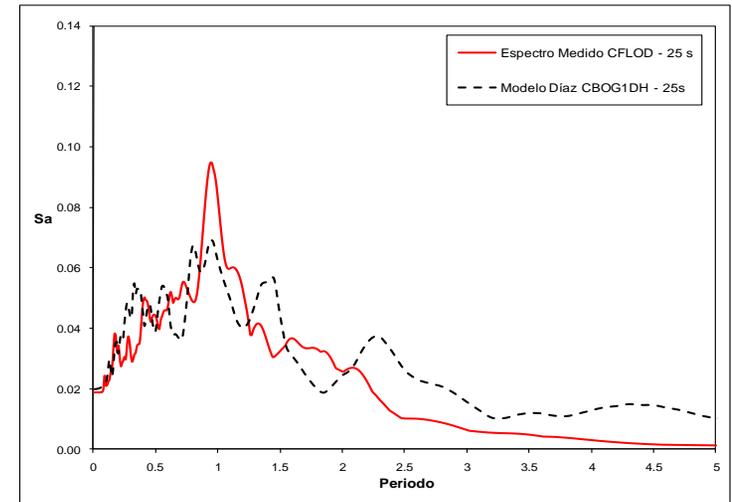


Figura 5.11. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CFLOD"

● Club el Tiempo - Lacustr

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CTIEM	1	R	Relleno	0	1.2	70	1.768	55	1.660	170	105
CTIEM	2	CH	Arcilla gris de consistencia dura	1.2	8	107	2.659	110	1.417	135	112
CTIEM	3	CH	Arcilla limosa gris a carmelito	8	15	140	3.460	141	1.294	80	74
CTIEM	4	CH	Arcilla limosa gris a carmelito	15	27	119	2.958	107	1.370	135	131
CTIEM	5	CH	Arcilla limosa gris a carmelito	27	40	119	2.958	107	1.370	135	138
CTIEM	6	CH	Arcilla gris verdosa a café	40	50	88	2.206	80	1.501	160	171
CTIEM	7	CH	Arcilla gris verdosa a café	50	60	88	2.217	80	1.501	160	177
CTIEM	8	CH	Arcilla gris verdosa a café	60	72	88	2.217	80	1.501	160	183
CTIEM	9	CH	Arcilla gris verdosa	72	80	68	1.728	62	1.601	175	205
CTIEM	10	CH	Arcilla gris verdosa	80	90	68	1.728	62	1.601	175	210
CTIEM	11	CH - MH	Arcilla algo limosa gris verdosa a marrón	90	100	39	1.032	45	1.750	185	228
CTIEM	12	CH - MH	Arcilla algo limosa gris verdosa a marrón	100	110	39	1.032	45	1.750	185	233
CTIEM	13	SC	Arena marrón de grano fino ligeramente arcillosa	110	120	29	0.790	20	1.973	240	310
CTIEM	14	SC	Arena marrón de grano fino ligeramente arcillosa	120	132	29	0.790	20	1.973	240	318
CTIEM	15	CL	Arcilla gris verdosa	132	147	34	0.918	30	1.750	230	312
CTIEM	16	SC	Arena arcillosa café de grano fino	147	159.5	29	0.789	21	1.760	265	367
CTIEM	17	CL - ML	Arcilla limosa gris a arcilla arenosa café	159.5	190.5	25	0.693	13	2.008	230	329
CTIEM	18	CL - ML	Arcilla limosa gris a arcilla arenosa café	190.5	225	25	0.693	13	2.008	230	343
CTIEM	19	SC	Arena arcillosa café de grano fino	225	240	29	0.785	16	2.070	275	422
CTIEM	20	CL	Arcilla arenosa café	240	340	38	1.004	47	1.790	275	440
CTIEM	21	CL	Arcilla arenosa café	340	425	38	1.004	47	1.790	275	462

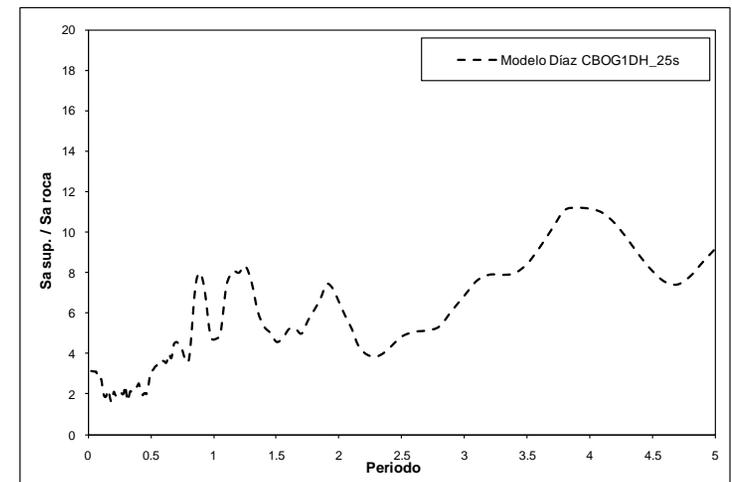
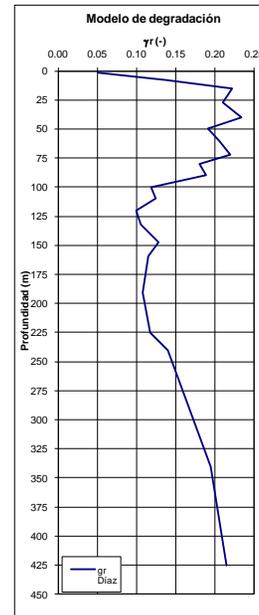
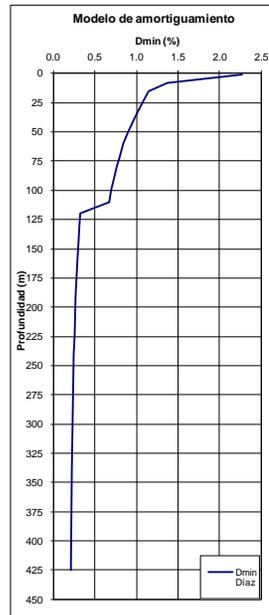
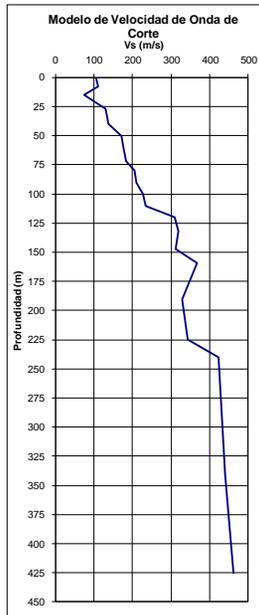
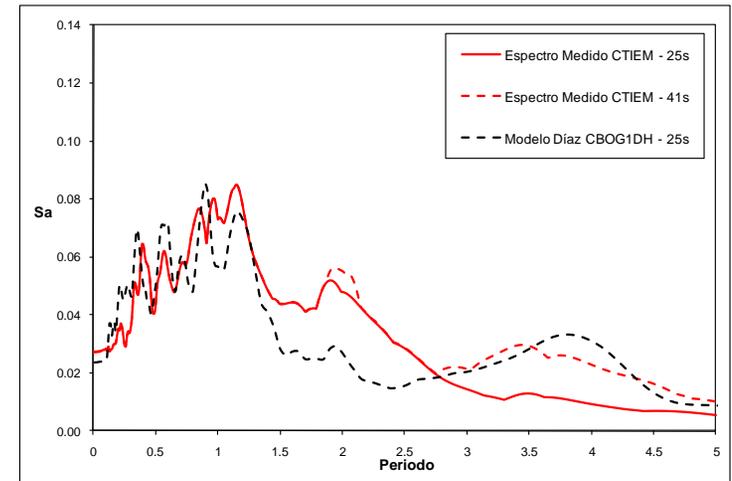


Figura 5.12. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CTIEM"

● CITEC – Lacustre Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CCITE 1	R	Relleno		0	2	31	0.970	38	1.50	200	133
CCITE 2	CH	Arcilla habana de consistencia dura		2	6	46	1.208	55	1.68	180	149
CCITE 3	CH	Arcilla limosa gris carmelita		6	12	69	1.752	80	1.49	170	154
CCITE 4	SC	Arena arcillosa a arcilla arenosa gris carmelita		12	17	31	0.831	34	1.53	265	252
CCITE 5	CH - PT	Arcilla carmelita a gris claro con presencia de turba entre los 25-27m		17	23	79	1.986	86	1.44	140	138
CCITE 6	CH - PT	Arcilla carmelita a gris claro con presencia de turba entre los 25-27m		23	29	79	1.986	86	1.44	140	142
CCITE 7	CH - PT	Arcilla carmelita a gris claro con presencia de turba entre los 25-27m		29	35	79	1.986	86	1.44	140	146
CCITE 8	SM	Arena fina café con intercalaciones de limo		35	44	25	0.686	10	1.95	265	288
CCITE 9	CH - PT	Arcilla limosa algo arenosa gris verdosa con lentes de turba		44	53	47	1.212	69	1.59	155	176
CCITE 10	CH - PT	Arcilla limosa algo arenosa gris verdosa con lentes de turba		53	62	47	1.212	69	1.59	155	181
CCITE 11	CL - ML	Arcilla limosa y/o limo arcilloso café de consistencia dura		62	71	37	0.994	38	1.72	240	287
CCITE 12	CL - ML	Arcilla limosa y/o limo arcilloso café de consistencia dura		71	80	37	0.994	38	1.72	240	295
CCITE 13	SM - PT	Arena limosa con intercalaciones de arcilla y lentes de turba		80	88	24	0.672	16	1.87	250	314
CCITE 14	SM - PT	Arena limosa con intercalaciones de arcilla y lentes de turba		88	96	24	0.672	16	1.87	250	320
CCITE 15	SC	Intercalaciones de arena fina con arcilla limo arenosa gris verdosa		96	108.5	34	0.904	30	1.82	275	360
CCITE 16	SC	Intercalaciones de arena fina con arcilla limo arenosa gris verdosa		108.5	124.5	34	0.904	30	1.82	270	363
CCITE 17	SC	Intercalaciones de arena fina con arcilla limo arenosa gris verdosa		124.5	142.5	34	0.904	30	1.82	275	380
CCITE 18	SC	Intercalaciones de arena fina con arcilla limo arenosa gris verdosa		142.5	159.5	34	0.904	30	1.82	270	382
CCITE 19	CL	Arcilla limosa gris a marrón con presencia de lentes de arena		159.5	225	26	0.728	15	2.01	180	269
CCITE 20	SC	Arena de grano fino marrón con intercalaciones de arcilla		225	240	29	0.785	16	2.07	250	389
CCITE 21	CH	Arcilla arenosa marrón		240	250	38	1.004	47	1.79	170	267

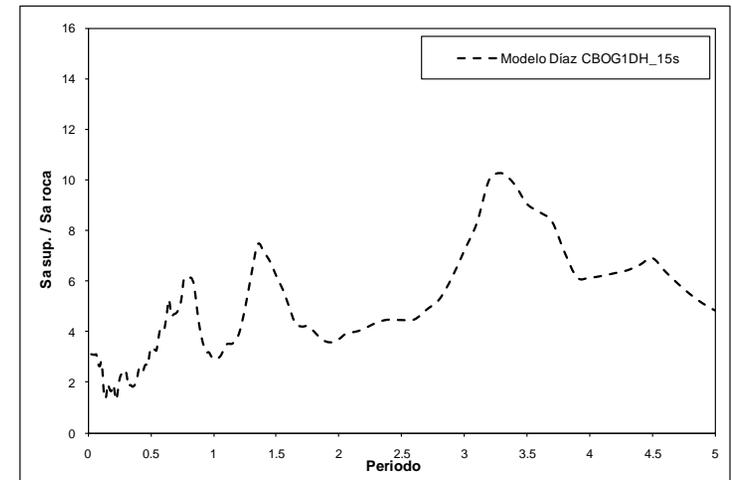
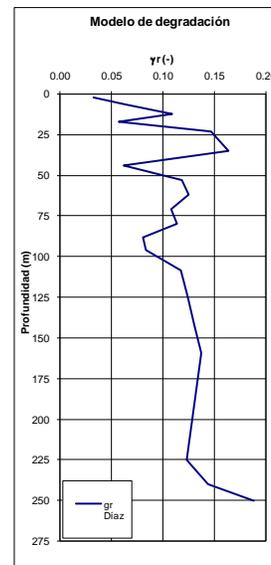
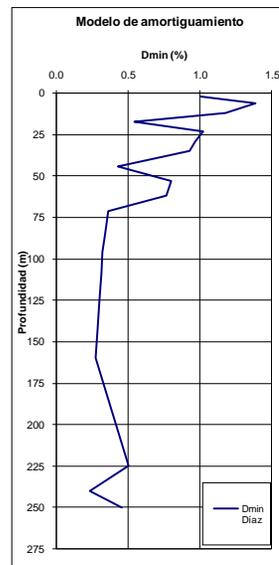
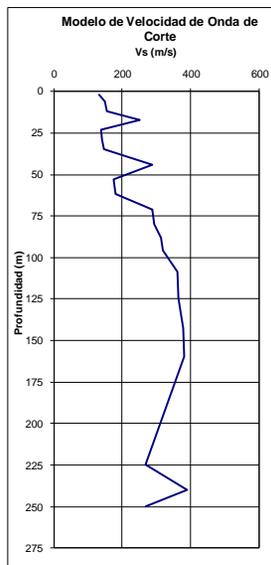
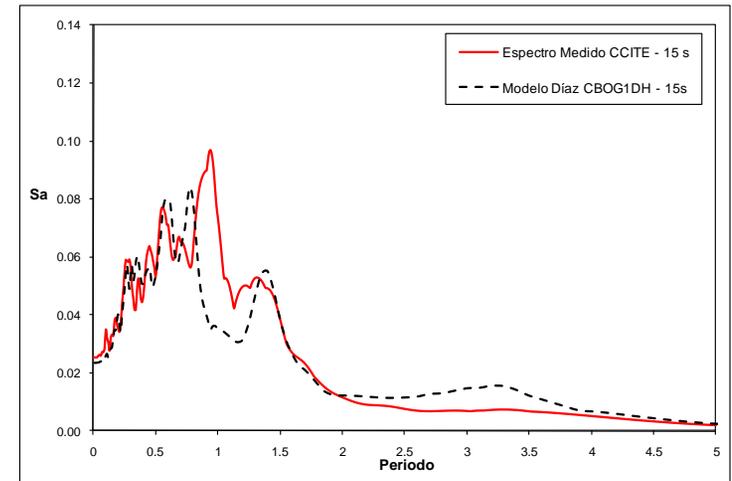


Figura 5.13. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CCITE"

● Planta de Bombeo Fontibón – Lacustre Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CFONT 1	CL	Arcilla limosa gris claro		0	2.5	38	1.005	43	1.64	200	140
CFONT 2	CL-SC	Arcilla arenosa y/o arena arcillosa gris a gris verdosa		2.5	5	45	1.170	44	1.71	200	165
CFONT 3	CH	Arcilla limosa carmelita		5	10	106	2.632	106	1.44	80	70
CFONT 4	CH	Arcilla limosa carmelita		10	15.4	106	2.632	106	1.44	80	73
CFONT 5	CH - MH	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arena		15.4	27	103	2.561	84	1.39	100	97
CFONT 6	CH - MH	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arena		27	40	103	2.561	84	1.39	100	103
CFONT 7	CH	Arcilla gris		40	50	84	2.121	79	1.45	115	123
CFONT 8	CH	Arcilla gris		50	60	84	2.121	79	1.45	115	127
CFONT 9	CH	Arcilla gris		60	70	84	2.121	79	1.45	90	102
CFONT 10	CH	Arcilla marrón a gris oliva		70	80	66	1.671	63	1.57	115	134
CFONT 11	CH	Arcilla marrón a gris oliva		80	90	66	1.671	63	1.57	115	137
CFONT 12	CH	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa		90	100	45	1.177	44	1.71	140	171
CFONT 13	CH	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa		100	110	45	1.177	44	1.71	140	175
CFONT 14	CL	Arena arcillosa de grano fino marrón		110	120	35	1.141	40	1.97	220	282
CFONT 15	CL	Arena arcillosa de grano fino marrón		120	132	35	1.141	40	1.97	220	290
CFONT 16	SC	Arcilla gris oliva		132	147	41	1.284	37	1.66	220	297
CFONT 17	CL	Arena arcillosa de grano fino marrón		147	159.5	35	1.144	26	1.75	240	330
CFONT 18	SC	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena		159.5	190	26	0.923	21	1.98	240	341
CFONT 19	SC	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena		190	225	26	0.923	21	1.98	280	415
CFONT 20	CL	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla		225	240	28	0.969	16	2.07	280	427
CFONT 21	SC	Arcilla arenosa Marrón		240	275	41	1.269	51	1.79	280	436

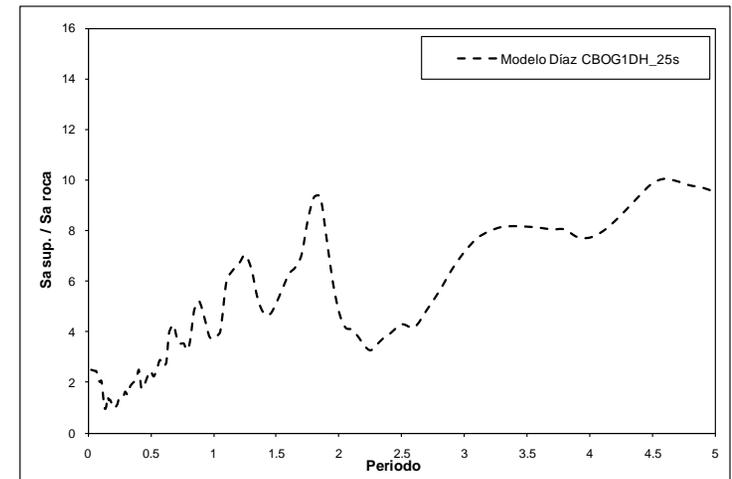
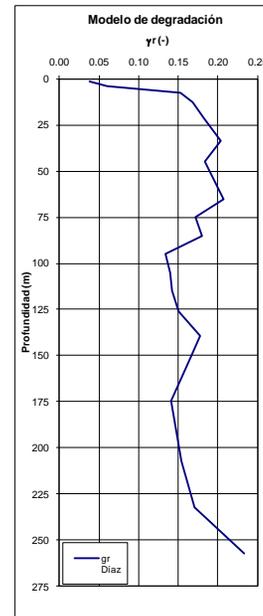
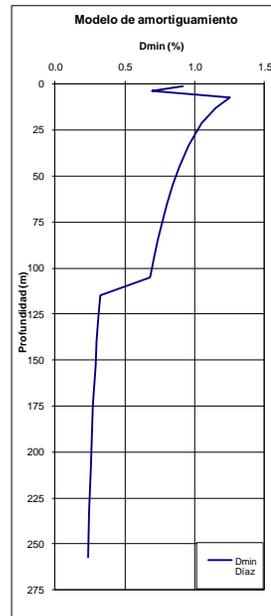
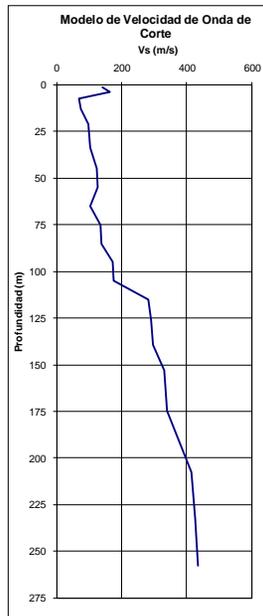
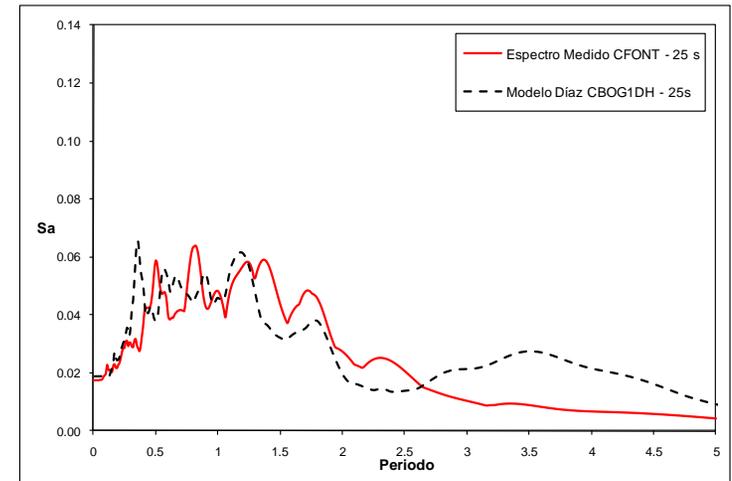


Figura 5.14. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CFONT"

● Parque el Tunal - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CTUNA	1	CL - SC	Arcilla limosa a arena acilosa marron oscuro con presencia de lentes de turba	0.0	3.0	23	0.655	18	1.97	240	167
CTUNA	2	CL	Arcilla marrón	3.0	8.0	23	0.655	30	1.60	200	166
CTUNA	3	OH	Arcilla orgánica gris	8.0	10.5	23	0.655	66	1.75	200	178
CTUNA	4	SC - CL	Arena algo arcillosa marrón de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	10.5	15.0	10	0.334	28	1.90	240	225
CTUNA	5	SC - CL	Arena algo arcillosa marrón de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	15.0	20.0	10	0.334	28	1.90	100	100
CTUNA	6	SC - CL	Arena algo arcillosa marrón de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	20.0	25.0	10	0.334	28	1.90	240	250
CTUNA	7	SC - CL	Arena algo arcillosa marrón de grano fino a grueso con intercalaciones de arcilla	25.0	30.0	10	0.334	28	1.90	240	259
CTUNA	8	CL	Arcilla limosa algo arenosa marrón	30.0	34.5	10	0.334	24	1.93	235	261
CTUNA	9	CL	Arcilla limosa algo arenosa marrón	34.5	39.5	10	0.334	24	1.93	235	268
CTUNA	10	SW	Arena gris verdoso de grano fino a grueso	39.5	44.5	10	0.334	3	1.85	285	333
CTUNA	11	SW	Arena gris verdoso de grano fino a grueso	44.5	75.0	10	0.334	3	1.85	285	353

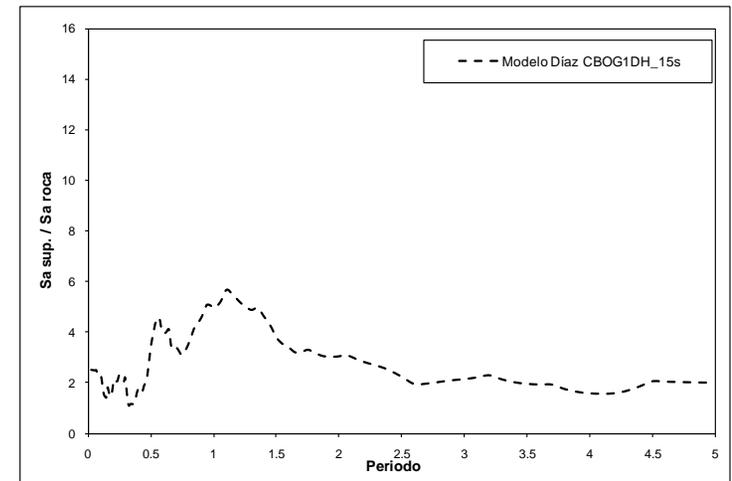
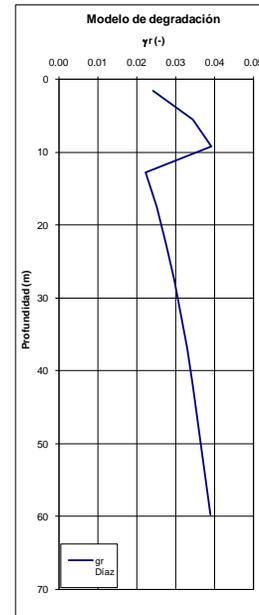
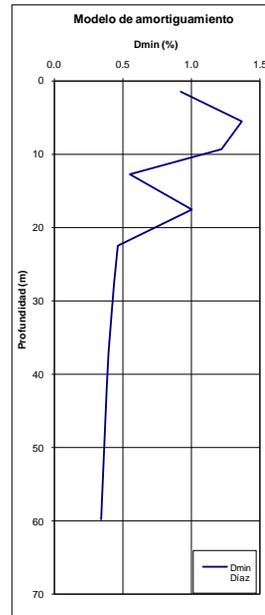
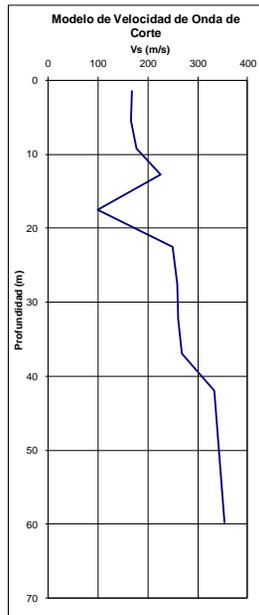
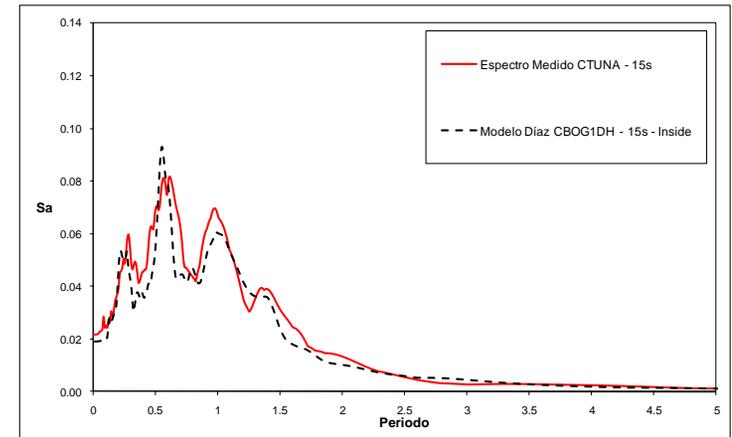


Figura 5.15. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CTUNA"

• Colegio Fernando Mazuera - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CBOSA 1	1	CH	Arcilla limosa algo arenosa	0	4	35	0.938	24	1.83	245	190
CBOSA 2	2	CH	Arcilla limosa algo arenosa	4	8	35	0.938	24	1.83	245	225
CBOSA 3	3	SM	Arena limosa algo arcillosa gris a carmelita	8.0	12.0	24	0.680	11	1.87	270	263
CBOSA 4	4	CH	Arcilla limosa y/o limo arcilloso algo arenoso carmelita	12.0	17.0	32	0.862	29	1.73	245	249
CBOSA 5	5	PT	Turba	17.0	18.0	95	2.381	80	1.20	140	145
CBOSA 6	6	ML	Limo arcilloso con intercalaciones de arena	18.0	25.0	29	0.791	12	1.89	245	261
CBOSA 7	7	PT	Turba	25.0	27.0	196	4.788	94	1.13	85	93
CBOSA 8	8	SM	Arena limosa	27.0	31.0	30	0.809	4	1.95	270	298
CBOSA 9	9	CL	Arcilla limosa	31.0	33.0	35	0.937	24	1.92	245	275
CBOSA 10	10	SM	Arena limosa gris	33.0	35.0	26	0.725	5	1.95	270	307
CBOSA 11	11	CL	Arcilla verde carmelita	35.0	40.0	25	0.695	12	1.76	245	283
CBOSA 12	12	SM	Arena limosa	40.0	42.0	25	0.694	15	2.10	270	316
CBOSA 13	13	OH	Madera	42.0	45.0	60	1.534	80	1.30	245	289
CBOSA 14	14	CL	Arcilla	45.0	48.0	23	0.644	15	1.80	245	291
CBOSA 15	15	PT	Turba	48.0	51.0	100	2.496	54	1.41	135	161
CBOSA 16	16	SM	Arena gris verdosa rojiza	51	56	22	0.622	15	2.02	270	327
CBOSA 17	17	SM	Arena gris verdosa rojiza	56	62	22	0.622	15	2.02	270	334
CBOSA 18	18	GP	Gravas	62	71	3	0.166	0	2.10	275	348
CBOSA 19	19	GP	Gravas	71	80	3	0.166	0	2.10	275	358
CBOSA 20	20	GP	Gravas	80	90	3	0.166	0	2.10	275	367

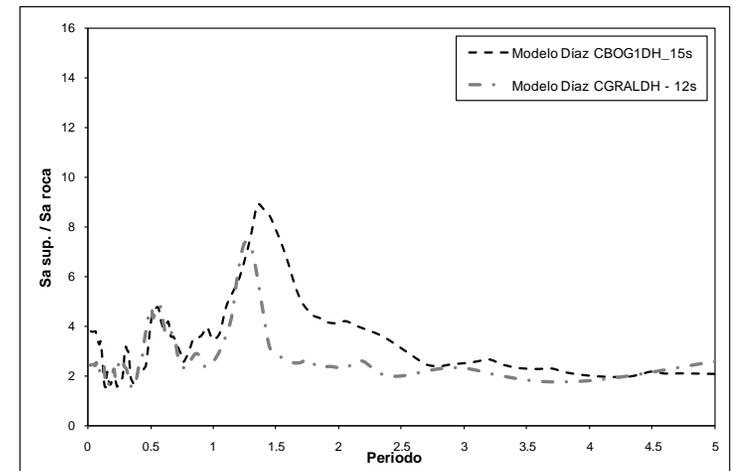
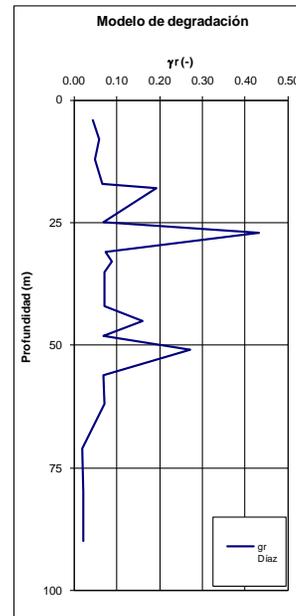
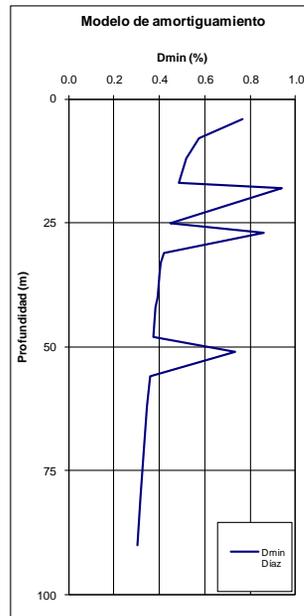
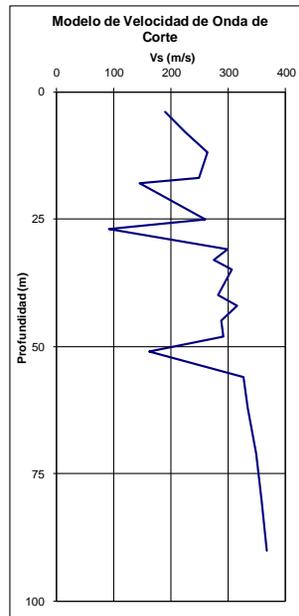
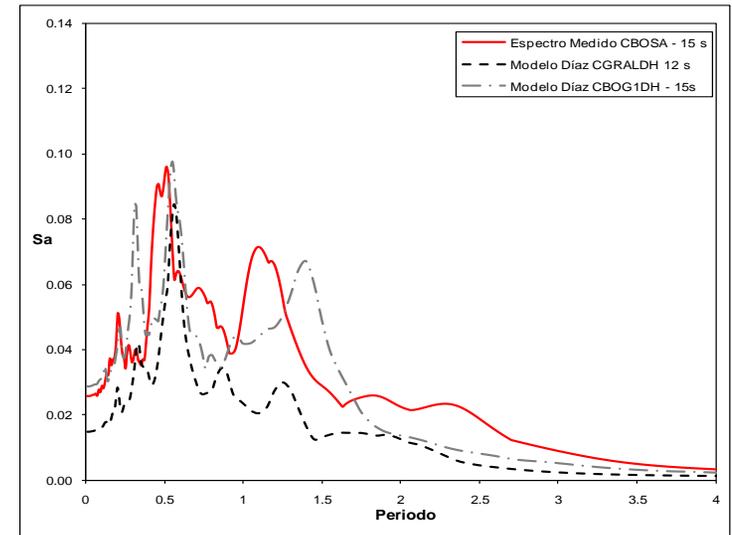


Figura 5.16. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CBOSA"

● Parque Timiza - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	Prof media (m)	Espesor (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CTIMI	1	SM	Arena de grano fino a medio color marron amarillento	0	5.5	2.8	5.5	20.61	0.589	4	1.60	240	193
CTIMI	2	SC	Arena arcillosa de grano fino marron con intercalaciones	5.5	10.5	8.0	5	27.83	0.762	17	1.70	240	233
CTIMI	3	CH	Arcilla gris oliva	10.5	12.0	11.3	1.5	76.10	1.920	89	1.56	180	186
CTIMI	4	SP	Arena de grano fino marron	12	18.5	15.3	6.5	27.98	0.765	15	1.53	215	227
CTIMI	5	SP	Arena de grano fino marron	18.5	25.0	21.8	6.5	27.98	0.765	15	1.53	215	233
CTIMI	6	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	25	30.0	27.5	5	28.19	0.771	23	2.10	215	240
CTIMI	7	CL	Arcilla limosa gris oliva a marrón	30	35.0	32.5	5	25.03	0.695	12	1.55	215	246
CTIMI	8	CL	Arcilla limosa gris oliva a marrón	35	40.0	37.5	5	25.03	0.695	12	1.55	215	249
CTIMI	9	SP	Arena de grano fino marrón	40	44.0	42.0	4	28.95	0.789	15	2.14	230	271
CTIMI	10	CL	Arcilla arenosa marrón a gris	44	51.0	47.5	7	22.92	0.644	15	1.64	150	180
CTIMI	11	CL	Arcilla arenosa marrón a gris	51	58.0	54.5	7	22.92	0.644	15	1.64	150	183
CTIMI	12	CL	Arcilla arenosa marrón a gris	58	65.0	61.5	7	22.92	0.644	15	1.64	150	186
CTIMI	13	SP	Arena de grano fino marrón con intercalaciones de arcilla	65	70.0	67.5	5	22.00	0.622	26	1.98	235	296
CTIMI	14	CL	Arcilla arenosa marrón amarillento	70	80.0	75.0	10	21.40	0.607	20	2.05	240	309
CTIMI	15	CL	Arcilla arenosa marrón amarillento	80	90.0	85.0	10	21.40	0.607	20	2.05	240	317
CTIMI	16	CL	Arcilla arenosa marrón amarillento	90	100	95.0	10	21.40	0.607	20	2.05	240	324
CTIMI	17	CL	Arcilla arenosa marrón amarillento	100	110	105.0	10	21.40	0.607	20	2.05	240	331
CTIMI	18	SC	Areno arcillosa de grano muy fino marrón amarillento	110	122.5	116.25	12.5	21.43	0.608	18	1.90	225	316
CTIMI	19	SC	Areno arcillosa de grano muy fino marrón amarillento	122.5	135	128.75	12.5	21.43	0.608	18	1.90	225	322
CTIMI	20	SC	Areno arcillosa de grano muy fino marrón amarillento	135	150	142.5	15	21.43	0.608	18	1.90	225	327

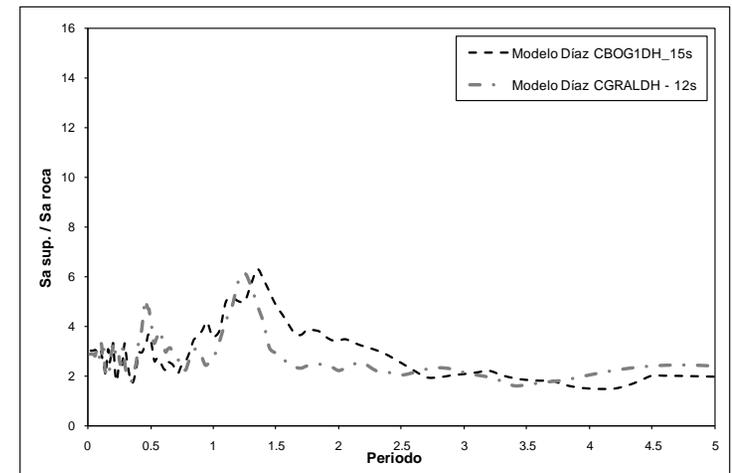
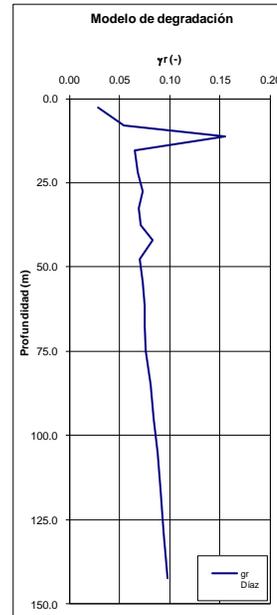
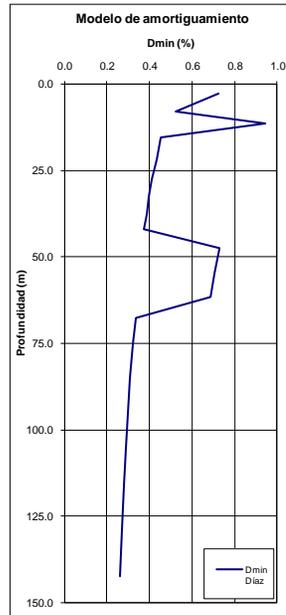
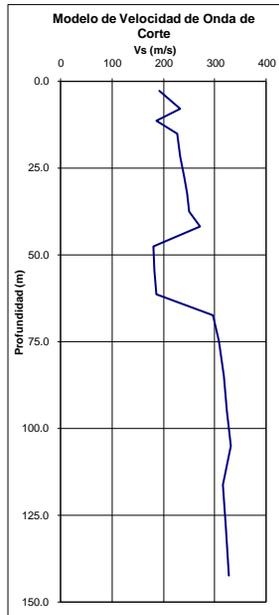
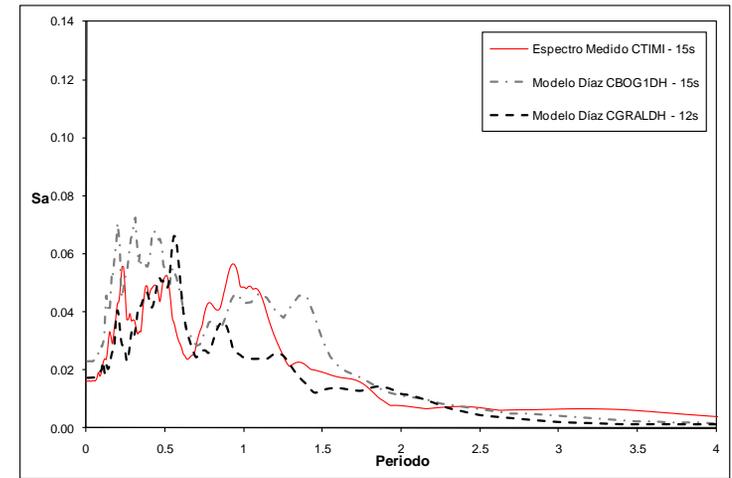


Figura 5.17. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CTIMI"

• Escuela de Tejedores - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CTEJE	1	CL	Arcilla gris carmelita de consistencia media, presenta intercalaciones d	0	4	40	1.245	26	1.55	150	113
CTEJE	2	CL	Arcilla gris carmelita de consistencia media, presenta intercalaciones d	4	8	40	1.245	26	1.55	150	133
CTEJE	3	SC	Arena arcillosa de grano medio a arcilla arenosa café grisáceo con pres	8	11	33	1.082	12	1.77	185	173
CTEJE	4	SC	Arena arcillosa de grano medio a arcilla arenosa café grisáceo con pres	11	14	33	1.082	12	1.77	185	179
CTEJE	5	SM	Arena algo limosa gris de grano fino a grueso con presencia de lentes d	14	18	33	1.085	12	1.80	210	210
CTEJE	6	SM	Arena algo limosa gris de grano fino a grueso con presencia de lentes d	18	22	33	1.085	12	1.80	190	197
CTEJE	7	SM	Arena algo limosa gris de grano fino a grueso con presencia de lentes d	22	27	33	1.085	12	1.80	210	224
CTEJE	8	SM	Arena algo limosa gris de grano fino a grueso con presencia de lentes d	27	32	33	1.085	12	1.80	190	209
CTEJE	9		Turba con trazas de arena	32	35	123	3.047	73	1.40	70	78
CTEJE	10	SM	Arena limosa bien densa con intercalaciones de limos, arcillas y lentes	35	40	25	0.905	12	2.03	110	125
CTEJE	11	SM	Arena limosa bien densa con intercalaciones de limos, arcillas y lentes	40	45	25	0.905	12	2.03	270	315
CTEJE	12	SM	Arena limosa bien densa con intercalaciones de limos, arcillas y lentes	45	50	25	0.905	12	2.03	270	322
CTEJE	13	CL	Arcilla limo arenosa gris verdosa	50	55	29	0.992	23	1.89	260	316
CTEJE	14	CL	Arcilla limo arenosa gris verdosa	55	60	29	0.992	23	1.89	260	321
CTEJE	15	CL	Arcilla limo arenosa gris verdosa	60	65	29	0.992	23	1.89	260	326
CTEJE	16	SC - CL	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	65	72	21	0.791	18	2.08	240	306
CTEJE	17	SC - CL	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	72	80	21	0.791	18	2.08	240	313
CTEJE	18	SC - CL	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	80	88	21	0.791	18	2.08	240	319
CTEJE	19	SC - CL	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	88	97	21	0.791	18	2.08	240	326
CTEJE	20	SC - CL	Intercalaciones de arena arcillosa a arcilla arenosa gris verdosa	97	110	21	0.791	18	2.08	240	333
CTEJE	21	SC	Arena arcillosa de grano fino marron	110	150	21	0.808	18	2.08	240	348

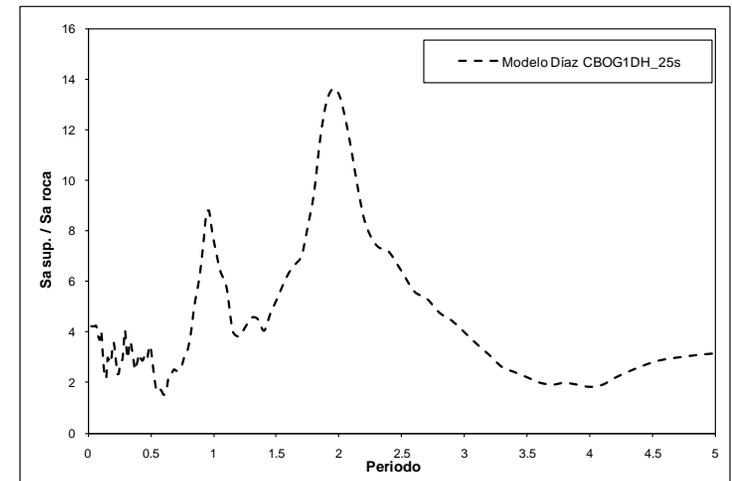
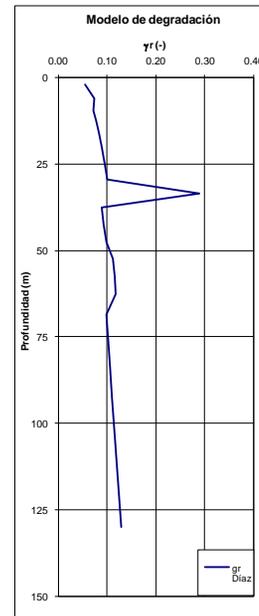
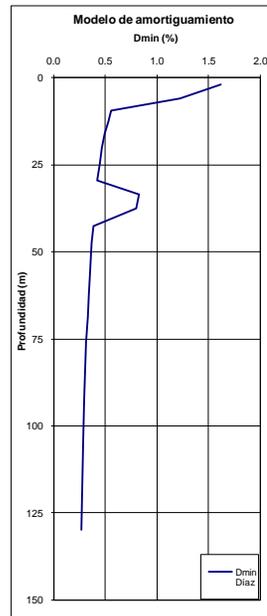
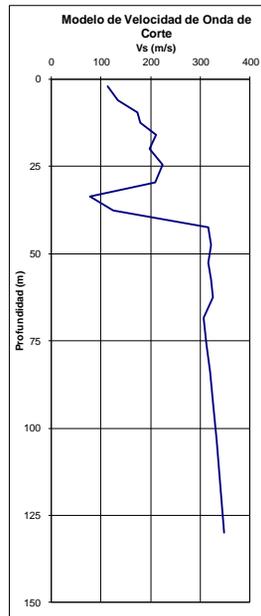
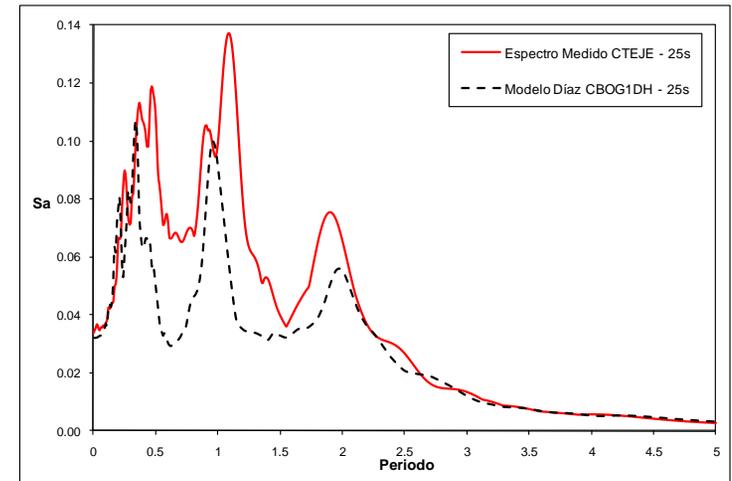


Figura 5.18. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CTEJE"

• Escuela General Santander - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CGRAL 1	1	SC	Arena	0	4	25	0.894	10	1.75	285	220
CGRAL 2	2	SC	Arena	4	9	25	0.894	10	1.75	285	261
CGRAL 3	3	SC	Arena	9	14	25	0.894	10	1.75	285	279
CGRAL 4	4	CH	Arcilla	14	16	100	2.494	120	1.40	158	159
CGRAL 5	5	CL	Arena	16	21	40	1.254	20	1.70	265	272
CGRAL 6	6	CL	Arena	21	25.5	40	1.254	20	1.70	265	281
CGRAL 7	7	OH	Arcilla orgánica	25.5	30	200	4.894	250	1.10	140	150
CGRAL 8	8	CL	Arena	30	35	40	1.254	20	1.80	265	289
CGRAL 9	9	CL	Arena	35	40	40	1.254	20	1.80	265	297
CGRAL 10	10	SP	Arena	40	45	20	0.774	0	1.85	285	326
CGRAL 11	11	SP	Arena	45	50	20	0.774	0	1.85	285	333
CGRAL 12	12	CL	Arena	50	53	20	0.774	20	1.85	265	315
CGRAL 13	13	CH	Arcilla	53	55	80	2.014	120	1.60	158	189
CGRAL 14	14	CL	Arena	55	90	20	0.774	20	1.85	285	360

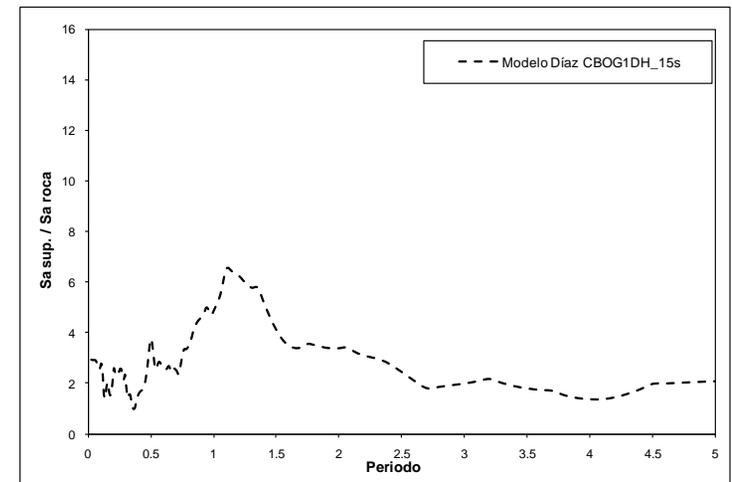
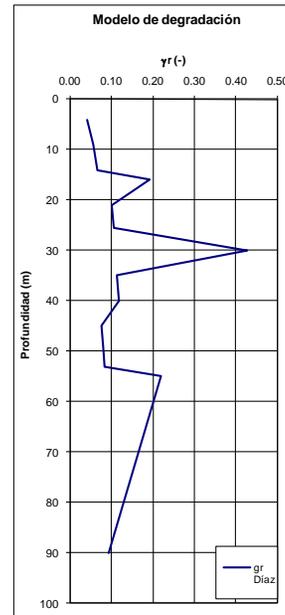
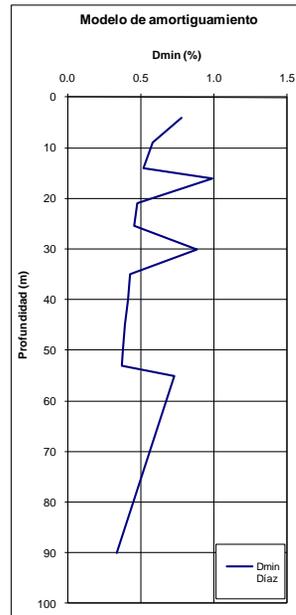
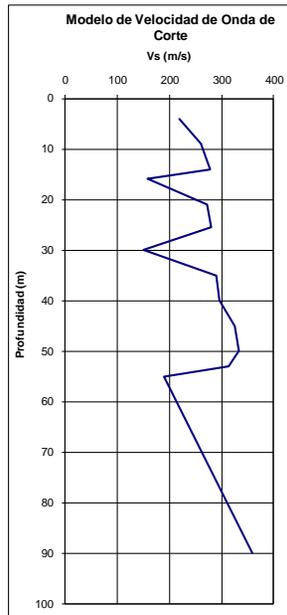
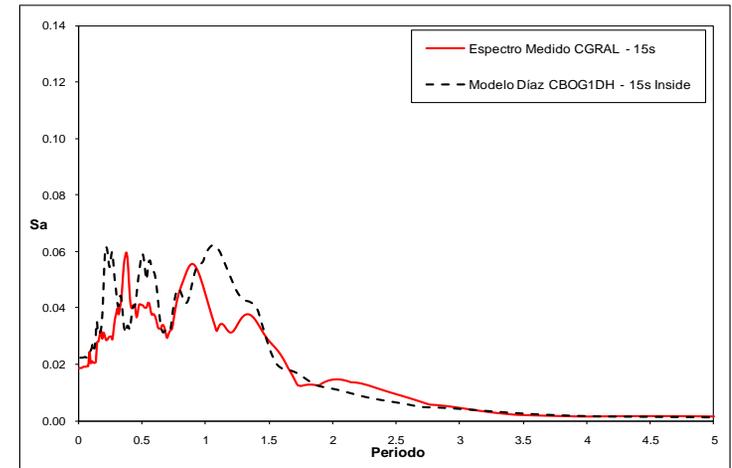


Figura 5.19. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CGRAL"

● Col. Kennedy - Aluvial

ID	No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vref m/s	Vs modelado m/s
CCKEN 1	1	CH	Arcilla limosa gris verdosa	0	5	35	0.942	37	1.763	180	145
CCKEN 2	2	SM	Arena limosa gris clara de grano fino	5	12	26	0.921	11	1.982	220	211
CCKEN 3	3	CH	Arcilla limo arenosa café	12	16	40	1.054	50	1.630	120	122
CCKEN 4	4	CH	Arcilla limo arenosa café	16	21	40	1.054	50	1.630	120	125
CCKEN 5	5	MH - PT	Limo con turba	21	24	172	4.224	175	1.270	80	85
CCKEN 6	6	SC	Arena arcillosa de grano fino	24	30	27	0.947	19	1.800	210	228
CCKEN 7	7	CL	Arcilla limosa dura	30	37	30	0.814	15	1.709	165	185
CCKEN 8	8	CL	Arcilla limosa dura	37	45	30	0.814	15	1.709	165	190
CCKEN 9	9	SM	Arena limosa de grano fino	45	50	23	0.844	18	2.020	210	248
CCKEN 10	10	CL	Arcilla arenosa gris a marrón	50	57	37	0.985	31	1.800	170	205
CCKEN 11	11	CL	Arcilla arenosa gris a marrón	57	65	37	0.985	31	1.800	170	210
CCKEN 12	12	SP - CL	Arena marron de grano fino a arcilla limosa gris	65	70	16	0.680	26	1.900	210	264
CCKEN 13	13	CL	Arcilla limosa algo arenosa café	70	94	24	0.677	23	1.880	170	221
CCKEN 14	14	CL	Arcilla limosa algo arenosa café	94	110	24	0.677	23	1.880	170	230
CCKEN 15	15	SC	Arena arcillosa de grano fino marrón	110	132	24	0.867	18	1.973	210	294
CCKEN 16	16	CL	Arcilla gris verdosa	132	147	34	0.918	30	1.750	150	215
CCKEN 17	17	SM	Arena arcillosa marron de grano fino	147	159.5	29	0.989	21	1.760	210	306
CCKEN 18	18	CL	Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	159.5	190	25	0.689	13	2.008	180	269
CCKEN 19	19	CL	Arcilla limosa gris a marron con lentes de arena	190	225	25	0.689	13	2.008	180	278
CCKEN 20	20	CL	Arcilla limosa gris	225	240	28.15	0.769	16.03	2.070	180	284
CCKEN 21	21	SC	Arena de grano fino ligeramente arcillosa	240	250	40.64	1.269	51.38	1.790	220	351

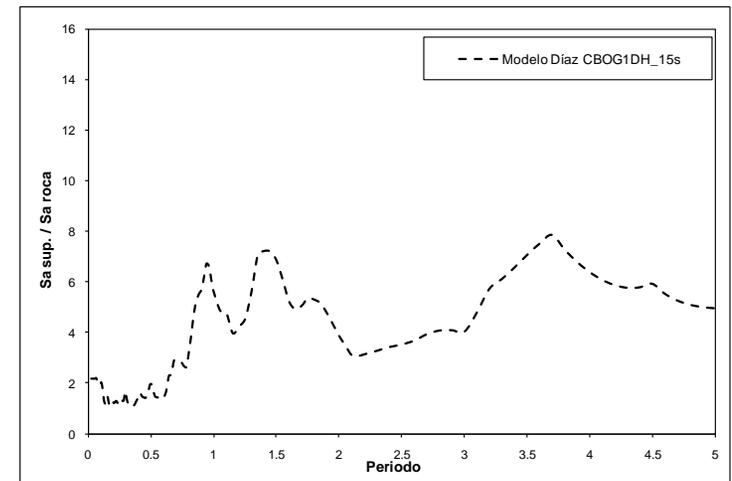
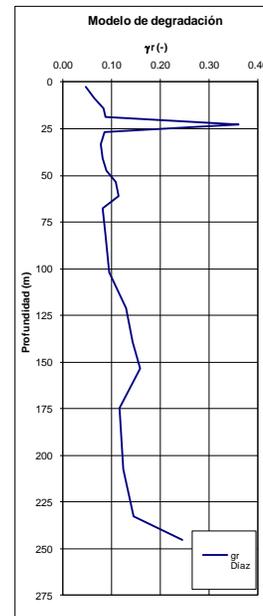
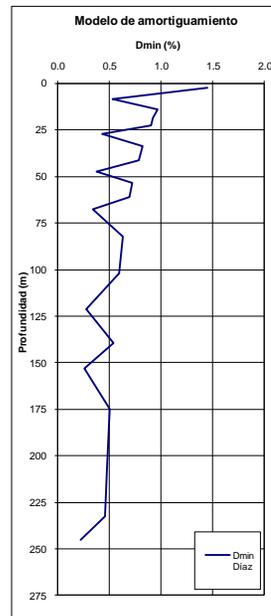
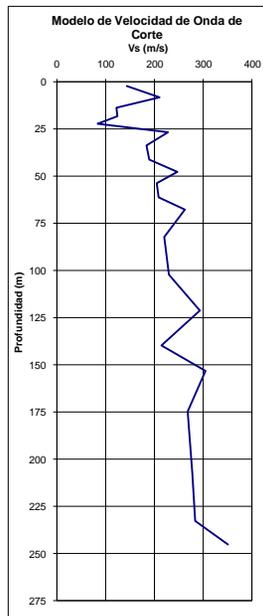
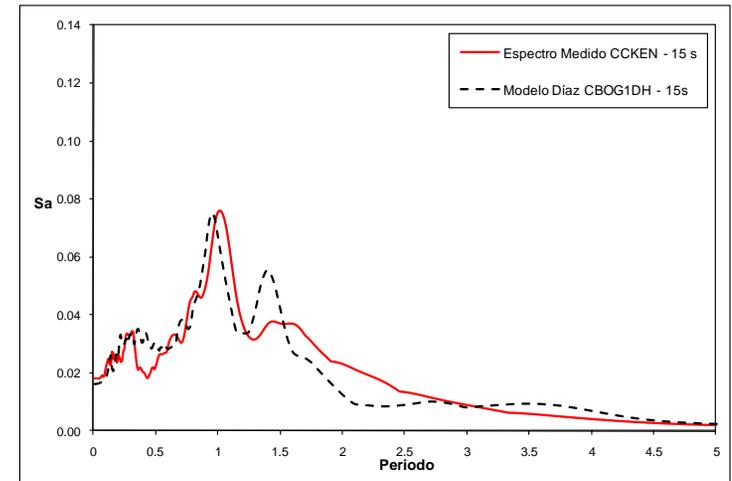


Figura 5.20. Modelo de respuesta 1D y resultados estación "CCKEN"

5.6 SÍNTESIS

La Tabla 5.1 consolida los resultados obtenidos de las modelaciones unidimensionales en lo que respecta a periodos naturales de vibración del depósito, amplificaciones máximas y velocidades de onda de corte promedio tanto para el depósito completo como para los primeros 50 metros.

SECTOR	ESTACIÓN	ID	Prof. Depósito (m)	Periodo natural			Amp. max	Velocidad onda de corte	
				1 (s)	2 (s)	3 (s)		Vs _{50m} (m/s)	Vs _{prom} (m/s)
Piedemonte	Universidad de la Salle	CUSAL	35	0.7	0.3	-	10.6	-	193
Piedemonte	Colonia Escolar de Usaquén	CUSAQ	95	1.7	1.1	0.3	6.9	175	220
Lacustre	Club Banco de la Republica	CBANC	50	1.5	1.2	0.5	14.1	136	136
Lacustre	Escuela Colombiana de Ingeniería	CEING	130	2.8	1.1	0.4	10.0	102	186
Lacustre	Uniagraria	CUAGR	130	2.6	1.0	0.6	13.0	117	201
Lacustre	INGEOMINAS	CBOG1	180	2.6	1.2	0.4	13.3	157	279
Lacustre	Universidad Corpas	CCORP	250	3.6	1.5	0.9	11.6	136	275
Lacustre	Jardín Botánico	CAJBO	275	3.8	1.7	1.1	15.1	113	287
Lacustre	Centro de Estudios del Niño	CNIÑO	225	3.5	1.4	0.9	22.4	126	260
Lacustre	Avianca	CAVIA	360	5.3	1.8	0.9	7.5	123	274
Lacustre	Parque la Florida	CFLOD	500	5.8	2.4	1.5	9.2	137	344
Lacustre	Club del Tiempo	CTIEM	425	4.9	1.9	0.9	11.1	130	345
Lacustre - Aluvial	CITEC	CCITE	250	3.5	1.4	0.8	10.3	185	286
Lacustre - Aluvial	Planta de Bombeo Fontibón	CFONT	275	4.0	1.8	1.2	9.3	104	273
Aluvial	Parque el Tunal	CTUNA	75	1.1	0.5	0.2	5.7	238	277
Aluvial	Colegio Fernando Mazuera	CBOSA	90	1.2	0.5	0.3	8.9	250	293
Aluvial	Parque Timiza	CTIMI	150	2.2	1.2	0.9	5.8	226	275
Aluvial	Escuela de Tejedores	CTEJE	150	2.1	1.0	0.3	13.6	198	287
Aluvial	Escuela General Santander	CGRAL	90	1.2	0.5	0.2	6.5	268	304
Aluvial	Col. Kennedy	CCKEN	250	4.0	1.4	0.9	7.2	180	247

Tabla 5.1. Resumen de resultados

La zona Piedemonte tan solo cuenta con dos estaciones, específicamente ubicadas en el piedemonte A al nororiente de la ciudad por lo tanto los resultados no son extensibles a las otras dos zonas de piedemonte. Los resultados obtenidos tienen alta heterogeneidad y se encuentran fuertemente influenciados por las zonas contiguas de lacustre. La velocidad de onda de corte promedio "Vs_{prom}" de 190 a 220 m/s, adicionalmente se evaluó la velocidad de onda de corte promedio para los primeros 50 metros de profundidad "Vs₅₀" encontrando un rango de variación de entre 170 y 190 m/s. En relación a los niveles de amplificación se encuentran entre 7 y 11 veces.

La zona lacustre presenta velocidades de onda de corte promedio "Vs_{prom}" de 140 a 220 m/s para los depósitos de menos de 200 metros de profundidad y de 260 a 340 m/s para los depósitos de entre 200 y 500 de profundidad. Adicionalmente se evaluó la velocidad de onda de corte promedio para los primeros 50 metros de profundidad "Vs₅₀" encontrando un rango de variación de entre 100 y 160 m/s. En relación a los niveles de amplificación se encuentran entre 7 y 15 veces, destacándose la estación CNIÑO con amplificaciones de 22 veces los registros empleados en roca.

Aunque la zona Lacustre – Aluvial tan solo cuenta con dos estaciones y sus resultados pueden no ser concluyentes se encontró que las velocidades de onda de corte promedio “ $V_{s\text{prom}}$ ” de 270 a 290 m/s, adicionalmente se evaluó la velocidad de onda de corte promedio para los primeros 50 metros de profundidad “ V_{s50} ” encontrando un rango de variación de entre 100 y 190 m/s. En relación a los niveles de amplificación se encuentran entre 9 y 10 veces, finalmente se observa que la estación “CITEC” localizada en la parte media de esta zona tiene un comportamiento semejante a las estaciones ubicadas en la zona de aluvial 200, por su parte la estación “CFONT” ubicada en la sección distal de esta zona presenta un comportamiento similar a las zonas de lacustre 300.

La zona aluvial presenta velocidades de onda de corte promedio “ $V_{s\text{prom}}$ ” de 250 a 300 m/s, adicionalmente se evaluó la velocidad de onda de corte promedio para los primeros 50 metros de profundidad “ V_{s50} ” encontrando un rango de variación de entre 180 y 270 m/s. En relación a los niveles de amplificación se encuentran entre 6 y 14 veces.

CAPITULO 6

6 MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

Al estudiar la respuesta sísmica del depósito de suelos de Bogotá se hace necesario emplear herramientas tecnológicas que permitan representar de forma integral el problema de la propagación de ondas, no solo en forma vertical como se considero en los modelos de respuesta unidimensional realizados en el capítulo 5 los cuales son validos para un medio homogéneo estratificado, si no también tener en cuenta las variaciones presentadas en términos de amplificación ocasionados por efectos topográficos en la superficie del terreno, profundización del basamento rocoso y por la distribución de los materiales en profundidad.

Por su parte los modelos bidimensionales cobran validez en condiciones en las que la variabilidad de los materiales del depósito permite extender el comportamiento a una condición plana de deformaciones (Ingeominas,1997), lo cual es fácilmente identificable en la cuenca sedimentaria sobre la cual se encuentra edificada la ciudad de Bogotá. Dado lo anterior, se plantearon dos secciones transversales a la ciudad que se ilustran en la Figura 6.1. La primera en el norte en alineación este – oeste, iniciando en los cerros orientales a la altura de la calle 153 y terminando en los cerros de suba alrededor de la calle 138, esta sección se proyectó pensado en representar el depósito de suelos blandos como también observar el efecto de cuenca de este sector. La segunda sección presenta una alineación sureste - noroeste empezando a la altura de la carrera 8 este y alineado en su inicio con la margen izquierda del Rio Fucha (AC 11 sur) y culminando unos metros después del rio Bogotá aproximadamente a la altura de la calle 26 sur, esta sección busca representar el depósito de suelos aluviales del sur transportados por la dinámica de los ríos Fucha, Tunjuelo y Bogotá.

El análisis de respuesta bidimensional se realizo por medio del software QUAD4M, 1994, que soluciona la ecuación de movimiento en una formulación desacoplada en esfuerzos totales en el dominio del tiempo, a partir de la implementación de un modelo lineal equivalente, que busca representar el comportamiento no lineal del suelo empleando un sistema lineal elástico amortiguado bajo el enfoque del método de los elementos finitos (Ingeominas, 2005).

Uno de los insumos necesarios para realizar análisis de respuesta es conocer cómo varía la rigidez y el amortiguamiento de los materiales para diferentes niveles de deformación, situación que lleva a emplear modelos de comportamiento del suelo en función de estos dos parámetros, para lo cual se han desarrollado propuestas basadas en el comportamiento no lineal de los materiales a partir de un modelo histerético para la disipación de energía. Estos relacionan la variación o degradación del modulo de corte “G/Gmax” y el amortiguamiento “D” con los factores que más inciden en la determinación del comportamiento dinámico de los materiales como el nivel de deformaciones aplicadas, esfuerzo de confinamiento, tipo del suelo y sus propiedades índice de plasticidad, frecuencia de aplicación de la carga y número de ciclos, relación de sobre-consolidación, relación de vacíos, grado de saturación, edad geológica del depósito y características de los granos (Zhang, 2005).

Dado lo anterior el modelo empleado corresponde al propuesto por Díaz-Parra, 2007, que parte de las formulaciones propuestas por Stokoe, 2004 y Matasovic, 1993, para los cuales se calculan los coeficientes y simplifica las ecuaciones a partir del procesamiento de una base experimental de 35 pruebas triaxiales cíclicas desarrolladas en el depósito de suelos blandos de la Ciudad de Bogotá. La ventaja de emplear este modelo es que fue desarrollado para el ambiente geológico local y sus resultados han sido debidamente comprobados en los proyectos de microzonificación sísmica ejecutados en la ciudad.

El procedimiento para obtener las curvas de degradación del módulo y amortiguamiento se resume en: determinar la relación de vacíos y estado de esfuerzos promedio del material analizado, calcular los parámetros dinámicos γ_{ref} y D_{min} y obtener los valores de degradación del módulo (G/G_0) y amortiguamiento (D) para los niveles de deformación cortante de interés.

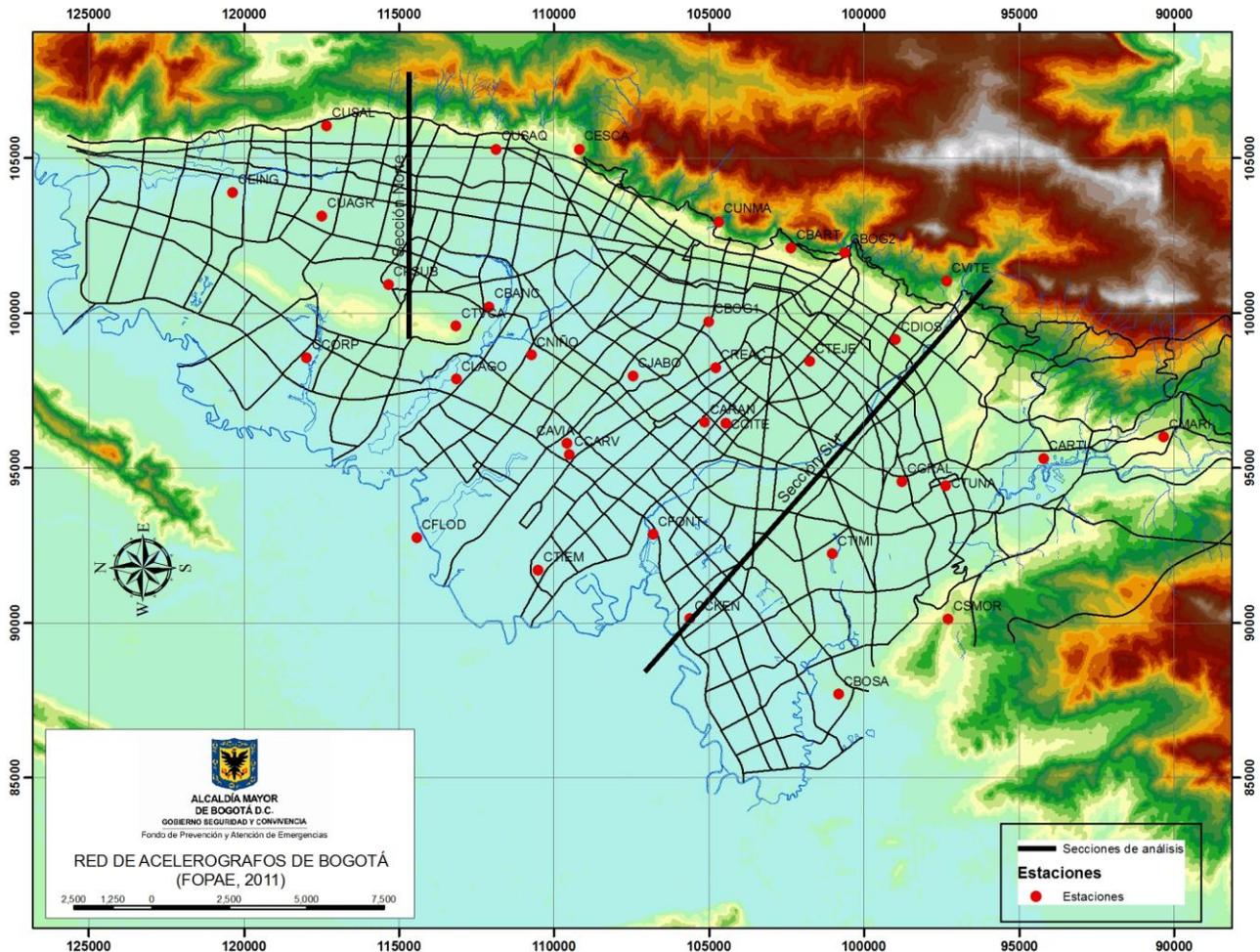


Figura 6.1. Localización de secciones de análisis en planta

6.1 METODOLOGÍA

La metodología seguida para la modelación bidimensional se agrupa en cuatro grandes actividades encaminadas a definir las señales sísmicas de trabajo, identificar el modelo geotécnico, modelación de la respuesta sísmica en 2D y finalmente el análisis de resultados, cada una de estas actividades se detallan a continuación:

10. Selección de señales, esta actividad se apoyó en las señales empleadas en la calibración de los modelos unidimensionales y pretende estandarizar los registros de tal manera que sus características sean compatibles con las consideraciones del programa de análisis, en condiciones de confinamiento de la señal, unidades de medición, paso del tiempo y duración, lo anterior con el propósito de optimizar los tiempos de procesamiento sin inducir grandes errores en los cálculos.

11. Definición del modelo geotécnico, esta actividad se refiere a la recopilación de la información geotécnica cercana al alineamiento de la sección transversal trazada, para de esta manera identificar la secuencia litológica de los materiales hasta el contacto con el basamento rocoso para posteriormente asignar las propiedades geotécnicas que definen el comportamiento mecánico y dinámico de los materiales (curvas dinámicas), lo anterior sin perder de vista el ambiente geológico de formación en la zona de estudio y características morfológicas del sector.
12. Modelación de la respuesta en 2D, este paso consiste en definir la geometría del modelo, con lo cual se busca materializar en un dibujo en dos dimensiones el resultado del modelo de capas definido en el paso anterior, de tal forma que esta distribución de los materiales representen lo mejor posible la realidad y permitan realizar en forma apropiada la discretización del medio mediante un mallado estructurado. Posteriormente se deben definir las condiciones de frontera en el modelo, con lo cual se finalizan las actividades del pre proceso de la modelación, que se llevo a cabo empleando el software de dibujo AUTOCAD y la herramienta GID que contiene utilidades para la generación de superficies, definición de materiales, diseño y generación del enmallado, de manera tal que se obtienen los archivos de entrada para el software QUAD4M que es el encargado de evaluar la respuesta sísmica de los suelos.
13. Análisis de resultados, se realiza en términos de historias de aceleraciones, espectros de respuesta y relaciones espectrales, para lo cual se seleccionan unos puntos de control en el modelo (nodos) que presentan cercanía y condiciones comparables en relación con la localización, profundidad del depósito, materiales y topografía con las estaciones de la RAB, de tal forma que se pueda comparar la respuesta, respecto a las amplitudes y periodos modeladas contra las medidas en el sismo de referencia y de esta manera representar de forma aproximada la influencia del medio analizado.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se presenta los resultados obtenidos en la modelación bidimensional de la respuesta sísmica.

6.2 SECCIÓN TÍPICA AL NORTE

6.2.1 Modelo numérico

El modelo realizado en el norte de la ciudad se localiza a la altura de la calle 153 al oriente de la ciudad y culmina a la altura de la calle 138 al occidente como se aprecia en la Figura 6.2, posee una longitud en planta de 7.6 km, el espesor máximo de depósitos es del orden de 180 m, se constituye de 15 materiales térreos y dos materiales rocosos, la malla estructurada está conformada por un total de 68.608 nodos y 67.446 cuadriláteros, se seleccionaron 10 nodos de respuesta, la señal sísmica empleada en la calibración corresponde al registro en el sensor downhole de la estación Uniagraria para el sismo de Quetame, la duración del registro es de 25 s y el paso del tiempo de 0.2 s, En la Figura 6.3 se presenta el modelo de superficies, la malla estructurada y la asignación de materiales.

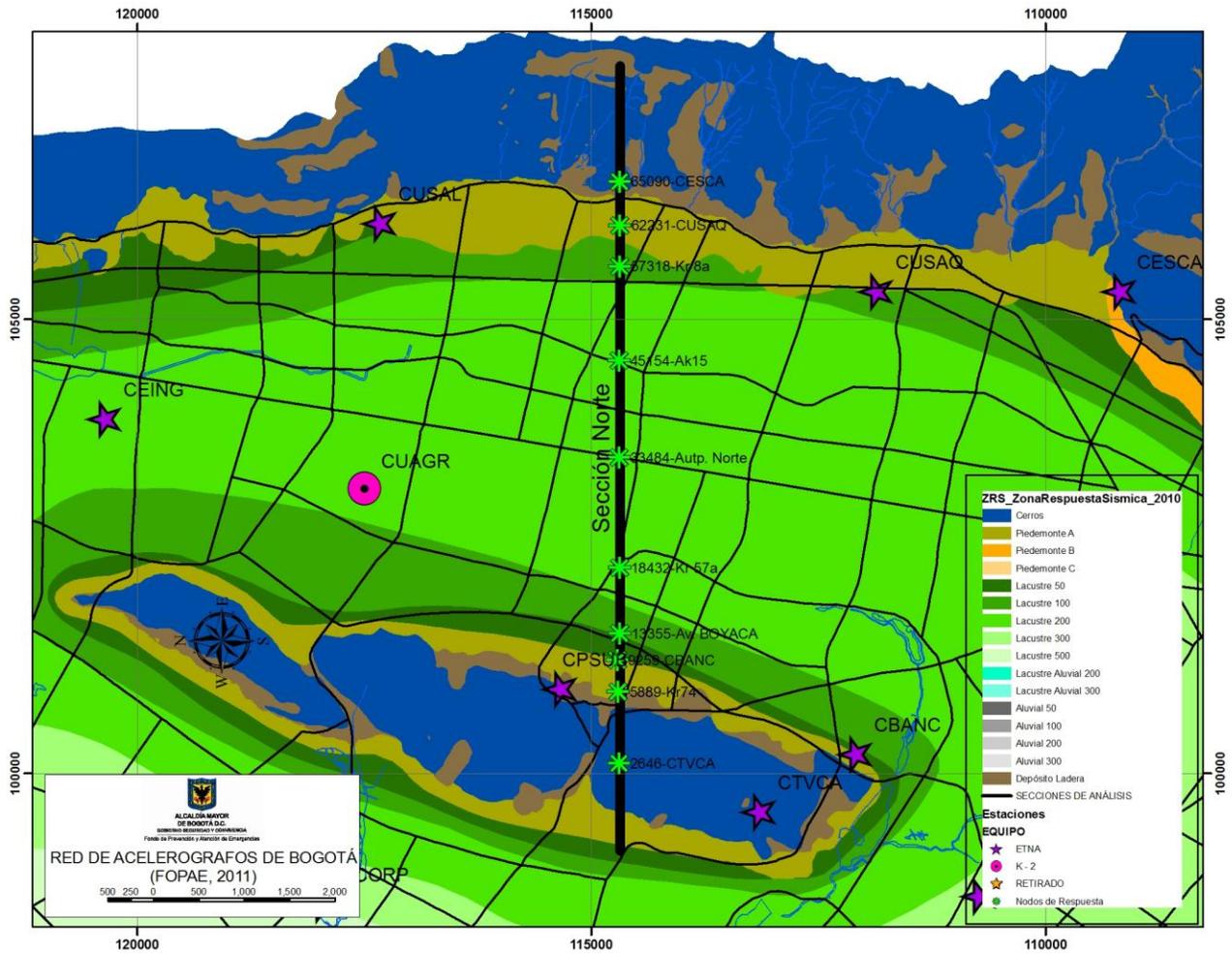


Figura 6.2. Localización del modelo bidimensional al norte

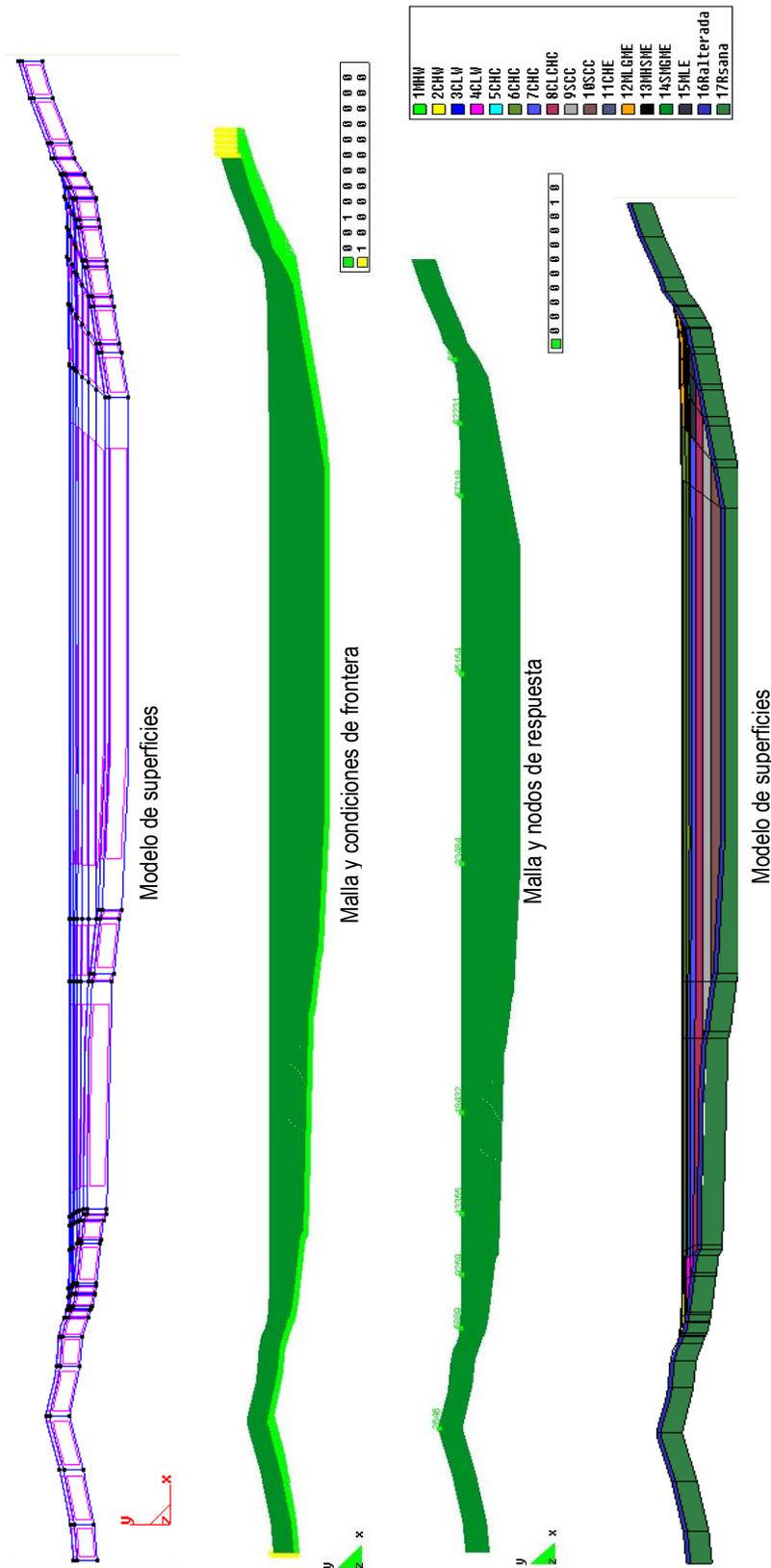


Figura 6.3. Modelo bidimensional norte

6.2.2 Materiales y propiedades dinámicas

Como se ilustra en la Figura 6.3 el modelo se compone de 17 materiales, que se distribuyen en tres segmentos, el primero ubicado en el occidente de la ciudad colindando con los cerros de suba y de aproximadamente 500 metros de longitud, se compone de cuatro materiales de texturas finas y de consistencias firmes correspondientes a depósitos de piedemonte y ladera, de los cuales se resumen sus propiedades de estado básicas en la Tabla 6.1 y sus curvas dinámicas en la Figura 6.13.

El segundo segmento de materiales ubicado en la zona central del modelo con una longitud de 4500 metros, corresponde a la zona de depositación lacustre y se caracterizó por medio de seis materiales, que inicia con suelos de texturas arcillosas de plasticidades altas y consistencias blandas en el paquete correspondiente a la formación sabana y continuando alrededor de los 90m con materiales granulares de tipo areno arcilloso en el paquete de materiales identificado como la formación Subachoque, el resumen de propiedades y curvas dinámicas es presentado en la Tabla 6.2 y Figura 6.5.

Finalmente se encuentra el segmento oriental del modelo, con una longitud aproximada de 700m y que representa los depósitos de piedemonte adyacentes a los cerros orientales, allí se consideraron cinco materiales que se caracterizan por secuencias de limos arenosos a gravas arenosas en matriz limosa, el resumen de propiedades y curvas dinámicas es presentado en la Tabla 6.3 y Figura 6.6. El basamento rocoso en el modelo se encuentra representado mediante dos materiales, el primero con un espesor de 20 metros, que consiste en el conjunto de rocas alteradas y posteriormente cien metros de roca sana, cuyas propiedades y curvas se resumen en la Tabla 6.4 y Figura 6.6.

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Limo arcilloso carmelito	1 MH-W	0.0	5.0	2.5	70	85	14.22	2.75	15.30	8.37	2.12	330	88	0.462	11234
Arcilla gris oscura orgánica	2 CH-W	5.0	15.0	10.0	130	165	13.24	2.65	14.34	5.76	3.21	330	93	0.457	11750
Arcilla gris de consistencia dura	3 CL-W	15.0	22.0	18.5	30	30	15.21	2.65	17.99	11.70	0.98	400	158	0.407	38862
Arcilla gris de consistencia dura	4 CL-W	22.0	50.0	36.0	25	20	15.70	2.65	19.44	12.56	0.68	420	172	0.400	47211

Tabla 6.1. Resumen de materiales segmento occidental - modelo norte

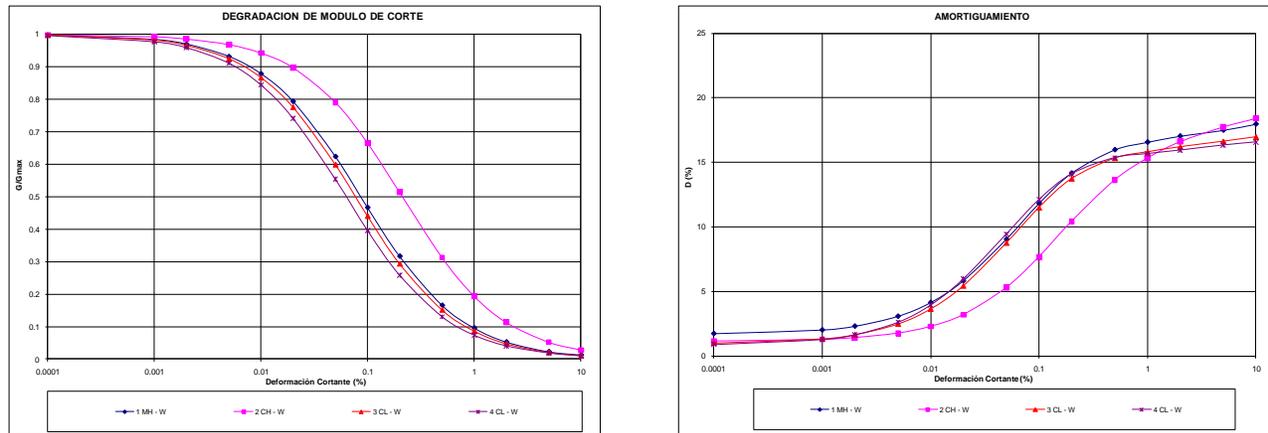


Figura 6.4. Curvas dinámicas segmento occidental – modelo norte

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arcilla	5 CH-C	0.0	5.0	2.5	100	126	15.21	2.75	14.72	7.60	2.49	330	86	0.464	11386
Arcilla	6 CH-C	5.0	30.0	17.5	160	209	14.22	2.65	13.09	5.47	3.93	330	109	0.438	17367
Arcilla	7 CH-C	30.0	55.0	42.5	120	154	14.81	2.65	13.88	6.73	2.97	400	135	0.435	27643
Arcilla algo arenosa	8 CL CH-C	55.0	90.0	72.5	60	70	16.19	2.68	16.31	10.12	1.53	450	189	0.393	59140
Arena fina	9 SC-C	90.0	130.0	110.0	30	29	17.17	2.68	18.89	13.21	0.81	650	336	0.318	197697
Arena fina	10 SC-C	130.0	180.0	155.0	25	22	17.66	2.68	19.53	14.13	0.69	700	366	0.311	241812

Tabla 6.2. Resumen de materiales segmento central - modelo norte

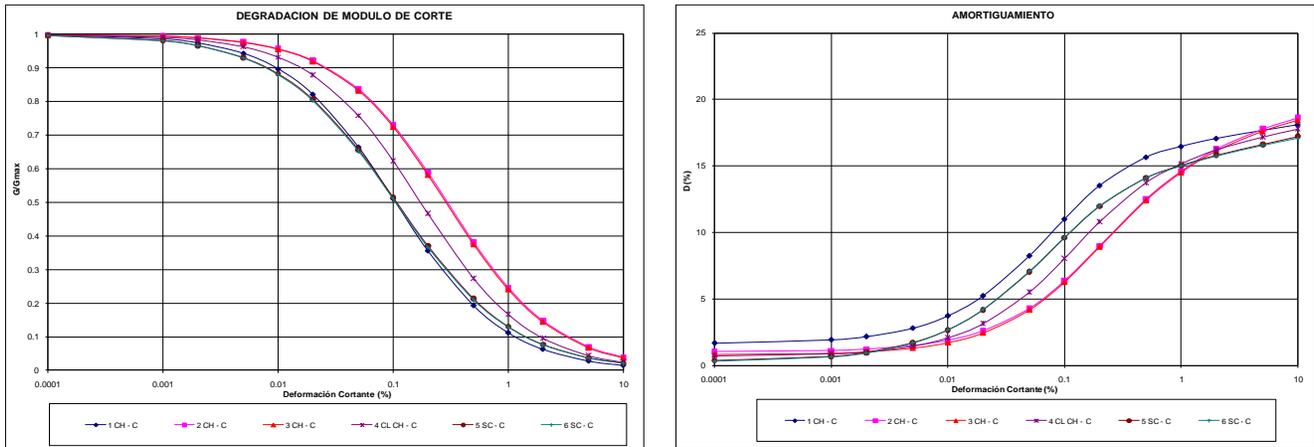


Figura 6.5. Curvas dinámicas segmento central – modelo norte

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arcilla café oscuro	11 CH-E	0.0	5.0	2.5	80	98	15.70	2.50	14.69	8.72	2.01	330	90	0.460	12989
Limo arenoso con lentes de grava	12 ML GM-E	5.0	20.0	12.5	50	56	17.17	2.58	16.56	11.45	1.29	400	141	0.429	34742
Limo arcilloso organico café con lentes de arena	13 MH SM-E	20.0	40.0	30.0	60	70	16.68	2.55	15.80	10.42	1.53	330	131	0.406	29339
Secuencia de arenas finas y gravas en matriz limosa	14 SM GM-E	40.0	50.0	45.0	25	22	17.17	2.68	19.53	13.73	0.69	600	288	0.350	145184
Limo arcilloso gris	15 ML-E	50.0	75.0	62.5	30	29	15.70	2.70	19.00	12.07	0.81	600	275	0.367	120840

Tabla 6.3. Resumen de materiales segmento oriental - modelo norte

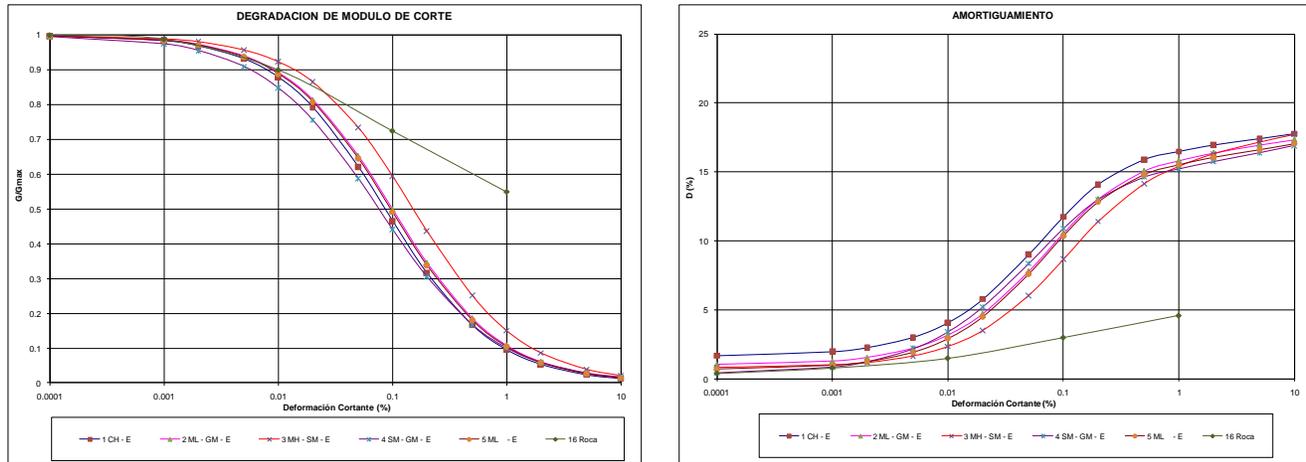


Figura 6.6. Curvas dinámicas segmento oriental – modelo norte

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
ROCA ALTERADA	16 Ralterada						22.0					1750	450	0.465	454314
BASE ROCA	17 Rsana						24.0					2500	1000	0.405	2325000

Tabla 6.4. Resumen de materiales rocosos - modelo norte

6.2.3 Resultados obtenidos

Las modelaciones efectuadas se analizaron en dos sentidos, el primero que corresponde a la interpretación de la historia de aceleraciones en los nodos de respuesta seleccionados en superficie que se ilustran en la Figura 6.7, los espectros de respuesta y relaciones espectrales se presentan en la Figura 6.8, posteriormente se comparan con las respuestas medidas en superficie en las estaciones de la RAB alineadas con el modelo construido (ver Figura 6.11) y la segunda intervención

tuvo lugar en el análisis de las aceleraciones y deformaciones máximas como parte del postproceso de los resultados de propagación de ondas en el medio ver Figura 6.9 y Figura 6.10.

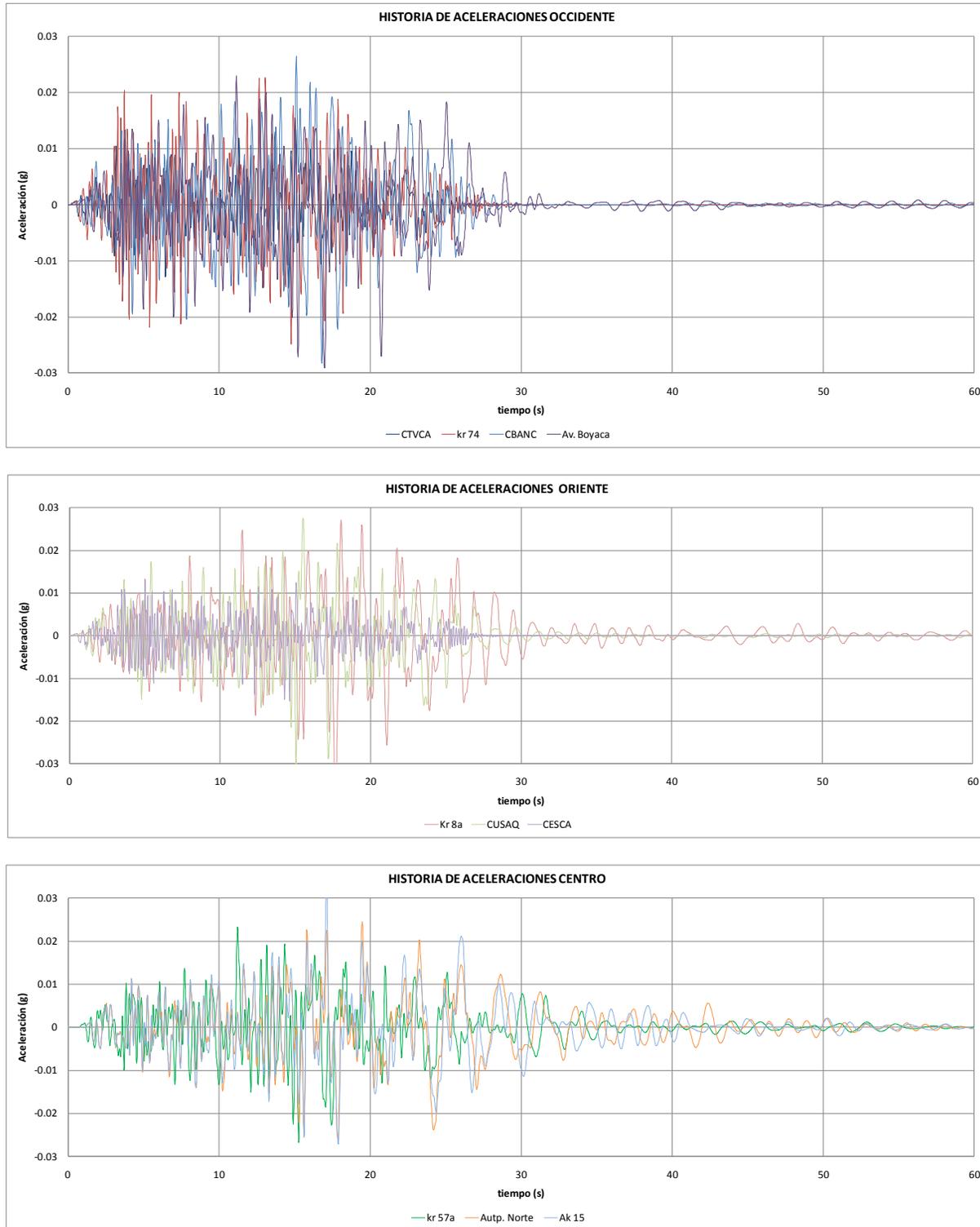


Figura 6.7. Historia de aceleraciones – modelo norte

En las historias de aceleraciones en superficie de los nodos de respuesta seleccionados, se percibe inicialmente mayores picos de aceleración en las zonas de piedemonte, respecto a la duración y amortiguamiento de la señal se evidencia que pese a que el registro de entrada en roca tiene una duración de 25 segundos las vibraciones considerables persisten hasta los 32 segundos en las zonas de piedemonte tanto occidental como oriental y en la zona lacustre las vibraciones se continúan hasta los 45 segundos, por último se observa mayor saturación en la señal de los piedemontes, esto en parte por el espesor de los depósitos considerados en el modelo.

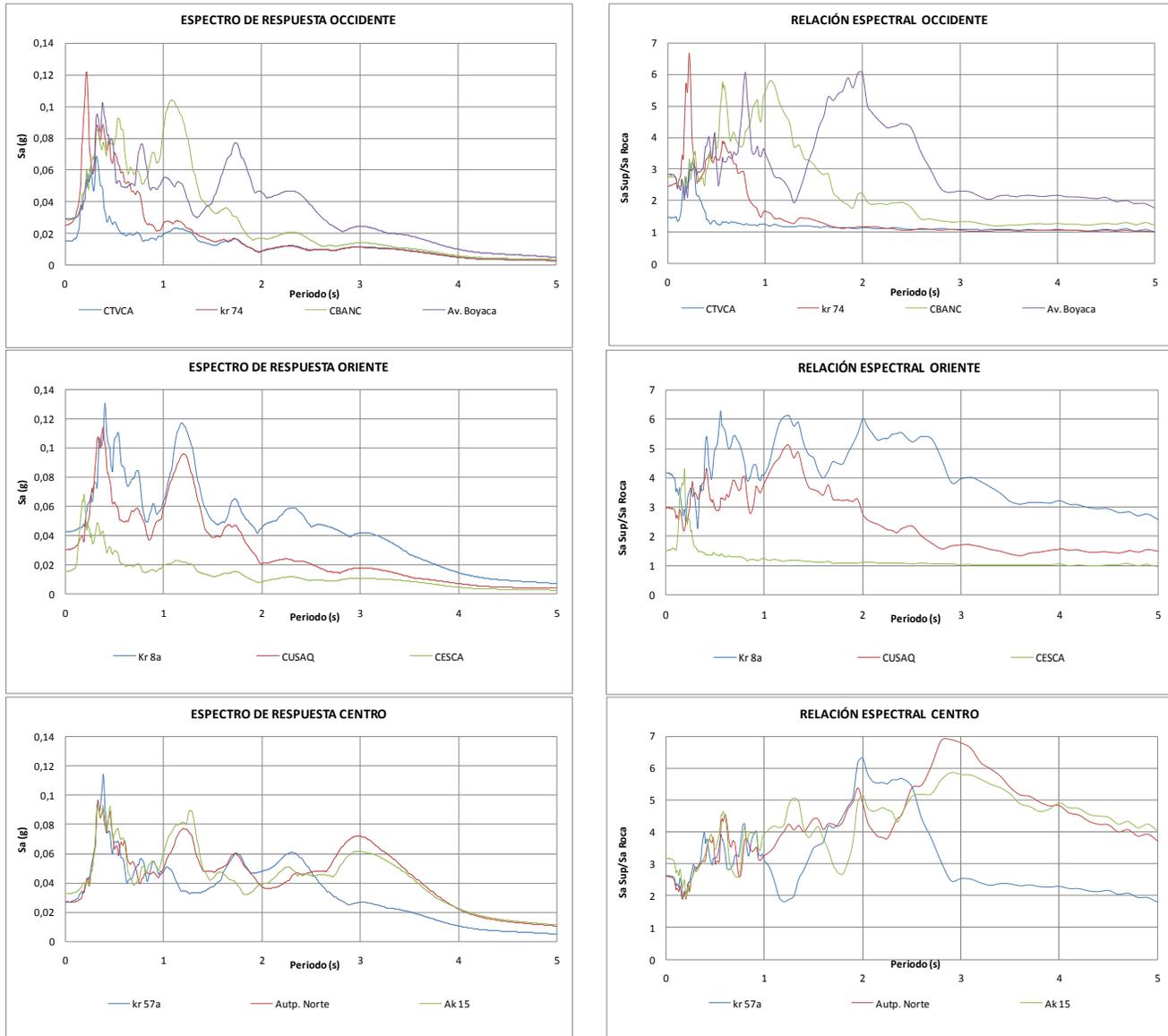


Figura 6.8. Espectros y relaciones espectrales – modelo norte

Los espectros de respuesta en el occidente muestran aceleraciones espectrales hasta de 0,12g y relaciones espectrales del orden de 6 veces lo registrado en roca, respecto a la localización de estos puntos de control encontramos que el punto identificado como “CTVCA” localizado en la unidad de cerros, busca representar el efecto de la amplificación topográfica en el tope del cerro de suba, para el cual se identifico relaciones espectrales hasta de 3 veces el registro en roca para un periodo de 0,3 segundos. El punto identificado como “Kr 74” se localiza en la zona del piedemonte del cerro de suba y como era de esperarse las respuestas máximas se encuentran en la zona de los periodos bajos hasta los 0.4 segundos y un pico de amplificación del orden de 6.7 veces su registro en roca, seguido se encuentra la estación “CBANC” localizada

en la zona del lacustre 50, las respuestas máximas en este punto se encuentra para periodos de 1 y 0.6 segundos, el último punto de control identificado en esta zona es “Av. Boyacá” que se localiza en el lacustre 100 y presenta dos picos de amplificación a 2 y 0.8 segundos, esto como efecto de los mayores espesores en el depósito de materiales en consideración.

Los espectros de respuesta y relaciones espectrales de la zona oriente por su parte presenta un comportamiento similar a la zona occidental en términos de amplificación dado que alcanza aceleraciones espectrales del orden de las 0.12 g y relaciones espectrales del orden de 6 veces sin embargo los picos de amplificación en términos de periodo difieren en parte por la mayor profundización del basamento rocoso. El primer punto en consideración es identificado como “CESCA” representa la zona de transición entre la unidad de cerros y el piedemonte, presenta aceleraciones espectrales hasta de 0.06g y los niveles de amplificación en relación con el registro en roca alcanzan valores hasta de 4 veces, el siguiente punto de control corresponde al denominado como “CUSAQ” que representa los depósitos de piedemonte oriental y presenta dos picos de amplificación a periodos de 0.4 y 1.25 segundos con relaciones espectrales hasta de 5 veces. Por último se encuentra el punto identificado como “Kr 8a” que representa una localización distal del piedemonte que en relación con el punto anterior presenta una forma espectral muy similar, pero se diferencia ya que en terminos de relaciones espectrales exhibe un pico adicional de amplificación, los cuales se encuentran en periodos de 0.6, 1.25 y 2.0 segundos.

Continuando con el análisis se tiene la zona central del modelo que corresponde a la zona de depósitos lacustre en la cual se ubicaron 3 nodos de control y que presenta una respuesta muy pareja pese a la extensión de esta zona. Se observan picos de aceleración espectral del orden de 0.8g a 1g y picos de amplificación a 0.5, 1, 2 y 3 segundos variando de acuerdo con el espesor del depósito de suelos en consideración.

Las aceleraciones máximas en superficie se presentan en las zonas de piedemonte lo cual se identifica con los tonos rojizos en la Figura 6.9 que corresponden a aceleraciones cercanas a los 0.05g, comportamiento asociado al efecto combinado de las ondas de superficie y ondas de cuerpo, de otro lado observando el comportamiento en superficie de la zona lacustre, se percibe la respuesta en tonos amarillos y verdes lo cual corresponde a aceleraciones entre 0.023g y 0.035g aproximadamente en un comportamiento muy uniforme, también se observa que las amplificaciones son considerables en el segmento de los últimos 30 a 50 metros que en términos geotécnicos corresponde al depósito de suelos blandos lo cual combinado con la reducción considerable del confinamiento generan este comportamiento particular.

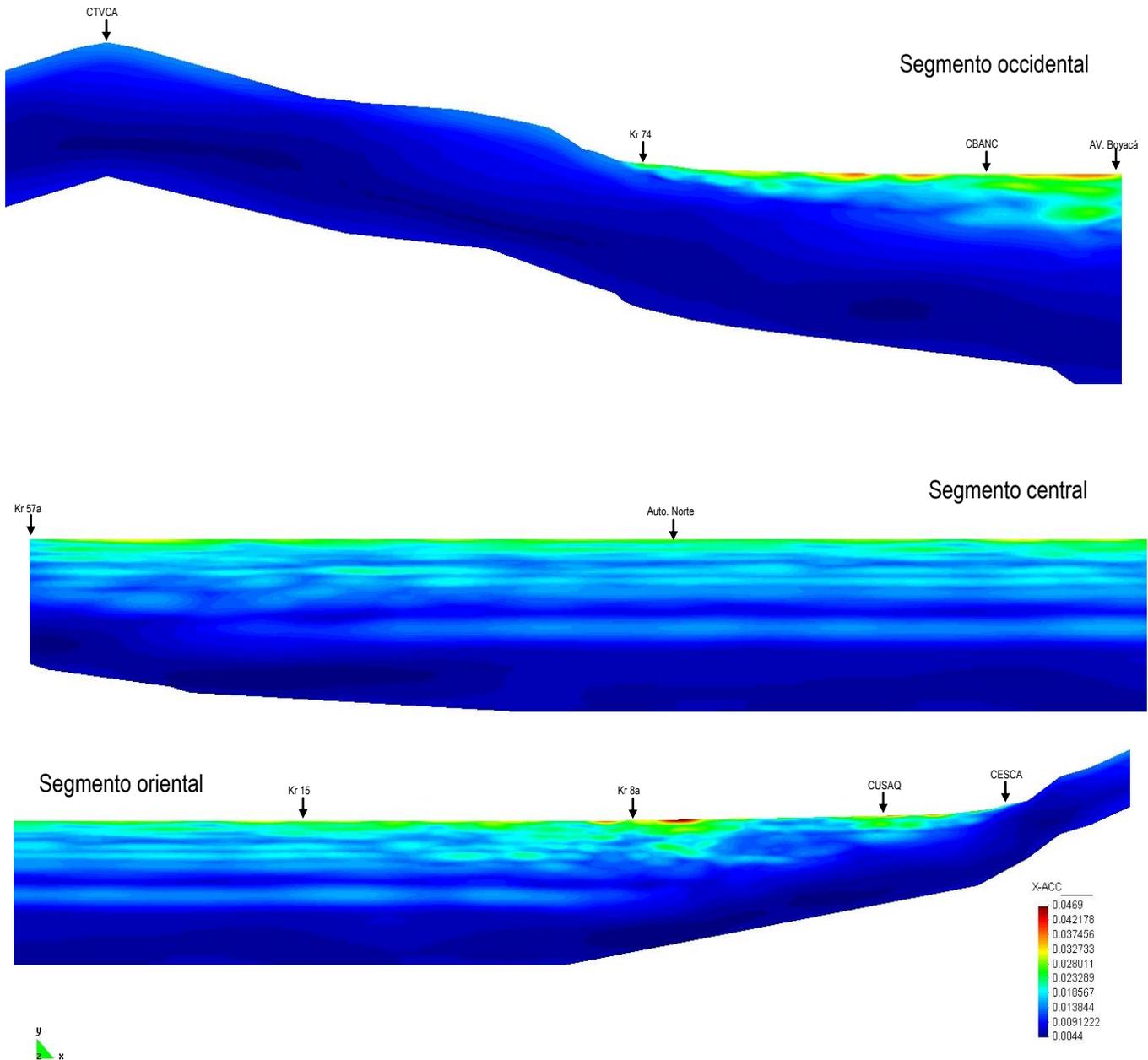


Figura 6.9. Aceleraciones máximas – modelo norte

Las deformaciones máximas se encuentra que las mayores deformaciones se presentan en la zona lacustre igualmente en el depósito de suelos blandos y especialmente en los cambios de rigidez de los materiales, pero en superficie las deformaciones tienden a ser menores por el efecto de la capa sobreconsolidada, en las zonas de piedemonte este comportamiento difiere un poco en parte porque el depósito de estas regiones se caracteriza por suelos de texturas granulares en combinaciones con arcillas y limosa de baja plasticidad.

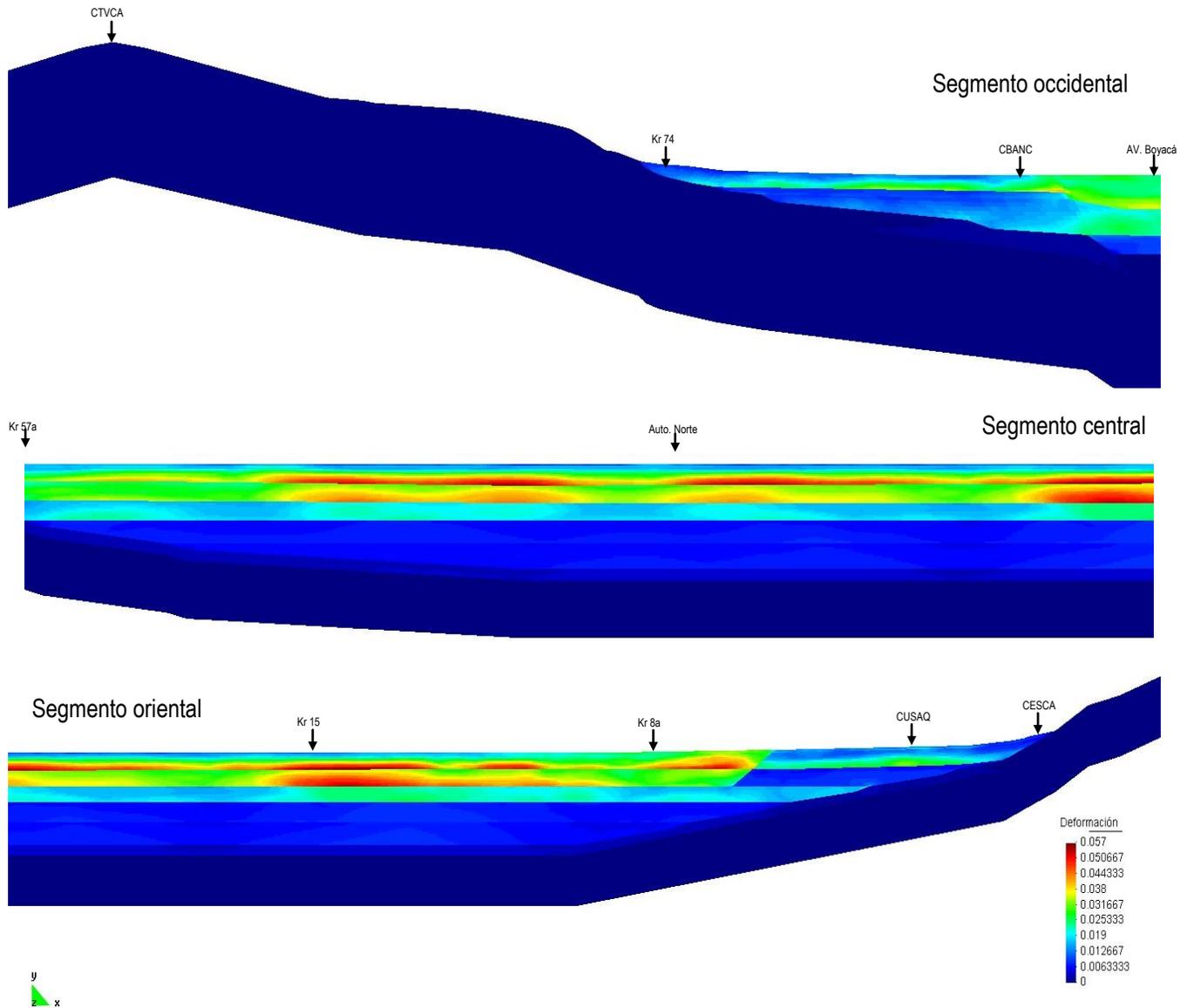
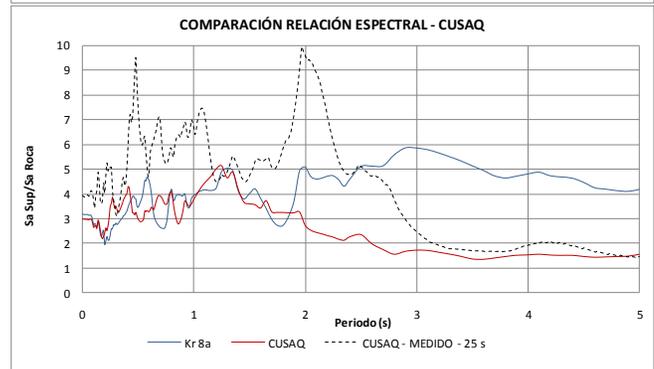
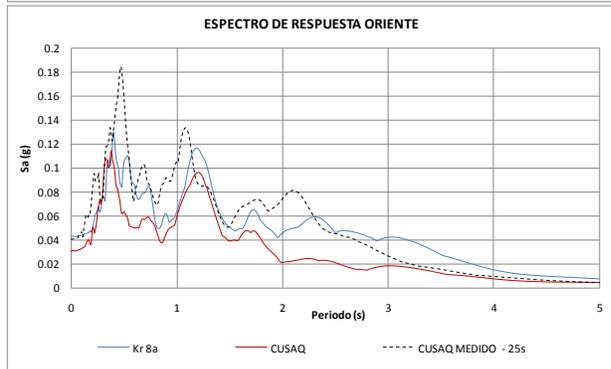
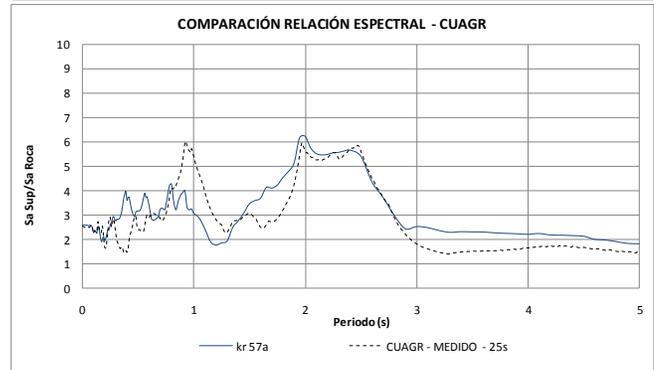
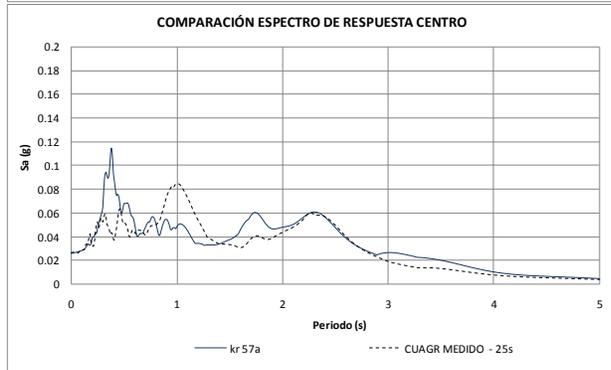
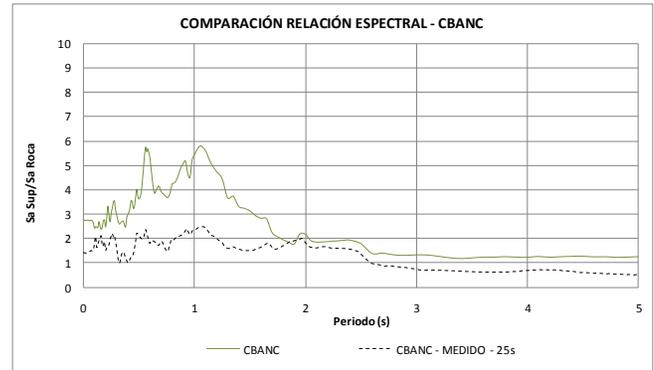
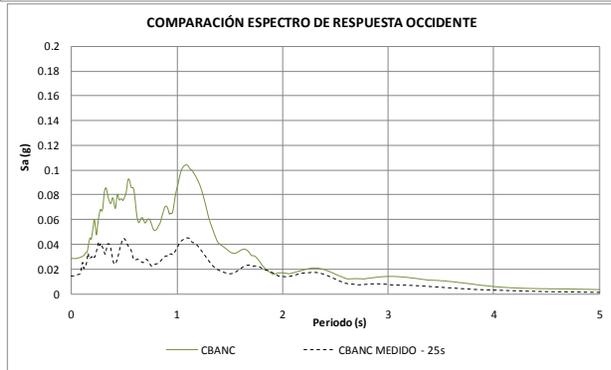
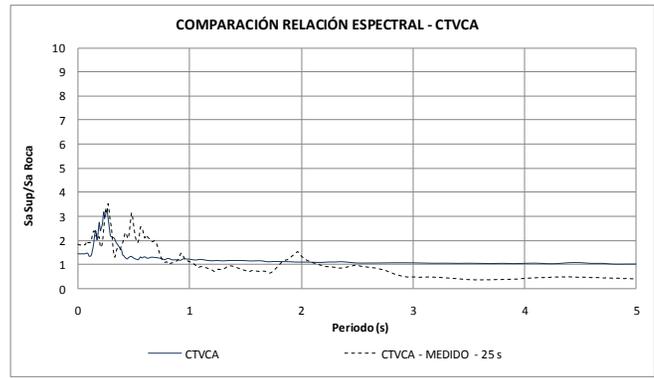
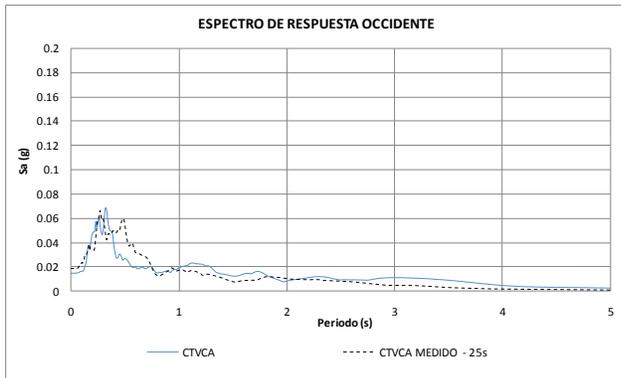


Figura 6.10. Deformaciones máximas – modelo norte

6.2.4 Comparación con los registros cercanos

Para realizar la validación de las modelaciones efectuadas se procedió comparando algunos de los puntos de control con los registros obtenidos por la RAB para la excitación sísmica en consideración (sismo Quetame), obteniendo los resultados mostrados en la Figura 6.11, nótese que la estación “CTVCA” TV Cable representa muy bien los resultados en términos de forma espectral, por su parte la estación “CBANC” Club Banco de la República muestra una buena correspondencia con la forma espectral aunque presenta amplificaciones un poco superiores, sin embargo las amplificaciones en relación espectral presentan una gran correspondencia. Pasando al centro del modelo en la zona lacustre se compara el punto de la “Kr 57” con la estación “CUAGR” correspondiente a Uniagraria encontrando condiciones semejantes en forma espectral, periodos fundamentales y amplificaciones. En la zona oriental se compararon las estaciones “CUSAQ” Colonia Escolar de Usaquén y “CESCA” Escuela de Caballería que representan muy bien tanto en términos de periodos dominantes, como en amplificaciones.



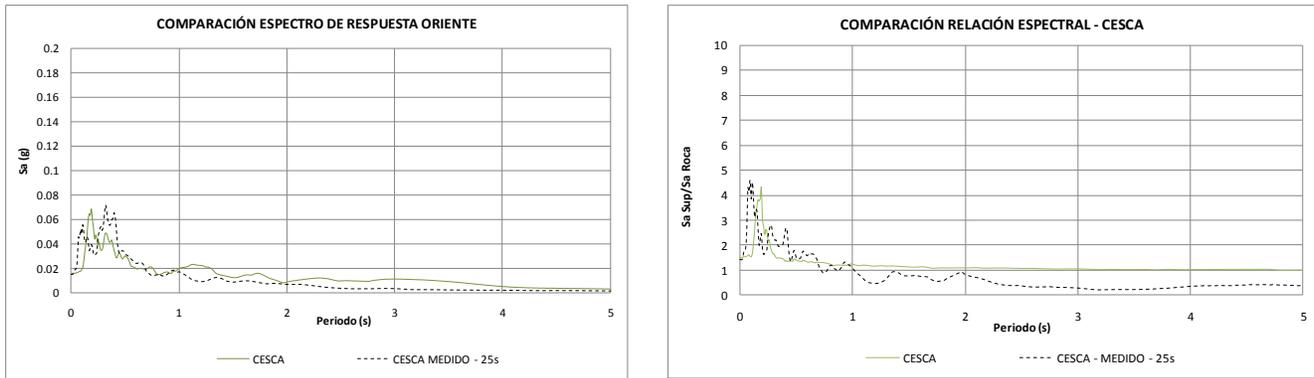


Figura 6.11. Comparación respuesta medidas y modeladas – modelo norte

6.3 SECCIÓN TÍPICA AL SUR

6.3.1 Modelo numérico

El modelo realizado en el sur de la ciudad se localiza a la altura de la Ak 11 sur al oriente de la ciudad y culmina después del río Bogotá a la altura de la calle 26 sur como se aprecia en la Figura 6.12, posee una longitud en planta de 16.4 km, el espesor máximo de depósitos es del orden de 300 m, se constituye de 21 materiales térreos y dos materiales rocosos, la malla estructurada está conformada por un total de 98.711 nodos y 96.987 cuadriláteros, se seleccionaron 10 nodos de respuesta, la señal sísmica empleada en la calibración corresponde al registro en el sensor downhole de la estación Ingeominas (CBOG1) para el sismo de Quetame, la duración del registro es de 15 s y el paso del tiempo de 0.2 s En la Figura 6.13 se presenta el modelo de superficies, la malla estructurada y la asignación de materiales.

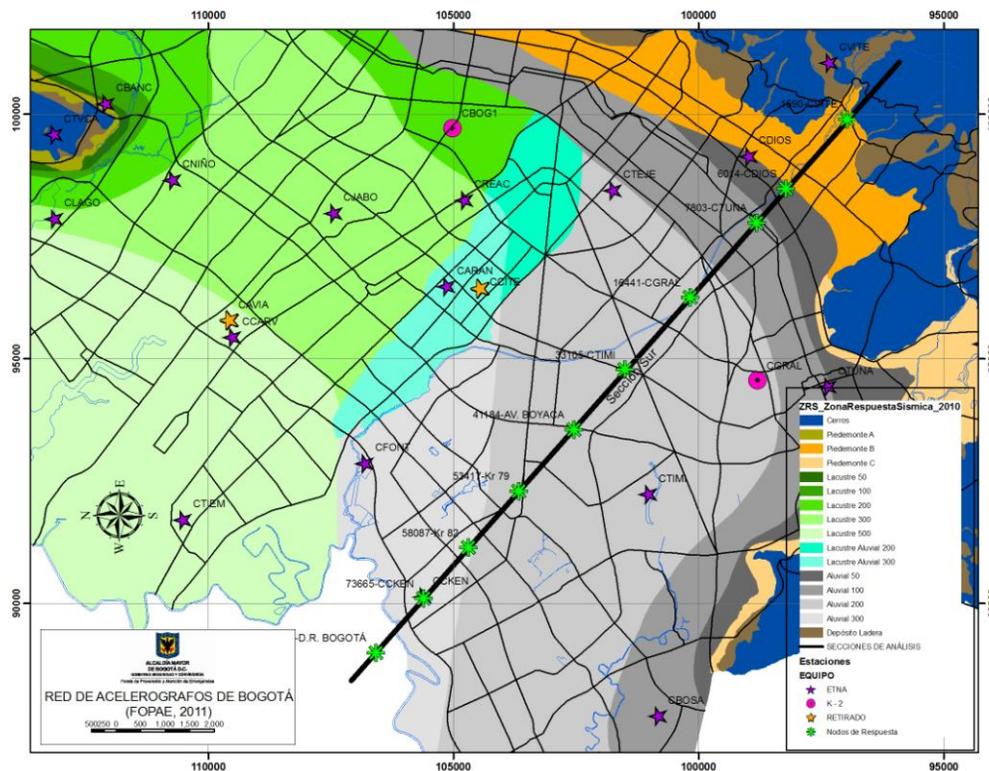


Figura 6.12. Localización del modelo bidimensional al sur

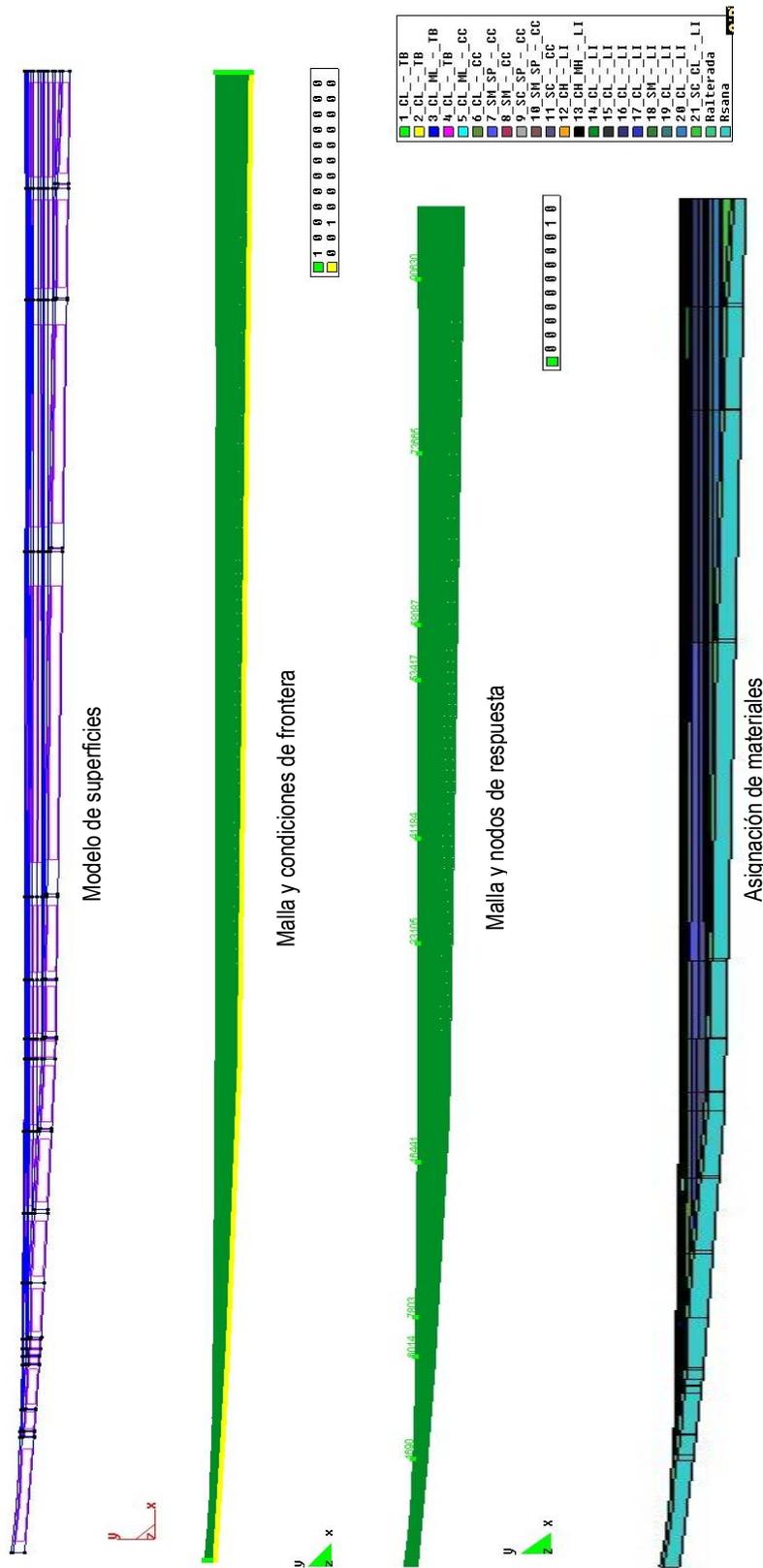


Figura 6.13. Modelo bidimensional sur

6.3.2 Materiales y propiedades dinámicas

Como se ilustra en la Figura 6.13 el modelo se compone de 23 materiales, que se distribuyen en cuatro segmentos, el primero ubicado en el oriente de la ciudad colindando con los cerros orientales y de aproximadamente 1700 metros de longitud, se compone de cuatro materiales de texturas finas, con presencia de intercalaciones de arenas y gravas, correspondientes a depósitos de piedemonte y de terraza baja, de los cuales se resumen sus propiedades de estado básicas en la Tabla 6.5 y sus curvas dinámicas en la Figura 6.14.

El segundo segmento ubicado en la zona centro oriental del modelo con una longitud de 2500 metros, corresponde a depósitos del complejo de conos y se caracterizó por medio de siete materiales, cuatro de los cuales corresponden a materiales que continúan del depósito de terraza baja por lo cual en este sector solo se adicionan tres materiales nuevos al modelo, los materiales caracterizados corresponden a intercalaciones de arcillas y arenas de baja plasticidad, el resumen de propiedades y curvas dinámicas es presentado en la Tabla 6.6 y Figura 6.15.

El tercer segmento ubicado en la zona centro occidental del modelo con una longitud de 5600 metros, corresponde a depósitos del complejo de conos y se caracterizó por medio de siete materiales, tres de los cuales corresponden a materiales que continúan del depósito de complejo de conos oriental por lo cual en este sector solo se adicionan cuatro materiales nuevos, los materiales caracterizados corresponden en su mayoría a arenas algo arcillosas, el resumen de propiedades y curvas dinámicas es presentado en la Tabla 6.7 y Figura 6.16.

Finalmente se encuentra el segmento ubicado en la zona occidental del modelo con una longitud de 5300 metros y que representa el depósito de la llanura de inundación del río Bogotá y se caracterizó por medio de catorce materiales, cuatro de los cuales corresponden a materiales que continúan del depósito de complejo de conos occidental por lo cual en este sector se adicionan diez materiales nuevos, que corresponden a intercalaciones de arenas y arcillas, el resumen de propiedades y curvas dinámicas es presentado en la Tabla 6.8 y Figura 6.17. El basamento rocoso en el modelo se encuentra representado mediante dos materiales, el primero con un espesor de 20 metros, que consiste en el conjunto de rocas alteradas y posteriormente cien metros de roca sana, cuyas propiedades y curvas se resumen en la Tabla 6.9 y Figura 6.17.

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m3)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arcilla arenosa intercalado con arenas y gravas	1 CL - TB - E	0.0	5.0	2.5	29	18	19.03	2.68	19.05	14.75	0.78	350	143	0.400	39534
Arcilla marrón	2 CL - TB - E	5.0	15.0	10.0	26	18	17.17	2.68	19.72	13.63	0.93	410	165	0.404	47491
Arcillas y limos con intercalaciones de arenas y gravas	3 CL ML - TB - E	15.0	35.0	25.0	20	15	18.74	2.68	19.59	15.61	0.68	540	254	0.358	122904
Arcilla arenosa café de consistencia dura	4 CL - TB - E	35.0	60.0	47.5	20	21	17.85	2.68	19.13	14.88	0.77	540	265	0.341	127874

Tabla 6.5. Resumen de materiales segmento oriental - modelo sur

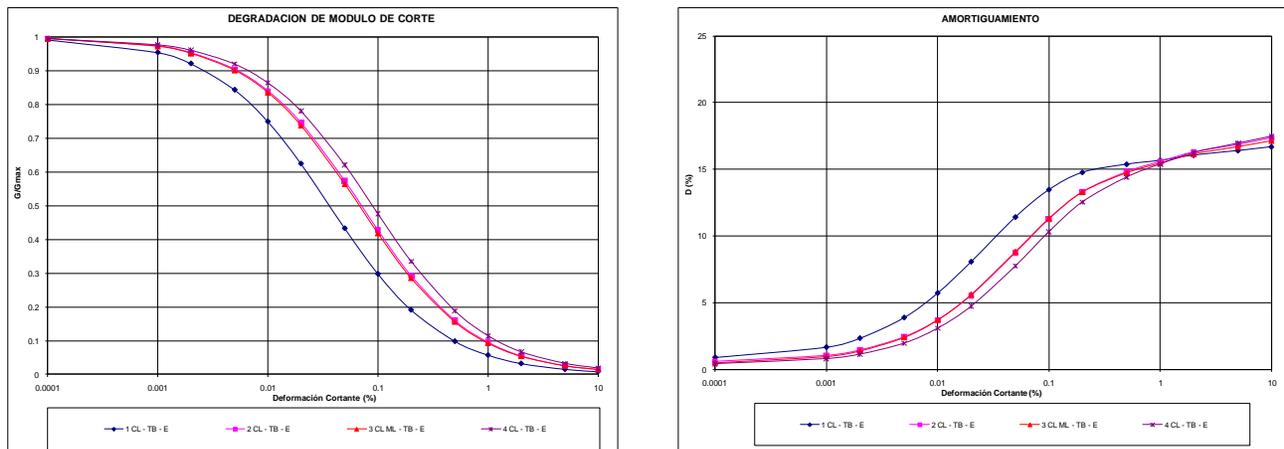


Figura 6.14. Curvas dinámicas terraza baja segmento oriental – modelo sur

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ²)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arcilla arenosa con presencia de turba	5 CL ML - CC - E	16.0	35.0	25.5	37	39	17.33	2.68	17.73	12.65	1.08	470	200	0.390	70651
intercalaciones de arena y arcilla	6 CL - CC - E	45.0	75.0	60.0	23	15	16.09	2.68	18.00	11.56	1.01	430	185	0.387	49510
Arena fina	7 SM SP - CC - E	75.0	100.0	87.5	18	15	20.11	2.65	20.28	17.01	0.55	620	320	0.319	209889

Tabla 6.6. Resumen de materiales segmento oriental complejo de conos - modelo sur

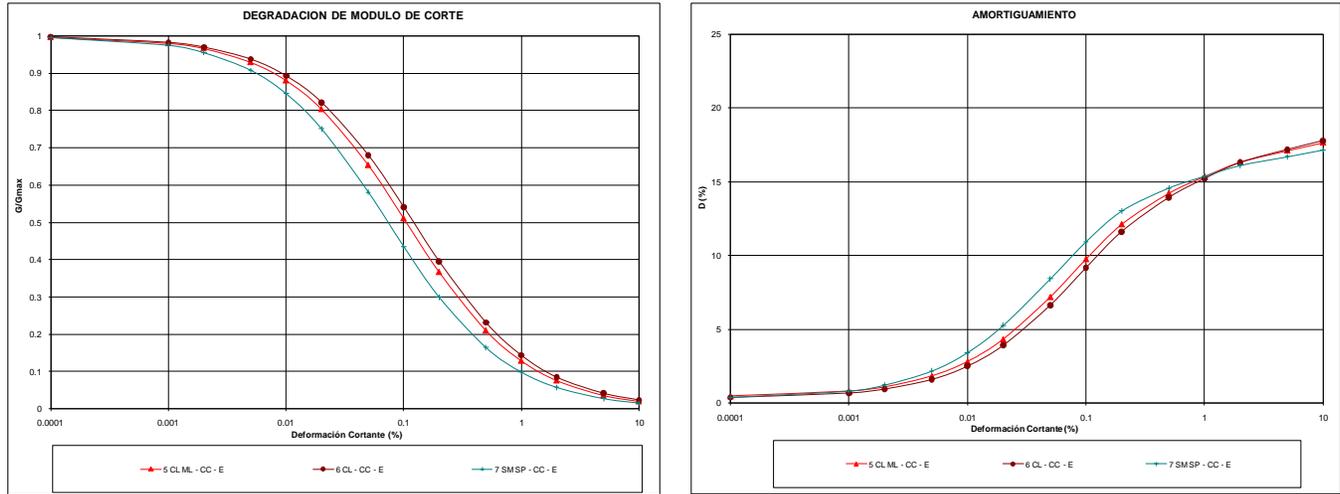


Figura 6.15. Curvas dinámicas segmento oriental complejo de conos – modelo sur

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ²)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arena de grano fino marrón	8 SM - CC - W	0.0	5.0	2.5	20	4	15.70	2.65	20.09	13.08	0.57	410	195	0.353	60978
Arena marrón con intercalaciones de arcilla	9 SC SP - CC - W	5.0	30.0	17.5	27	17	16.68	2.65	19.09	13.13	0.74	450	235	0.312	94228
Arena	10 SM SP - CC - W	40.0	45.0	42.5	12	10	19.13	2.65	20.32	17.08	0.54	630	270	0.388	142093
Arena	11 SC - CC - W	110.0	150.0	130.0	21	18	18.64	2.65	19.29	15.40	0.71	670	317	0.356	191152

Tabla 6.7. Resumen de materiales segmento occidental complejo de conos - modelo sur

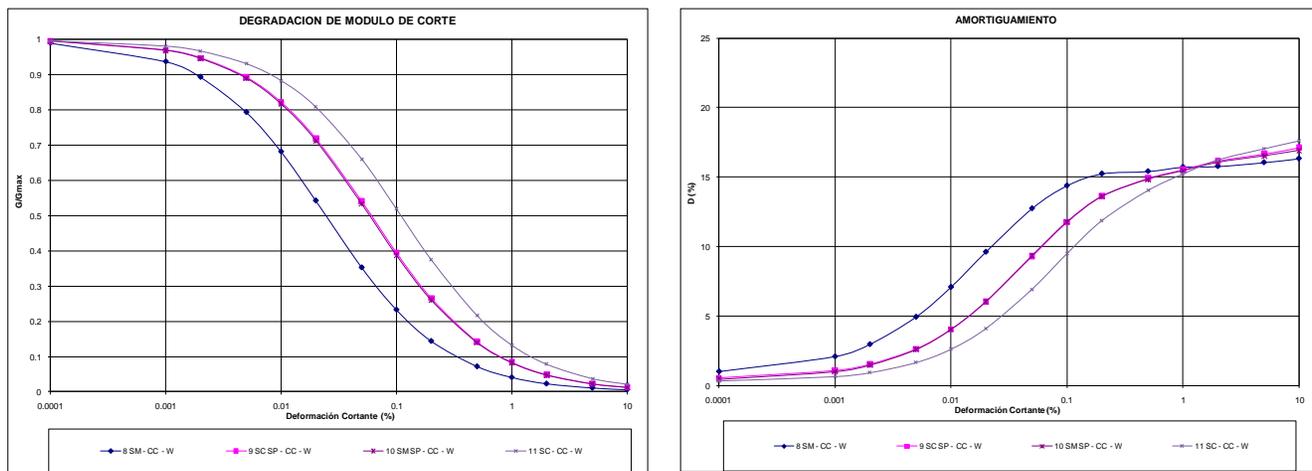


Figura 6.16. Curvas dinámicas segmento occidental complejo de conos – modelo sur

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ²)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
Arcilla	12 CH - LI	0.0	5.0	2.5	35	37	17.30	2.68	17.83	12.81	1.05	390	145	0.420	37123
Arcilla limo arenosa café	13 CH MH PT - LI	12.0	25.0	18.5	40	50	15.99	2.68	16.96	11.42	1.30	400	162	0.401	43004
Arcilla limosa de consistencia dura	14 CL - LI	30.0	45.0	37.5	30	19	16.78	2.68	17.89	12.90	1.04	490	190	0.411	61844
Arcilla limosa algo arenosa	15 CL - LI	50.0	65.0	57.5	24	23	18.84	2.68	19.32	15.19	0.73	520	212	0.401	86145
Arcilla limosa algo arenosa	16 CL - LI	65.0	110.0	87.5	24	23	18.84	3.68	22.98	15.19	0.73	600	228	0.416	99492
Arcilla arenosa	17 CL - LI	132.0	147.0	139.5	34	30	17.17	2.68	17.83	12.81	1.05	520	176	0.435	54213
Arena arcillosa	18 SM - LI	147.0	160.0	153.5	25	13	17.27	2.68	20.34	13.81	0.90	640	257	0.404	116583
Arcilla limosa con lentes de arena	19 CL - LI	160.0	200.0	180.0	29	16	19.63	2.68	23.29	15.22	0.73	660	236	0.426	111949
Arcilla limosa con lentes de arena	20 CL - LI	200.0	240.0	220.0	29	16	19.63	2.68	25.26	15.22	0.73	680	259	0.415	134000
Arena de grano fino ligeramente arcillosa	21 SC CL - LI	240.0	290.0	265.0	30	51	17.56	2.68	25.72	13.51	0.95	730	324	0.377	188067

Tabla 6.8. Resumen de materiales segmento occidental llanura de inundación - modelo sur

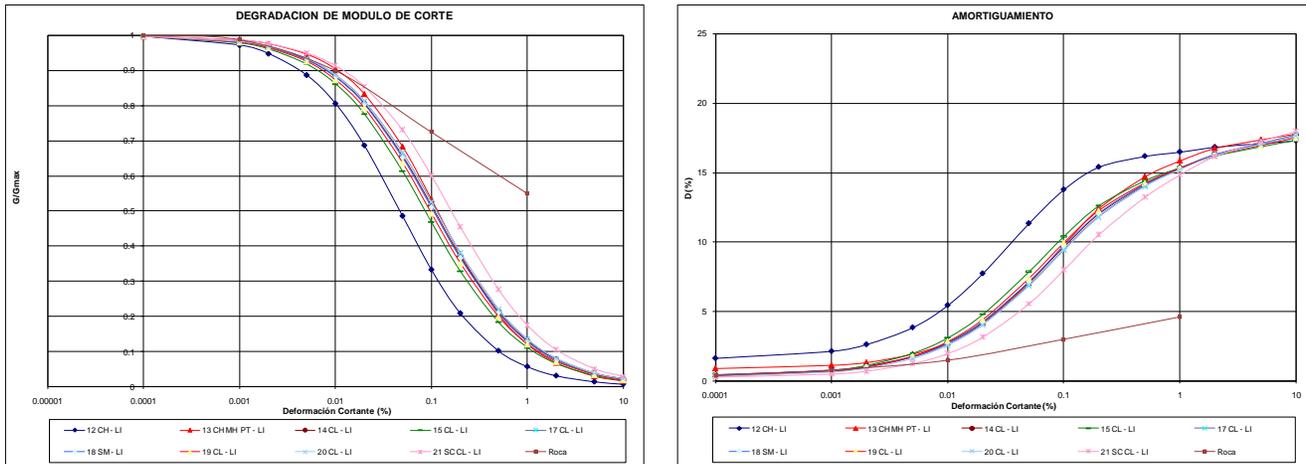


Figura 6.17. Curvas dinámicas segmento occidental llanura inundación – modelo sur

DESCRIPCION	ID	Prof (m)		Zprom (m)	Wn (%)	IP	γ_t (KN/m ³)	Gs	γ_{tsat} (KN/m ²)	γ_d (KN/m ³)	e	Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	μ	Gmax (KPa)
		de	a												
ROCA ALTERADA	22 Ralterada						22.0					1750	450	0.465	454314
BASE ROCA	23 Rsana						24.0					2500	1000	0.405	2325000

Tabla 6.9. Resumen de materiales rocosos - modelo sur

6.3.3 Resultados obtenidos

Las modelaciones efectuadas se analizaron en dos sentidos, el primero que corresponde a la interpretación de la historia de aceleraciones en los nodos de respuesta seleccionados en superficie que se ilustran en la Figura 6.18, los espectros de respuesta y relaciones espectrales se presentan en la Figura 6.19, posteriormente se comparan con las respuestas medidas en superficie en las estaciones de la RAB alineadas con el modelo construido ver Figura 6.22 y la segunda intervención tuvo lugar en el análisis de las aceleraciones y deformaciones máximas como parte del postproceso de los resultados de propagación de ondas en el medio ver Figura 6.20 y Figura 6.21.

La Figura 6.18 muestra la historia de aceleraciones en superficie de los nodos de respuesta seleccionados, se percibe inicialmente un registro saturado en las zonas de cerros y depósitos de ladera, el amortiguamiento de la señal se da rápidamente en tan solo dos segundos una vez finalizado el registro de entrada, por su parte las zonas de aluvial 50 y 100 muestran los mayores picos de aceleración y el amortiguamiento de la señal se da en aproximadamente 7 segundos, de otro lado la zona central y occidental del modelo que corresponde a las zonas aluvial 200 y 300 presentan un amortiguamiento más moderado en la señal de entrada, el cual se da entre 20 y 22 segundos.

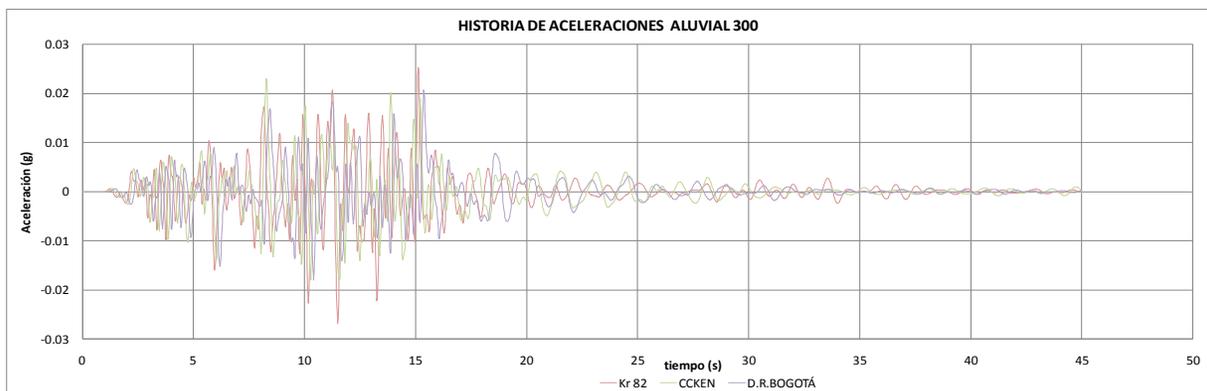
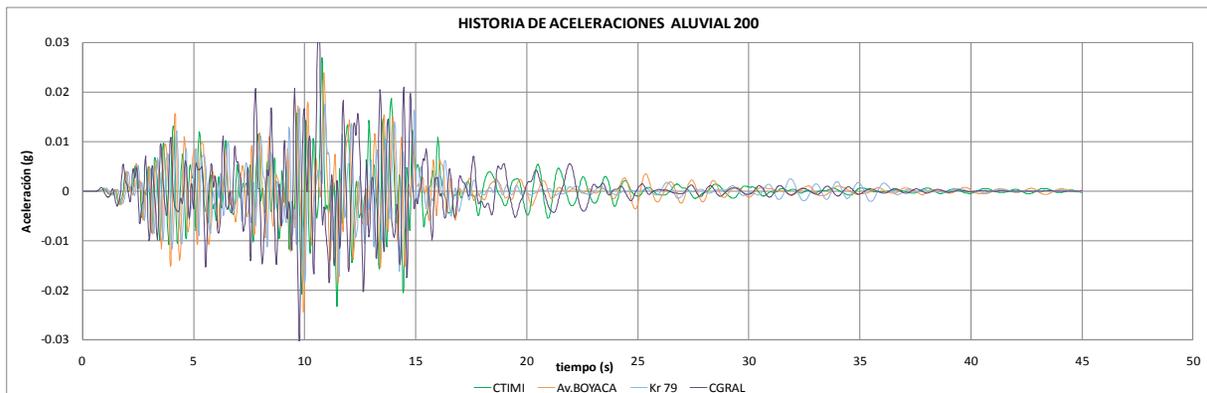
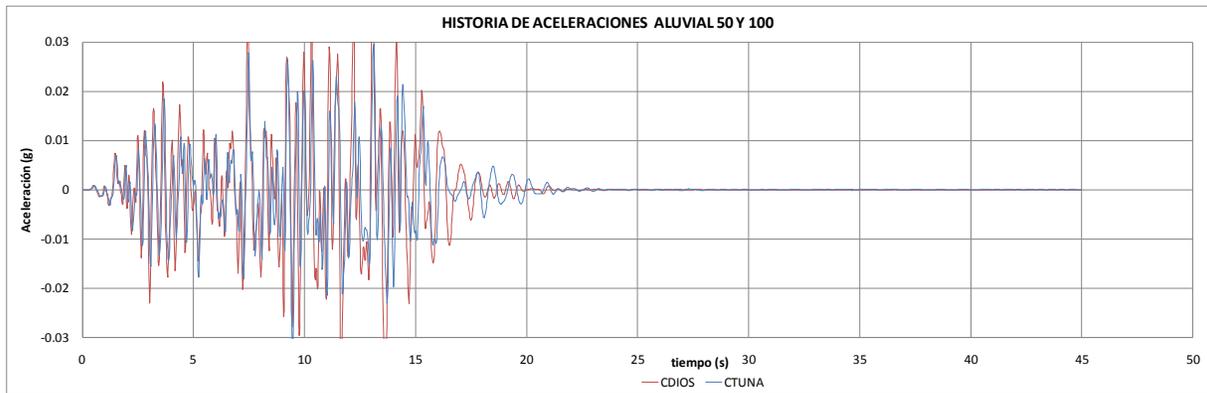
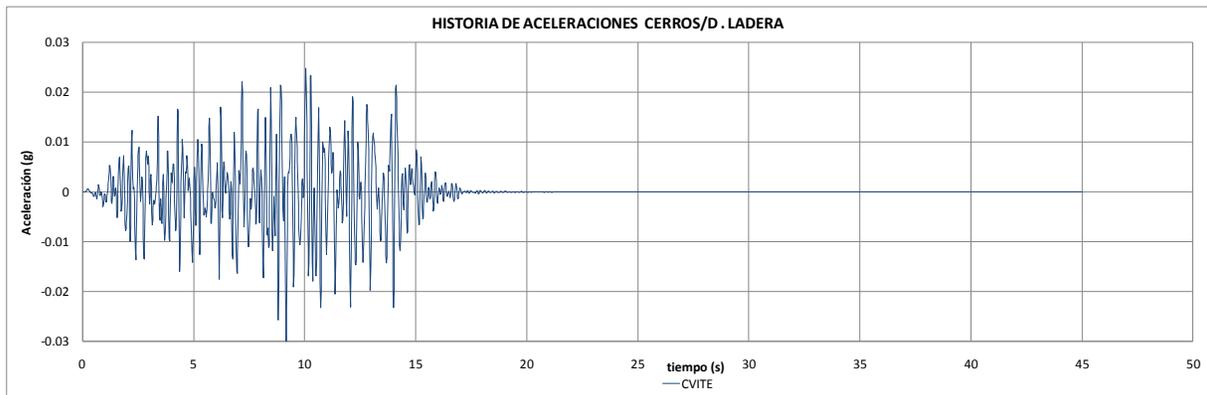


Figura 6.18. Historia de aceleraciones – modelo sur

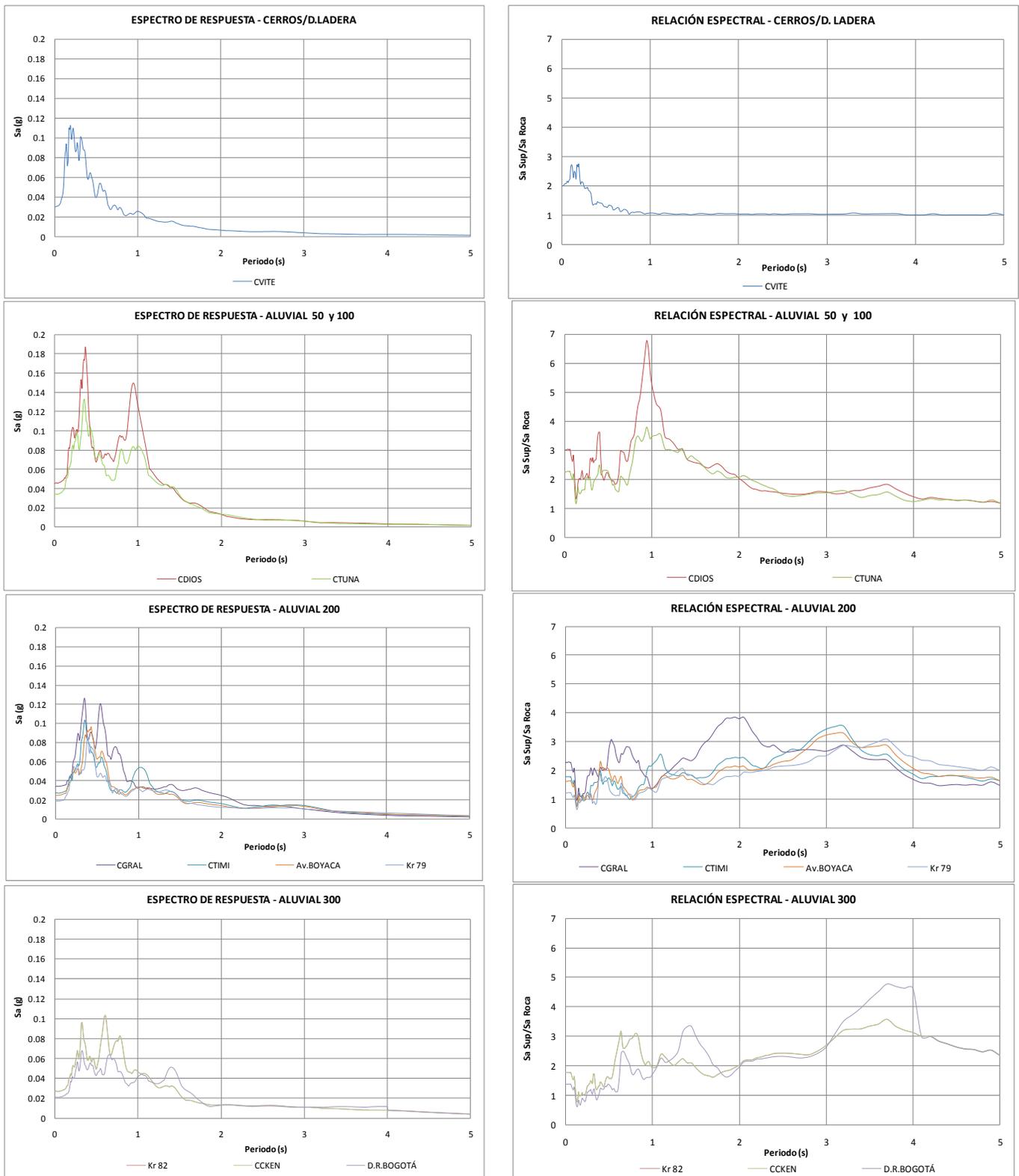


Figura 6.19. Espectros y relaciones espectrales – modelo sur

La respuesta obtenida al oriente del modelo en la zona de cerros y piedemonte muestra aceleraciones espectrales alrededor de los 0,11g y relaciones espectrales alrededor de 3 veces lo registrado en roca para un periodo de 0.2

segundos, el punto de control seleccionado para representar la respuesta en las unidades en roca y su correspondiente efecto de amplificación topográfica fue el identificado como “CVITE”. El punto identificado como “CDIOS” se localiza en la zona de aluvial 50, posee una aceleración espectral máxima de 0.018g la mayor registrada en este modelo, también se observan dos picos de amplificación, el principal a 1 segundo y el secundario a 0.4 segundos con relaciones espectrales de 7 y 3.5 respectivamente, seguido se encuentra la estación “CTUNA” localizada en la zona del lacustre 100, las respuestas máximas en este punto se encuentra para periodos de 1 y 0.4 segundos y relaciones espectrales de entre 2.5 y 4 veces el registro en roca.

El sector central del modelo que corresponde a la zona aluvial 200, evidencia una marcada respuesta en periodos menores a un segundo como consecuencia de los materiales de texturas arenosas que componen el depósito en esta zona, las relaciones espectrales no superan las 4 veces del registro en roca y los periodos de amplificación se identifican en 3, 2 y 0.6 segundos.

Por último se encuentra el sector occidental del modelo que corresponde a la zona aluvial 300, al igual que en el aluvial 200 la respuesta se concentra para aceleraciones menores a un segundo y los picos de amplificación se observan a 3.5, 1.5 y 0.8 segundos, las relaciones espectrales varían de 3 a 5 veces el registro en roca.

Del análisis del modelo se observa que las zonas de piedemonte presentan las aceleraciones máximas las cuales se observan en tonos rojizos en la Figura 6.20 que corresponden a aceleraciones cercanas a los 0.08g, comportamiento asociado al efecto combinado de las ondas de superficie y ondas de cuerpo, de otro lado observando el comportamiento en superficie de la zona aluvial se percibe la respuesta en tonos azules lo cual corresponde a aceleraciones entre 0.015g y 0.030g aproximadamente en un comportamiento muy uniforme, no se observan amplificaciones considerables salvo en el piedemonte y en la frontera occidental del modelo que se asocia a un error de contorno.

Analizando el comportamiento del depósito en términos de deformaciones se encuentra que las mayores se presentan en el segmento centro oriental correspondiente a la zona de depositación del complejo de conos y asociada a las zonas de respuesta Aluvial 50 y aluvial 100, se observan deformaciones un poco mayores en la zona del borde occidental del modelo pero la experiencia muestra que las regiones cercanas al contorno del modelo no son representativas, por otro lado se evidencia que las deformaciones experimentadas por los depósitos aluviales representados por este modelo son del orden de la mitad de las experimentadas en la zona lacustre en el modelo norte, relacionando las deformaciones máximas a los materiales se encuentra que la zona en donde se presentan estos comportamiento corresponden a materiales de texturas arcillosas en los 50 metros más superficiales, como era de esperarse los efectos del esfuerzo de confinamiento también controlan este comportamiento.

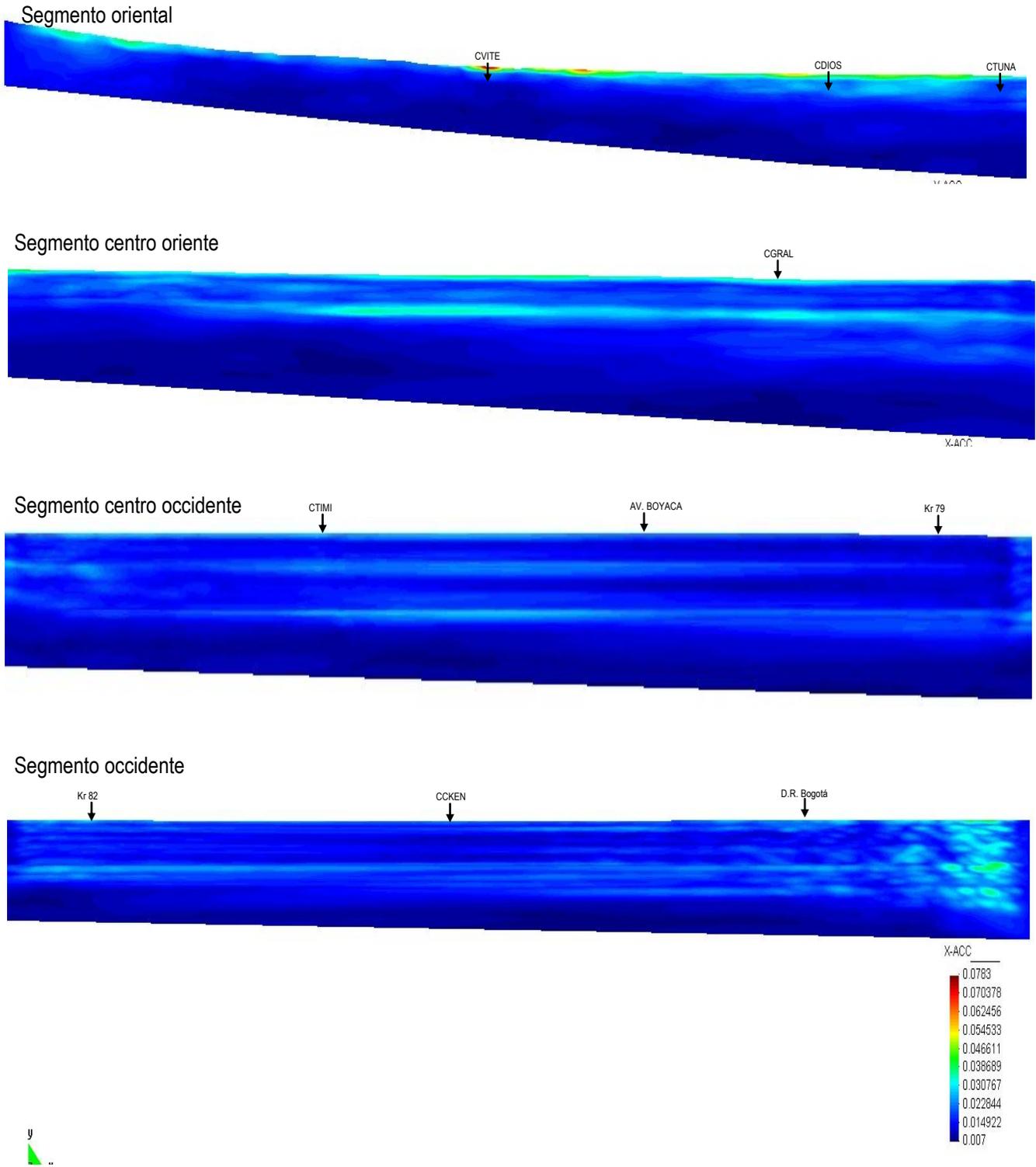
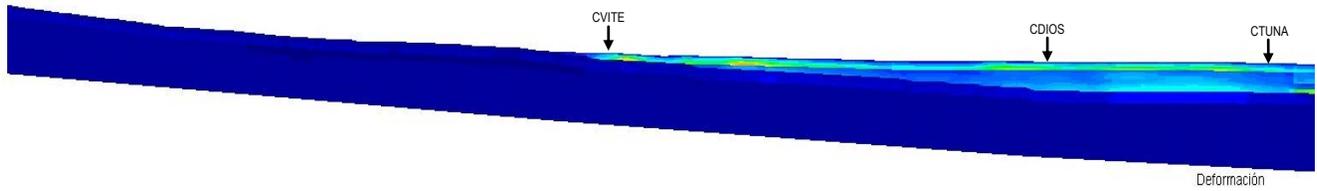
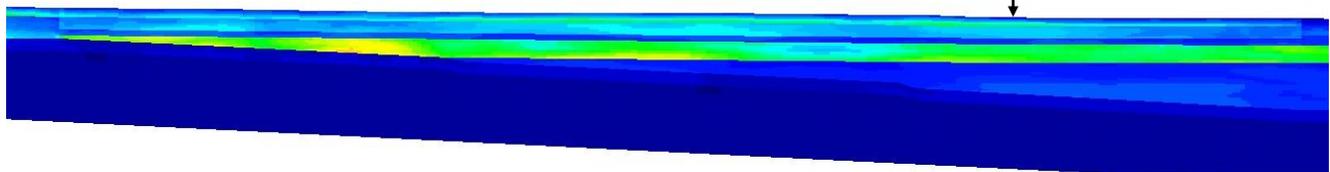


Figura 6.20. Aceleraciones máximas – modelo sur

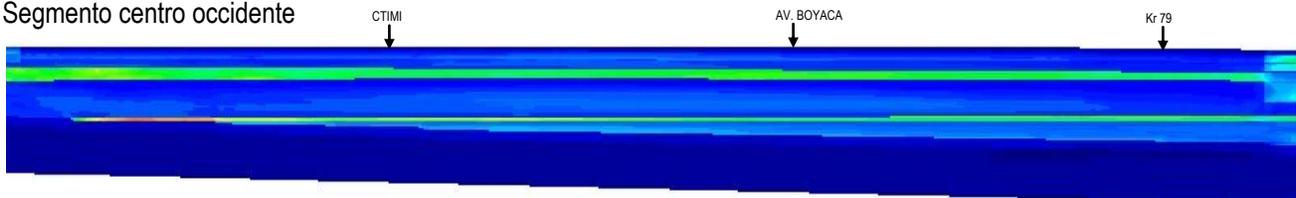
Segmento oriental



Segmento centro oriente



Segmento centro occidente



Segmento occidente

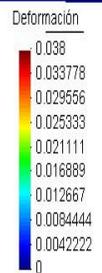
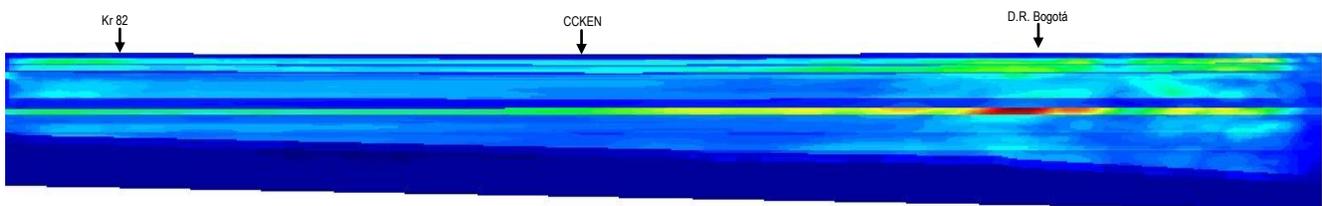
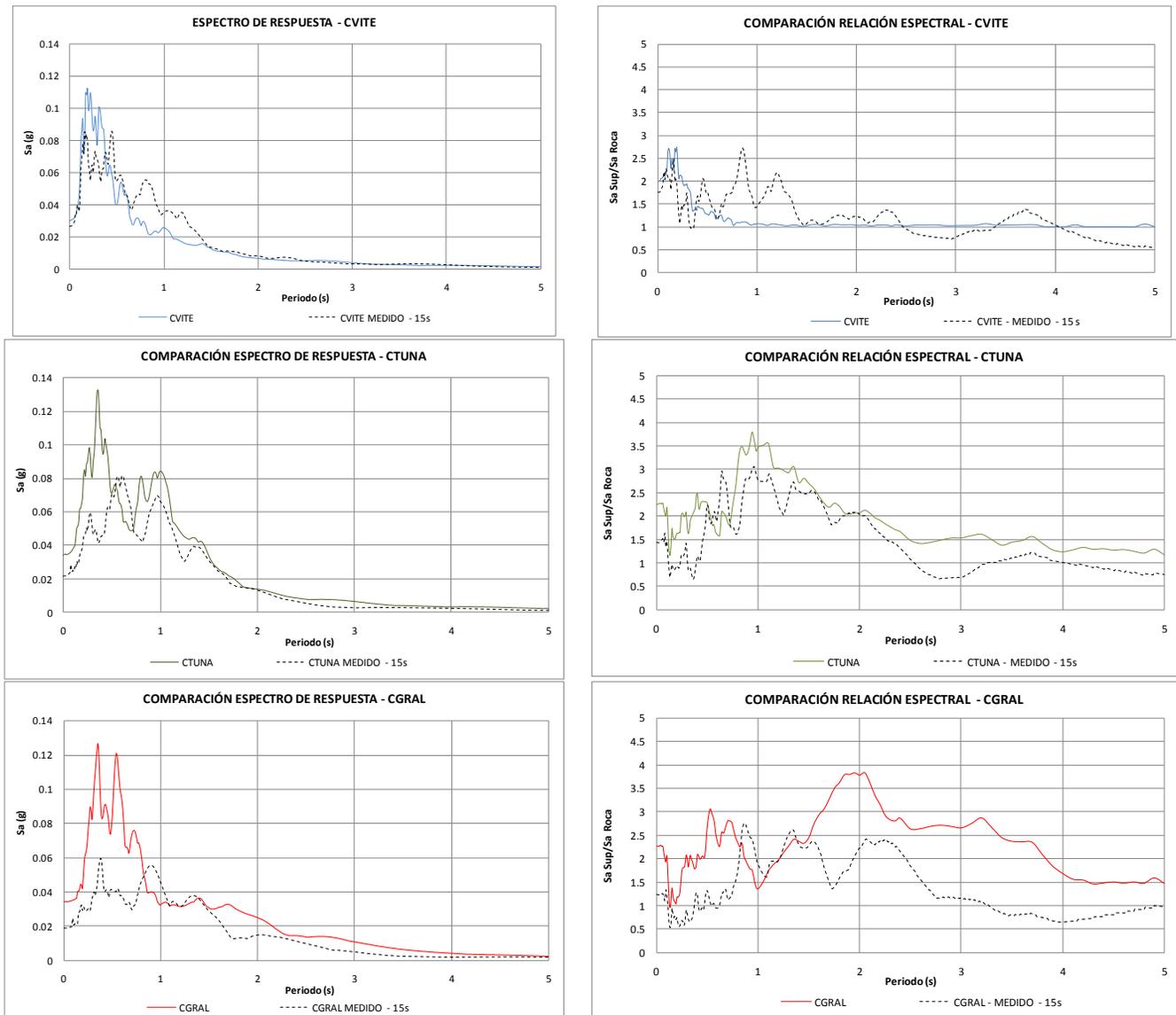


Figura 6.21. Deformaciones máximas – modelo sur

6.3.4 Comparación con los registros cercanos

Para realizar la validación de las modelaciones efectuadas se procedió comparando algunos de los puntos de control con los registros obtenidos por la RAB para la excitación sísmica en consideración (sismo Quetame), obteniendo los resultados mostrados en la Figura 6.22, nótese que la estación “CVITE” Planta Vitelma representa muy bien los resultados en términos de forma espectral y magnitud de las aceleraciones, sin embargo las relaciones espectrales no coinciden muy bien en parte por condiciones topográficas locales imperceptibles al nivel de escala de trabajo, por su parte la estación “CTUNA” Parque el Tunal muestra una buena correspondencia con la forma espectral y magnitud de las aceleraciones espectrales. La estación “CGRAL” General Santander no ajusta muy bien en periodos bajos, la estación “CTIMI” localizada en el Parque Timiza es representada muy bien tanto en términos de aceleraciones como en relaciones espectrales finalmente la estación “CCKEN” Col Kennedy se representa bien en términos de relaciones espectrales, con una dispersión en las aceleraciones en periodos bajos.



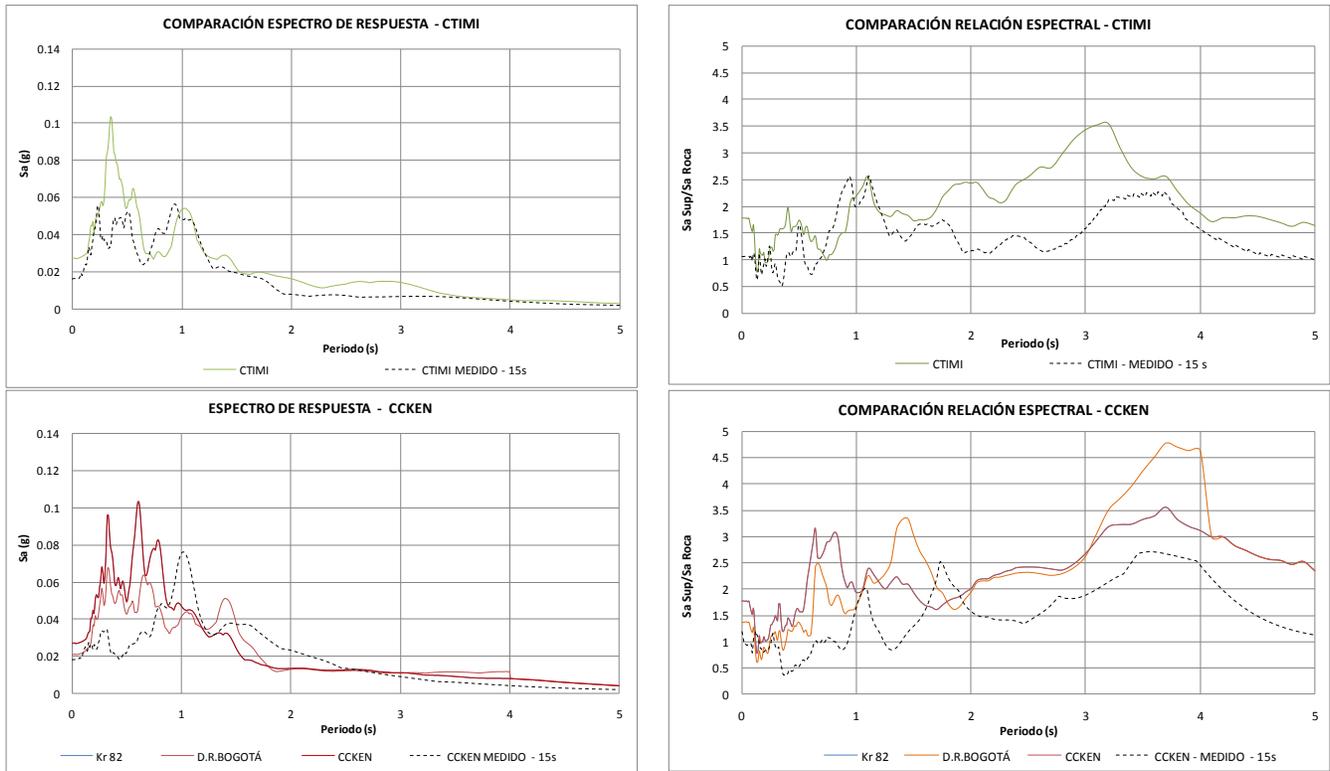


Figura 6.22. Comparación respuesta medidas y modeladas – modelo sur

6.4 SÍNTESIS

Los modelos bidimensionales realizados como las señales sísmicas seleccionadas lograron representar adecuadamente la respuesta en superficie en los puntos de control con registros medidos. Las aceleraciones máximas registradas en ambos modelos están asociadas a efectos topográficos en la profundización del basamento rocoso en las zonas de piedemonte, Por su parte las deformaciones máximas se presentan en gran medida en materiales blandos arcillosos en los 50 metros superiores de los depósitos.

Del análisis de las deformaciones se pudo comprobar que el depósito de materiales modelado con la señal del sismo de Quetame, trabajó en el rango elástico del comportamiento esfuerzo – deformación, aunque en algunas zonas se presentan valores límites de este comportamiento, por lo tanto se espera que para excitaciones sísmicas de energías un poco mayores, el depósito experimente deformaciones permanentes en el rango plástico e incluso procesos de licuación en los materiales susceptibles de presentar este tipo de comportamientos, factor que repercutirá en daños evidentes en la infraestructura de la ciudad, los cuales no se presentaron en el sismo de Quetame.

La capa de materiales sobre consolidados (capa dura superior de 5m) restringe las deformaciones excesivas en superficie, sin embargo el comportamiento frágil de este material debido al bajo nivel de confinamiento sugiere que este comportamiento no será permanente en el momento de un sismo fuerte.

Los depósitos de materiales de más de 100 m de espesor aumentan la duración en superficie del sismo, sin embargo la zona lacustre presenta más amplificaciones en la región del movimiento libre amortiguado que los depósitos de origen aluvial.

CAPITULO 7

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La red de acelerógrafos de Bogotá RAB cuenta en la actualidad con 30 estaciones activas a la fecha, que desde el inicio de operaciones hasta diciembre de 2011 ha registrado un total de 37 eventos sísmicos, que han permitido caracterizar la respuesta sísmica del depósito de la ciudad en el rango de bajas deformaciones. Se recomienda sincronizar la hora de cada estación respecto a la hora mundial, con el fin de hacer análisis espaciales de propagación de las ondas en los terrenos de la ciudad.

El análisis de la información geotécnica recopilada permitió definir y caracterizar aproximadamente el perfil geotécnico de las 20 estaciones localizadas en la zona plana de la ciudad, sin embargo se recomienda realizar y/o recopilar exploración geotécnica complementaria directa o indirecta con el fin de reducir la incertidumbre en la estimación tanto del perfil como de las propiedades mecánicas y dinámicas, específicamente en las estaciones de Cerros, piedemonte, aluvial y lacustre.

Se recomienda actualizar la base de datos geotécnica georeferenciada y estandarizada con la información recopilada de los proyectos efectuados por FOPAE e integrar todos los estudios remitidos a la entidad por las curadurías de tal manera que el proceso de recopilación de información no requieran tanto tiempo y se cuente con un mayor volumen de información para los análisis requeridos por la entidad para futuros desarrollos o actualizaciones de este producto.

Las señales seleccionadas para la modelación de la respuesta sísmica 1D y 2D fueron las registradas en los sensores Down Hole de las estaciones de Ingeominas (CBOG1) y Uniagraria (CUAGR), también se emplearon los registros de las estaciones ubicadas en afloramientos rocosos como Escuela de Caballería (CESCA), TVCABLE (CTVCA) y Colegio Sierra Morena (CSMOR). Todas las señales tuvieron el tratamiento por ventanas de tiempo, con lo cual se obtuvieron señales recortadas de 15 y 25 segundos correspondientes a la fase de movimiento forzado.

El efecto del recorte de las señales fue visible en la calibración de los modelos unidimensionales, ya que permitió una mayor aproximación en términos de amplificación y periodos de vibración a las mediciones registradas por la RAB y principalmente porque permite trabajar la excitación sísmica en el rango de dominio de las ondas de cuerpo condición indispensable para los programas de análisis empleados.

El proceso de modelación unidimensional y bidimensional fue exitoso en la medida en que se logró representar adecuadamente las respuestas medidas en superficie en términos de periodos y amplificaciones, sin embargo se recomienda mejorar la caracterización en las estaciones descritas en el capítulo 3 del presente informe de tal forma que se eliminen las incertidumbres existentes en el modelo de respuesta. La clasificación del perfil de suelo para las zonas de respuesta sísmica es consistente con la Zonificación de Respuesta Sísmica de Bogotá en base al criterio de la velocidad de onda de cortante promedio de los 50 metros más superficiales del depósito de suelos.

En las modelaciones de respuesta unidimensional y bidimensional se empleó información geotécnica secundaria en la mayoría de los casos y modelos de degradación y amortiguamiento que tienen en cuenta las propiedades físicas de los suelos y el confinamiento. No se emplearon resultados directos de laboratorio en los modelos de respuesta. A pesar de las limitaciones en la caracterización geotécnica y dinámica de cada sitio se obtuvieron resultados satisfactorios para el sismo de Quetame.

Las mayores respuestas registradas en los modelos corresponden a los ocasionados por efectos topográficos en el rango de periodo corto y amplificaciones considerables en el rango de periodos largos a causa del depósito profundo de suelos

blandos. De otro lado se identificó un gran potencial de deformación en los 50 metros superficiales del depósito de suelos blandos arcillosos de origen lacustre.

Se pudo constatar que para la excitación sísmica en consideración (sismo de Quetame), el depósito de suelos presentó una respuesta en el rango elástico de deformaciones, por lo tanto se recomienda realizar modelaciones con sismos de mayor energía de tal forma que se contemple la degradación de la rigidez y el aumento del amortiguamiento y su efecto de las amplificaciones y deformaciones del depósito.

Se recomienda ampliar la red de acelerógrafos de Bogotá de acuerdo a las zonas de respuesta sísmica así: en la región de piedemonte oriental alrededor de la calle 80 y en las inmediaciones de la calle 13, en el piedemonte sur oriental en un punto cercano a la avenida primero de mayo, en la transición lacustre aluvial, en la zona central de la cuenca lacustre en el norte de la ciudad entre calles 80 a 127, en la zona aluvial 200 en la sección distal de la localidad de Bosa y en las regiones de futura expansión de la ciudad, también es indispensable contar con un registro sin efectos en roca en el área de cerros de Bogotá.

Se recomienda realizar nuevas modelaciones incluyendo para ello el efecto de la infraestructura existente como condiciones de frontera adicionales, esta actividad pretende modificar los modelos bidimensionales de tal manera que se incluyan discontinuidades en el terreno como sótanos, cimentaciones profundas y cargas gravitacionales de las estructuras, condiciones que modifican la respuesta de campo libre supuesta en los modelos empleados para este proyecto.

8 REFERENCIAS

- AIS, (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009. Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá.
- Bardet J, Ichi K, Lin C. (2000). EERA Computer Program for Equivalent Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California.
- CEDERI, (2002). Procesamiento e Interpretación de la Información Sísmica de Bogotá D.C. Uniandes. Bogotá.
- Díaz-Parra F, (2007). Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Tesis Maestría en Geotecnia Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- FOPAE, (2008). Procesamiento e Interpretación de Señales de la Red de Acelerografos de Bogotá – RAB. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. Bogotá.
- FOPAE, (2010). Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismo Resistente de Edificaciones, Versión final para reglamentación. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. Bogotá.
- Hudson M, Idriss I, Beikae M, (1994). User's Manual for QUAD4M. A computer program to evaluate the seismic response of soils structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. University of California. Davis.
- INGEOMINAS (2008). El Sismo de Quetame del 24 de Mayo de 2008. Aspectos sismológicos y evaluación preliminar de daños, Informe Preliminar 2. Ingeominas. Bogotá.
- INGEOMINAS, DAGMA. (2005). Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. Análisis y modelación de la respuesta sísmica local del subsuelo en Santiago de Cali. Ingeominas. Cali.
- INGEOMINAS, UNIANDES, (1997). Microzonificación Sísmica de Bogotá. Publicación especial. Ingeominas. Bogotá.
- Matasovic, N. (1993). Seismic response of cosmic horizontally-layered soil deposit. University of California. Los Angeles.
- Stokoe K, Darendeli M, Gilber R, Menq F, Choi W, (2004). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. University of Texas at Austin.
- Zhang J, Andrus R, Juang H, (2005). Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 131, No. 4, pp 453-464.