**CLASIFICADO**

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias
DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

# PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SEÑALES DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ - RAB

## INFORME DE FINAL

## VOLUMEN 1.

## ORIGINAL

**SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

**COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TÉCNICOS**

**NOVIEMBRE DE 2008**

BOG BOGOTÁ POSITIVA
GOBIERNO DE LA CIUDAD

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

**CLASIFICADO**

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias
DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

# DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS


GUILLERMO ESCOBAR CASTRO
Director

GERMÁN BARRETO ARCINIEGAS
Subdirector de Investigación y Desarrollo

DULFAY PATRICIA ORTIZ
Coordinadora Estudios Técnicos

Interpretación y análisis de registros
FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA

Operación y mantenimiento de la RAB
JUAN CARLOS PADILLA
DORIAN MEZA

Base de datos, catálogos y fichas
GERARDO RODRÍGUEZ

# CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 OBJETIVO 2
1.3 ALCANCE 3
1.4 METODOLOGÍA 3

2 RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ – RAB 5

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED 5
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES 7
2.3 EVENTOS REGISTRADOS 8

3 PROCESAMIENTO Y PUBLICACIÓN DE REGISTROS DE LA RAB 10

3.1 PROCESAMIENTO DE REGISTROS 10
3.2 CATÁLOGO DE EVENTOS Y FICHAS HISTÓRICA DE REGISTROS 11
3.3 PUBLICACIÓN DE LOS REGISTROS EN EL SIRE 13

4 INTERPRETACIÓN DE REGISTROS 15

4.1 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN CADA ESTACIÓN 16
4.1.1 ZONA DE CERROS 19
4.1.2 ZONA DE PIEDEMONTE 22
4.1.3 ZONA LACUSTRE 24
4.1.4 ZONA ALUVIAL 29
4.1.5 REGISTROS EN PROFUNDIDAD Y RELACIONES ESPECTRALES 31
4.2 ANÁLISIS DE SISMOS DESTACADOS 35
4.2.1 EVENTO DE DÍA 8 DE NOVIEMBRE DE 1999 BETULIA SANTANDER 35
4.2.2 EVENTO DE DÍA 24 DE MAYO DE 2008 QUETAME CUNDINAMARCA 36
4.3 SÍNTESIS DE RESULTADOS 47

5 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE RESPUESTA EN LOS SITIOS CON DOWN HOLE 48

5.1 PROPIEDADES DINÁMICAS 48
5.1.1 VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE 48
5.1.2 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO O MÍNIMO 53
5.2 MODELOS DE DEGRADACIÓN DEL MODULO Y AMORTIGUAMIENTO RECOMENDADOS 55
5.2.1 ZHANG ET AL. (2005) 56
5.2.2 DÍAZ-PARRA (2007) 57
5.3 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE RESPUESTA EN LOS SITIOS CON DOWN HOLE 58
5.3.1 UNIVERSIDAD AGRARIA – CUAGR 59
5.3.2 INGEOMINAS – CBOG1 61

5.3.3 ESCUELA GENERAL SANTANDER – CGRAL 63
5.3.4 SÍNTESIS DE RESULTADOS 65
5.4 ESPECTROS DE RESPUESTA DE LAS SEÑALES DE DISEÑO EN LOS SITIOS CALIBRADOS **65**

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **70**

6.1 CONCLUSIONES **70**
6.2 RECOMENDACIONES **71**
6.2.1 GENERALES 71
6.2.2 SEÑALES DE DISEÑO Y ESPECTROS DE DISEÑO 71
6.2.3 ZONA DE CERROS 71
6.2.4 ZONA DE PIEDEMONTE 72
6.2.5 ZONA LACUSTRE 72
6.2.6 ZONAS ALUVIALES 72

7 BIBLIOGRAFÍA **73**

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de estaciones de la RAB ..... 6
Figura 2. Esquema de sistema telemétrico de la RAB ..... 7
Figura 3. Número de estaciones que registraron cada evento sísmico ..... 9
Figura 4. Ejemplo de catálogo de eventos registrados de la RAB ..... 12
Figura 5. Registro histórico de eventos de la estación CEING ..... 13
Figura 6. Página web de la RAB en el SIRE ..... 14
Figura 7. Página web de los eventos registrados por la RAB en el SIRE ..... 14
Figura 8. Localización de estaciones de la RAB en el mapa de MSB-97 ..... 17
Figura 9. Localización de estaciones de la RAB en el mapa de AMSB-08 ..... 18
Figura 10. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CPSUB ..... 19
Figura 11. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTVCA ..... 20
Figura 12. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CESCA ..... 20
Figura 13. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUNMA ..... 20
Figura 14. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBART ..... 21
Figura 15. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CVITE ..... 21
Figura 16. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CSMOR ..... 21
Figura 17. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUSAL ..... 22
Figura 18. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUSAQ ..... 22
Figura 19. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CDIOS ..... 23
Figura 20. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CARTI ..... 23
Figura 21. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CMARI ..... 23
Figura 22. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUAGR Superficie ..... 24
Figura 23. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CEING ..... 24
Figura 24. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBANC ..... 25

Figura 25. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCORP ..... 25
Figura 26. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CLAGO ..... 25
Figura 27. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOG1 Superficie ..... 26
Figura 28. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CNIÑO ..... 26
Figura 29. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CJABO ..... 26
Figura 30. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CAVIA ..... 27
Figura 31. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CFONT ..... 27
Figura 32. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTIEM ..... 27
Figura 33. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CFLOD ..... 28
Figura 34. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CGRAL Superficie ..... 29
Figura 35. Espectros de respuesta y respuesta normalizado CTUNA ..... 29
Figura 36. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTEJE ..... 29
Figura 37. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTIMI ..... 30
Figura 38. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOSA ..... 30
Figura 39. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCITE ..... 30
Figura 40. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCKEN ..... 31
Figura 41. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUAGR Down Hole ..... 32
Figura 42. Relaciones espectrales CUAGR ..... 32
Figura 43. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOG1 Down Hole ..... 33
Figura 44. Relaciones espectrales CBOG1 ..... 33
Figura 45. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CGRAL Down Hole. ..... 34
Figura 46. Relaciones espectrales CGRAL ..... 34
Figura 47. Aceleraciones máximas registradas en superficie por evento sísmico ..... 35
Figura 48. Distribución de aceleraciones máximas registradas sismo de Betulia 08/11/1999 ..... 37
Figura 49. Localización del epicentro y replicas del sismo de Quetame (Ingeominas, 2008) ..... 38
Figura 50. Distribución de aceleraciones máximas registradas sismo de Quetame 24/05/2008 ..... 40
Figura 51. Distribución de la duración de la fase intensa del sismo de Quetame 24/05/2008 ..... 41

Figura 52. Espectros de respuesta de roca en Down Hole y Superficie....42
Figura 53. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona cerros....43
Figura 54. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona piedemonte....43
Figura 55. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona lacustre....43
Figura 56. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona aluvial....44
Figura 57. Correlación estimada entre espesor del deposito y periodo natural zona Lacustre y Aluvial....45
Figura 58. Distribución del periodo natural del depósito a partir del sismo de Quetame 24/05/2008....46
Figura 59. Acelerograma en profundidad y superficie CUAGR....49
Figura 60. Acelerograma en profundidad y superficie CGRAL....49
Figura 61. Acelerograma en profundidad y superficie CBOG1....50
Figura 62. Relación entre el espesor del depósito y la velocidad de onda cortante promedio....51
Figura 63. Modelo de perfil de velocidad de onda de corte estación CBOG1....53
Figura 64. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CUAGR....54
Figura 65. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CGRAL....54
Figura 66. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CBOG1....55
Figura 67. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CUAGR....59
Figura 68. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CUAGR....60
Figura 69. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CBOG1....61
Figura 70. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CBOG1....62
Figura 71. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CGRAL....63
Figura 72. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CGRAL....64
Figura 73. Espectro de respuesta de señales de diseño modeladas....65
Figura 74. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CUAGR....66
Figura 75. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CBOG1....67
Figura 76. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CGRAL....68

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y productos obtenidos en el estudio ..... 4

Tabla 2. Descripción de las estaciones de acelerógrafos ..... 7

Tabla 3. Eventos registrados por la RAB ..... 8

Tabla 4. Numeración de registros procesados de cada estación ..... 11

Tabla 5. Eventos registrados en la estación CBOG1 de Ingeominas ..... 15

Tabla 6. Clasificación de estaciones de acuerdo con las zonas geológicas y de respuesta sísmica ..... 16

Tabla 7. Estaciones con Down Hole ..... 31

Tabla 8. Valores de aceleración máxima registrada sismo de Betulia 08/11/1999 ..... 36

Tabla 9. Parámetros sísmicos de los registros del sismo de Quetame en Bogotá, componente SH ..... 39

Tabla 10. Periodo natural del depósito a partir de las relaciones espectrales obtenidas del sismo de Quetame ..... 45

Tabla 11. Valores estimados de la velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca ..... 50

Tabla 12. Valores estimados de a y b para los tipos de suelos generales ..... 52

Tabla 13. Valores estimados de $Vs_{ref}$ y b para los tipos de suelos generales ..... 52

Tabla 14. Velocidad de onda promedio del perfil CBOG1 estimada por diferentes métodos ..... 52

Tabla 15. Valores estimados de amortiguamiento mínimo ..... 55

Tabla 16. Resumen de parámetros recomendados para material lacustre ..... 58

Tabla 17. Resumen de parámetros recomendados para material aluvial ..... 58

Tabla 18. Perfil geotécnico analizado en CUAGR ..... 59

Tabla 19. Perfil geotécnico analizado en CBOG1 ..... 61

Tabla 20. Perfil geotécnico analizado en CGRAL ..... 63

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 destrucción parcial de la ciudad (1785, 1827, 1917) alcanzando intensidades de VIII, y cuatro han causado daños serios (1743, 1826, 1923, 1967) con intensidad 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 a través de la Dirección de Prevención y Atención Emergencias - DPAE inició los trámites correspondientes para la implementación de la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB.

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

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.

Finalmente, el presente estudio recopila y analiza la información obtenida a través de mediante el monitoreo sísmico que se realiza mediante la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB desde el año 1999 hasta junio de 2008, el cual comprende la descripción actual del funcionamiento de la RAB, el inventario, procesamiento, interpretación y análisis de los eventos registrados. Con este estudio se pretende brindar recomendaciones para la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad, para mejorar los criterios empleados en cuanto a la zonificación de efectos locales, comportamiento dinámico y respuesta espectral de los depósitos de la ciudad.

## 1.1 ANTECEDENTES

Dado que la ciudad de Bogotá se encuentra en un ambiente sismotectónico que demuestra desde el punto de vista geológico, actividad sísmica reciente, en septiembre de 1992 La Oficina para la Prevención y Atención de Emergencias - OPES hoy DPAE, 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", entre la Oficina para la Prevención y atención de Emergencias de Bogotá - OPES, como la entidad distrital responsable de la ejecución del Proyecto, la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, como la entidad nacional cabeza del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres con el INGEOMINAS y la Universidad de Los Andes, como Instituciones directoras de las actividades técnicas previstas.

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. De acuerdo con el modelo utilizado para evaluar la aceleración horizontal máxima probable sobre la cuenca rocosa de Bogotá, se obtuvo un valor igual a 0.19 g que para efectos de análisis posteriores se tomó como 0.20 g, tal como se encontró en el estudio general de amenaza sísmica de Colombia, donde se ubica a Bogotá en zona de amenaza sísmica intermedia.

El estudio concluye y recomienda que *"Los datos disponibles hasta el momento referentes a acelerógramas de eventos sísmicos registrados en estaciones ubicadas en los suelos blandos de Santafé de Bogotá resultan vitales para adelantar los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad pero son aún insuficientes para poder proponer modelos de comportamiento general. Se requiere en general mucha más instrumentación especialmente en la zona de suelos blandos para lograr captar las señales de sismos que ocurran en el futuro. Esta instrumentación debe hacerse mediante acelerógrafos distribuidos en toda la ciudad, con el fin de calibrar el modelo propuesto por este proyecto. Los datos que se obtengan serán de vital importancia para poder evaluar el estado del arte de este tema"*.

A partir de la recomendación hecha en el Estudio de Microzonificación Sísmica, y teniendo en cuenta las dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica regional por falta de información respecto al comportamiento de las rocas y suelos de la ciudad frente a las ondas sísmicas y su atenuación a través del material sedimentario, el FOPAE a través de la DPAE 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.

Finalmente, 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.

Actualmente la Subdirección de Investigación y Desarrollo de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - DPAE, tiene a cargo adelantar diferentes estudios para actualizar la microzonificación sísmica de la ciudad y el escenario de daños por terremoto, por lo cual el desarrollo de este estudio es importante para orientar el desarrollo de los anteriores proyectos.

## 1.2 OBJETIVO

- Realizar el procesamiento e interpretación de los registros de eventos sísmicos obtenidos en la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB durante el periodo comprendido entre el año 2002 y el primer semestre de 2008.

- Presentar recomendaciones para la actualización de la microzonificación sísmica, especialmente para calibrar los modelos de comportamiento dinámico y zonas de respuesta sísmica.

## 1.3 ALCANCE

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. Las investigaciones detalladas por técnicas diferentes a la referida en la metodología esta fuera del alcance del estudio, sin embargo el propósito de publicar libremente los registros en la página (www.sire.gov.co), busca incentivar la participación de las comunidades científicas en la interpretación de las señales.

## 1.4 METODOLOGÍA

Para concebir los objetivos propuestos se realizaron las siguientes actividades:

Organización de la información: comprendió realizar el inventario de eventos sísmicos registrados y la enumeración de archivos de acuerdo con la base de datos de registros.

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).

Cálculo de parámetros sísmicos: una vez se cuenta con los archivos procesados (*.ACE) se procede a calcular sus parámetros sísmicos, historia y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Interpretación de registros: a partir de los registros de mayor magnitud se procede a analizar detalladamente el comportamiento dinámico de los depósitos donde se localiza cada estación, con el fin de observar las formas espectrales, periodos de vibración, duración y aceleraciones máximas.

Estimación de propiedades dinámicas y calibración de modelos de respuesta: con base en los registros de las estaciones que cuentan con registro en profundidad (Down Hole) se calculan las propiedades dinámicas promedio del depósito. A partir de las señales medidas en profundidad y superficie se procede a realizar modelaciones unidimensionales de la respuesta de sitio con el fin de calibrar los modelos de respuesta y recalcular las propiedades dinámicas (retro análisis).

Análisis de resultados y recomendaciones: con base en los resultados de las actividades anteriores se presentan recomendaciones para la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad y en general para estudios de efectos locales que se adelanten en la ciudad.

En la Tabla 1 en la que se ilustra de manera resumida la metodología desarrollada para el procesamiento e interpretación de las señales, donde se distinguen las actividades realizadas junto con los principales productos parciales y finales obtenidos.

| Actividad | Producto |
|---|---|
| 1. Organización de registros | Archivos enumerados EVT. |
| 2. Procesamiento de Señales | Archivos corregidos por línea base y filtrados ACE. |
| 3. Cálculo de parámetros sísmicos | Catálogo de registros en Excel, el cual tiene:<br>Parámetros sísmicos del evento en la estación.<br>Historia de aceleración, velocidad y desplazamiento.<br>Espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento.<br>Espectro de amplitudes de Fourier. |
| 4. Interpretación de registros | Análisis de formas espectrales y relaciones espectrales.<br>Variación espacial de periodos dominantes del suelo, aceleraciones máximas y duración de la fase intensa. |
| 5. Estimación de propiedades dinámicas y calibración de modelos de respuesta | Propiedades dinámicas promedio en las estaciones con Down Hole.<br>Modelos de respuesta calibrados con base en las propiedades dinámicas promedio y los espectros de respuesta de los eventos registrados en las estaciones con Down Hole. |
| 6. Análisis de resultados y recomendaciones | Recomendaciones para la actualización de la microzonificación sísmica y estudios particulares de respuesta sísmica que se realicen en la ciudad. |

Tabla 1. Actividades y productos obtenidos en el estudio

CAPITULO 2

# 2 RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ – RAB

La Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. a través de la Secretaría de Gobierno y por medio de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, como coordinadora del Sistema de Prevención y Atención de Emergencias, adelanta planes de gestión del riesgo sísmico en la ciudad capital. Dentro de dichos planes y con el fin de mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica a la que está expuesta la ciudad se implantó la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB.

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 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, 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 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. En la Figura 2 se ilustra de manera esquemática el funcionamiento del sistema telemétrico de la RAB.

Actualmente la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá-DPAE realiza la operación y mantenimiento de la Red de Acelerógrafos de Bogotá.

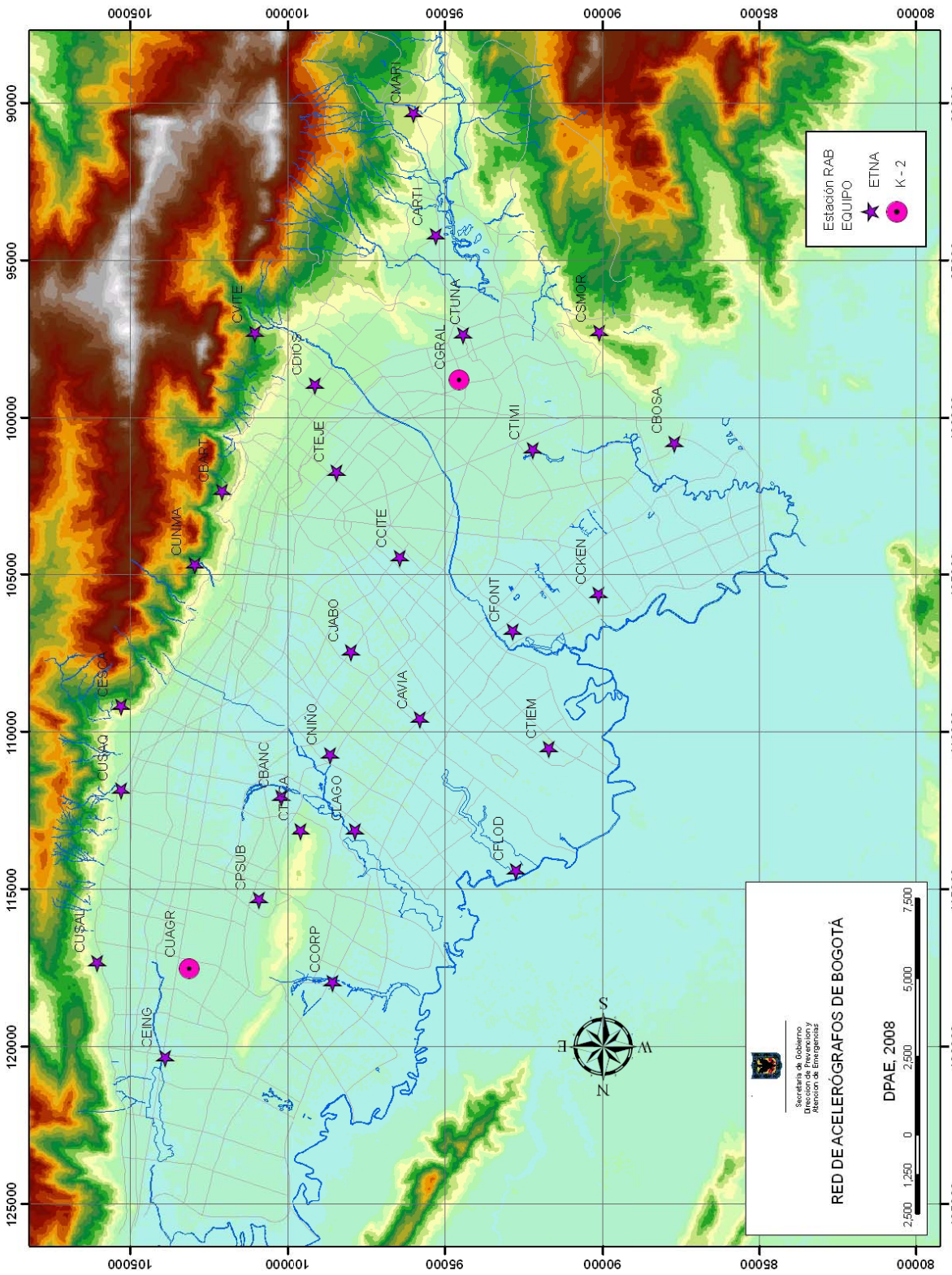
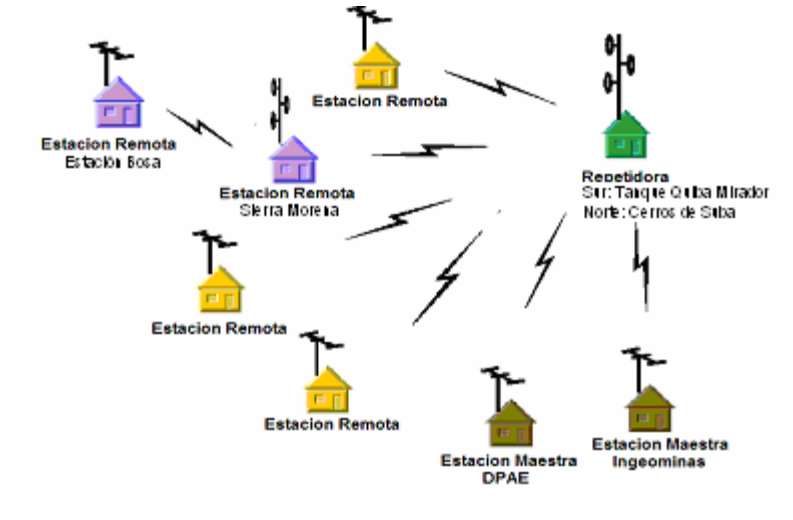



Figura 1. Localización de estaciones de la RAB




Nota: las estaciones que se muestran en color morado son aquellas que por condiciones topográficas no pueden transmitir la señal directamente a la estación repetidora, por ello realizan un puente con otra estación remota para poder transmitir su señal

Figura 2. Esquema de sistema telemétrico 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 se resumen la localización de cada estación y sus características principales.

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

Tabla 2. 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 3 se presenta el resumen de eventos registrados por las estaciones de la RAB a la fecha y en la Figura 3 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 sismico importante este disponible para su registro en la base de datos.

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

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

Tabla 3. Eventos registrados por la RAB

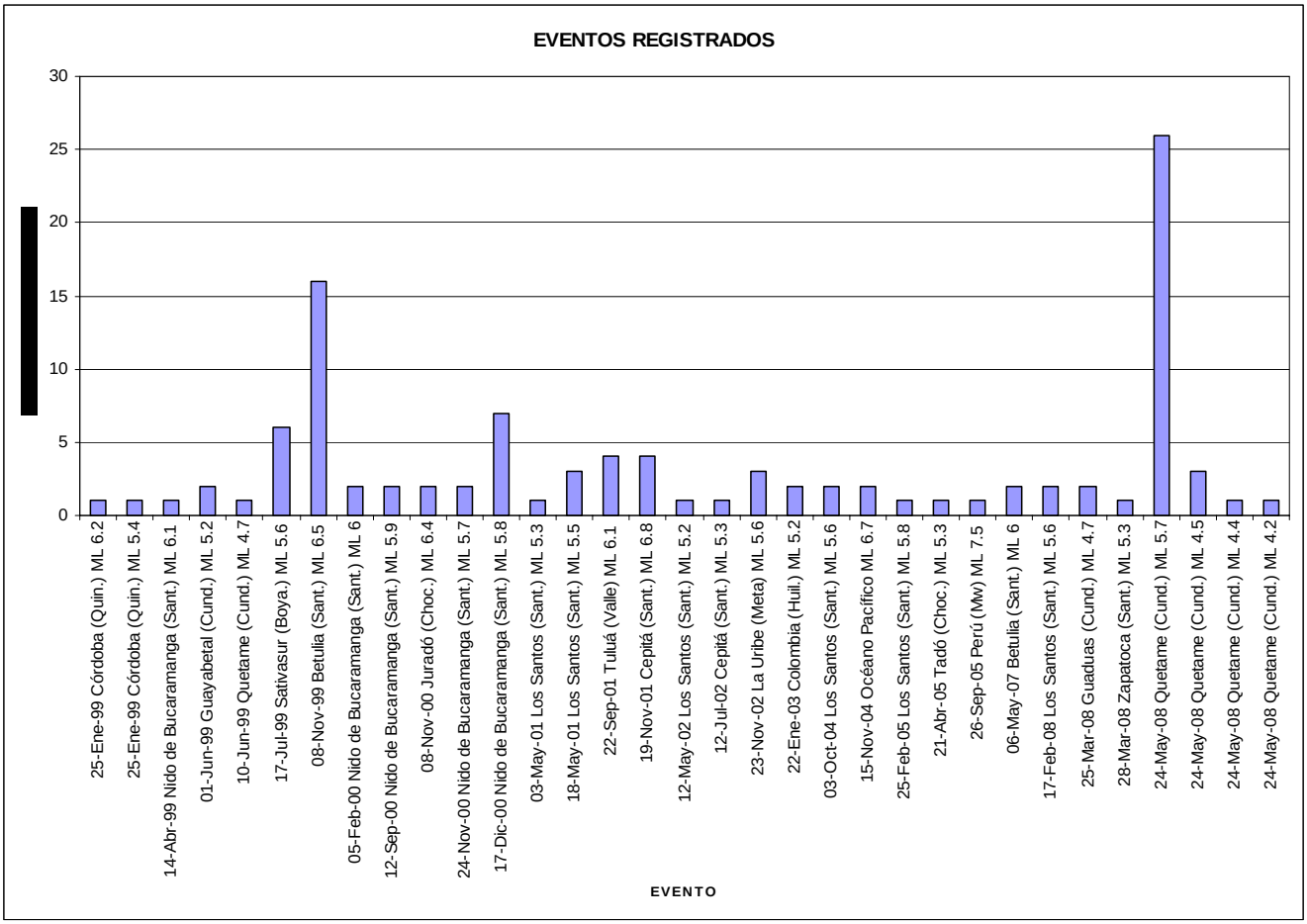



Figura 3. Número de estaciones que registraron cada evento sísmico

Como se observa en la figura anterior los eventos con mayor cubrimiento fueron el sismo de Betulia Santander del 8 de noviembre de 1999 y el sismo de Quetame Cundinamarca del 24 de mayo de 2008, con 16 y 26 estaciones respectivamente.

CAPITULO 3

# 3 PROCESAMIENTO Y PUBLICACIÓN DE REGISTROS DE LA RAB

Una vez se obtienen los registros de las estaciones de la RAB, estos deben someterse a varios procedimientos para que la información esté en los formatos compatibles y de esta manera puedan ser publicados e interpretados. De este modo, este capítulo resume los aspectos más relevantes realizados para llevar a cabo el procesamiento y publicación de los registros.

Es importante mencionar que el procesamiento siguió los lineamientos dados en el estudio de la Universidad de Los Andes "Procesamiento e interpretación de la información sísmica de Bogotá" realizado en el año 2002. Estudio en el cual se procesaron y realizaron los catálogos de los registro de la RAB entre 1999 y 2001 (UNIANDES, 2002).

## 3.1 PROCESAMIENTO DE REGISTROS

El procesamiento de los registros consiste en realizar los procesos necesarios para obtener los datos de manera que puedan ser analizados fácilmente, para lo anterior se deben realizar los siguientes pasos:

- Numeración del registro de acuerdo con el consecutivo que tiene la estación.

- Conversión de los archivos madre de los acelerógrafos de formato *.EVT a archivos planos, para ello se ejecuta el aplicativo de KINEMETRICS KW2CNTS.EXE en entorno DOS para obtener los archivos planos de cada componente en Gales corregidos por línea base sustrayendo el promedio de los datos del pre-evento, mediante el siguiente comando:

  -Comando: \KW2CNTS nombre.EVT –n –g –p

  -Resultados: nombre.1PG, nombre .2PG y nombre .3PG para tipo ETNA y nombre.1PG, nombre .2PG y nombre .3PG nombre.4PG, nombre .5PG y nombre .6PG para tipo K-2

- Corrección y filtrado de los archivos planos *.nPG (n=1, 2, 3… 6) para obtener los *n.ACE, se realizan con los siguientes parámetros en cualquier procesador de señales disponible.

  -Corrección de línea base polinomial de tipo lineal.

  -Filtro Butterworth pasa bandas 0.25 Hz y 50 Hz de 6 orden.

  -Resultados: *1.ACE, *2.ACE, *3.ACE para tipo ETNA y *1.ACE, *2.ACE, *3.ACE, *4.ACE, *5.ACE, *6.ACE para tipo K2

- Cálculo para cada componente del registro de los siguientes parámetros sísmicos:

  -Duración estimada entre el 5 y 95% de la Intensidad de Arias

  -Intensidad de Arias en cm/s

  -Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos

  -Máximas aceleraciones, velocidades y desplazamientos

  -Espectros de respuesta para 2, 5 y 10% de amortiguamiento de aceleraciones, velocidades y desplazamientos

-Espectro de Amplitudes de Fourier

Los resultados de cada una de los anteriores procesos se encuentran en formato digital debidamente ordenados por año y se compilan en el formato del catálogo de eventos diseñado en Excel. En la Tabla 4 se resume la numeración de los archivos EVT y ACE procesados de cada estación.

| | ESTACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SISMO** | **CEING** | **CUSAL** | **CBOSA** | **CCORP** | **CUAGR** | **CPSUB** | **CUSAQ** | **CESCA** | **CBANC** | **CTVCA** | **CFLOD** | **CAVIA** | **CFONT** | **CNIÑO** | **CJABO** | **CBART** | **CUNMA** | **CDIOS** | **CCITE** | **CTIEM** | **CTIMI** | **CTUNA** | **CARTI** | **CMARI** | **CSMOR** | **CTEJE** | **CVITE** | **CLAGO** | **CGRAL** | **CCKEN** |
| **25-Ene-99 Córdoba (Quin.) ML 6.2** | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| **25-Ene-99 Córdoba (Quin.) ML 5.4** | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| **14-Abr-99 Nido de Bucaramanga (Sant.) ML 6.1** | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| **01-Jun-99 Guayabetal (Cund.) ML 5.2** | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | |
| **10-Jun-99 Quetame (Cund.) ML 4.7** | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | |
| **17-Jul-99 Sativasur (Boya.) ML 5.6** | 2 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | |
| **08-Nov-99 Betulia (Sant.) ML 6.5** | 3<br>4 | 2<br>3 | | 2<br>3 | 1 | 2 | | | | 1<br>2 | 1<br>2 | 2<br>3 | 1<br>2 | | | 7<br>8 | | 1<br>2 | | | | 1<br>2 | 1<br>2 | | | | | 1 | | 1<br>2 | 1<br>2<br>3 |
| **05-Feb-00 Nido de Bucaramanga (Sant.) ML 6** | | | | | 2 | | | | | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **12-Sep-00 Nido de Bucaramanga (Sant.) ML 5.9** | | | | | 3 | | | | | | | | | | | 9 | | | | | | | | | | | | | | |
| **08-Nov-00 Juradó (Choc.) ML 6.4** | | | | | 4 | | | | | | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **24-Nov-00 Nido de Bucaramanga (Sant.) ML 5.7** | | | | | 5 | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **17-Dic-00 Nido de Bucaramanga (Sant.) ML 5.8** | 5 | | | | 6 | 3 | 1 | | | 5 | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | 1 | | |
| **03-May-01 Los Santos (Sant.) ML 5.3** | | | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **18-May-01 Los Santos (Sant.) ML 5.5** | | | | | 8 | | | | | 6 | | | | | | 11 | | | | | | | | | | | | | | |
| **22-Sep-01 Tuluá (Valle) ML 6.1** | | | | | 9 | | | | | 7 | | | | | | 12 | | | | | | | | | | | | | 3<br>4 | |
| **19-Nov-01 Cepitá (Sant.) ML 6.8** | 6 | | | | 10 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5<br>6 | |
| **12-May-02 Los Santos (Sant.) ML 5.2** | | | | | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **12-Jul-02 Cepitá (Sant.) ML 5.3** | | | | | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **23-Nov-02 La Uribe (Meta) ML 5.6** | | | | | 13 | | 2 | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **22-Ene-03 Colombia (Huil.) ML 5.2** | | | | | 14 | | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **03-Oct-04 Los Santos (Sant.) ML 5.6** | | | | | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | |
| **15-Nov-04 Océano Pacífico ML 6.7** | 7<br>8 | | | | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **25-Feb-05 Los Santos (Sant.) ML 5.8** | | | | | 17<br>18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **21-Abr-05 Tadó (Choc.) ML 5.3** | | | | | 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **26-Sep-05 Perú Mw 7.5** | | | | | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **06-May-07 Betulia (Sant.) ML 6** | | 4 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **17-Feb-08 Los Santos (Sant.) ML 5.6** | | | | | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 | |
| **25-Mar-08 Guaduas (Cund.) ML 4.7** | | | | | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 | |
| **28-Mar-08 Zapatoca (Sant.) ML 5.3** | | | | | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **24-May-08 Quetame (Cund.) ML 5.7** | 9 | 5 | 1 | 4 | 24 | | 3 | 1 | 2 | 8 | 4 | 6 | 3 | 1 | 1 | 13 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 3 | | 1 | 1 | 1 | 2 | | 10 | 1 |
| **24-May-08 Quetame (Cund.) ML 4.5** | | | | | 25 | | | | | | | | | | | 14 | | | | | | | | 2 | | | | | | |
| **24-May-08 Quetame (Cund.) ML 4.4** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | |
| **24-May-08 Quetame (Cund.) ML 4.2** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | |

Tabla 4. Numeración de registros procesados de cada estación

## 3.2 CATÁLOGO DE EVENTOS Y FICHA HISTÓRICA DE REGISTROS

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). En la Figura 4 se presenta un ejemplo de una componente del catálogo de eventos.

De manera complementaria al catálogo de eventos se diseñaron e implementaron 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 y espectros de respuesta normalizados por la aceleración máxima de la señal. En la Figura 5 se presenta un ejemplo del histórico de eventos de la estación Escuela de Ingeniería CEING y en el Anexo 2 se compilan las fichas de cada estación.

| EVENTO: | FECHA: | ESTACIÓN: | COMPONENTE: |
|---|---|---|---|
| QUETAME - CUNDINAMARCA | 24/05/2008 | TANQUES DE VITELMA | E-O |

| | | | |
|---|---|---|---|
| LOCALIZACION EPICENTRO: QUETAME - CUNDINAMARCA<br>HORA UT: 19.21 | | ESTACION DE REGISTRO: TANQUES DE VITELMA<br>CODIGO: CVITE | |
| LATITUD: 4.399°N | LONGITUD: -73.814°E | LATITUD: 4.58°N | LONGITUD: -74.07°E |
| PROFUNDIDAD: 3.9 Km | FASE INTENSA: 15.1 s | APARATO DE REGISTRO: ETNA | |
| MAGNITUD ML: 5.7 | INTENSIDAD ARIAS: 1.2E-0 cm/s | GEOLOGIA: SUELO | TOPOGRAFIA: ONDULADA |
| ARCHIVO: CVITE002.EVT | CANAL DE REGISTRO: 1 | EPICENTRO: 34.5 Km | HIPOCENTRO: 34.7 Km |
| TOTAL SITIOS DE REGISTRO: | 27 | RANGO DE REGISTRO: ± 2g | |
| PROCESAMIENTO: | FILTRO BUTTERWORTH ORDEN 6, PASA BANDA 0.25 - 50 Hz | | |
| VALORES MÁXIMOS: | Amax = 25.71 cm/s², t = 7.63 s | Vmax = 2.17 cm/s, t = 12.48 s | Dmax = 0.39 cm, t = 13.88 s |

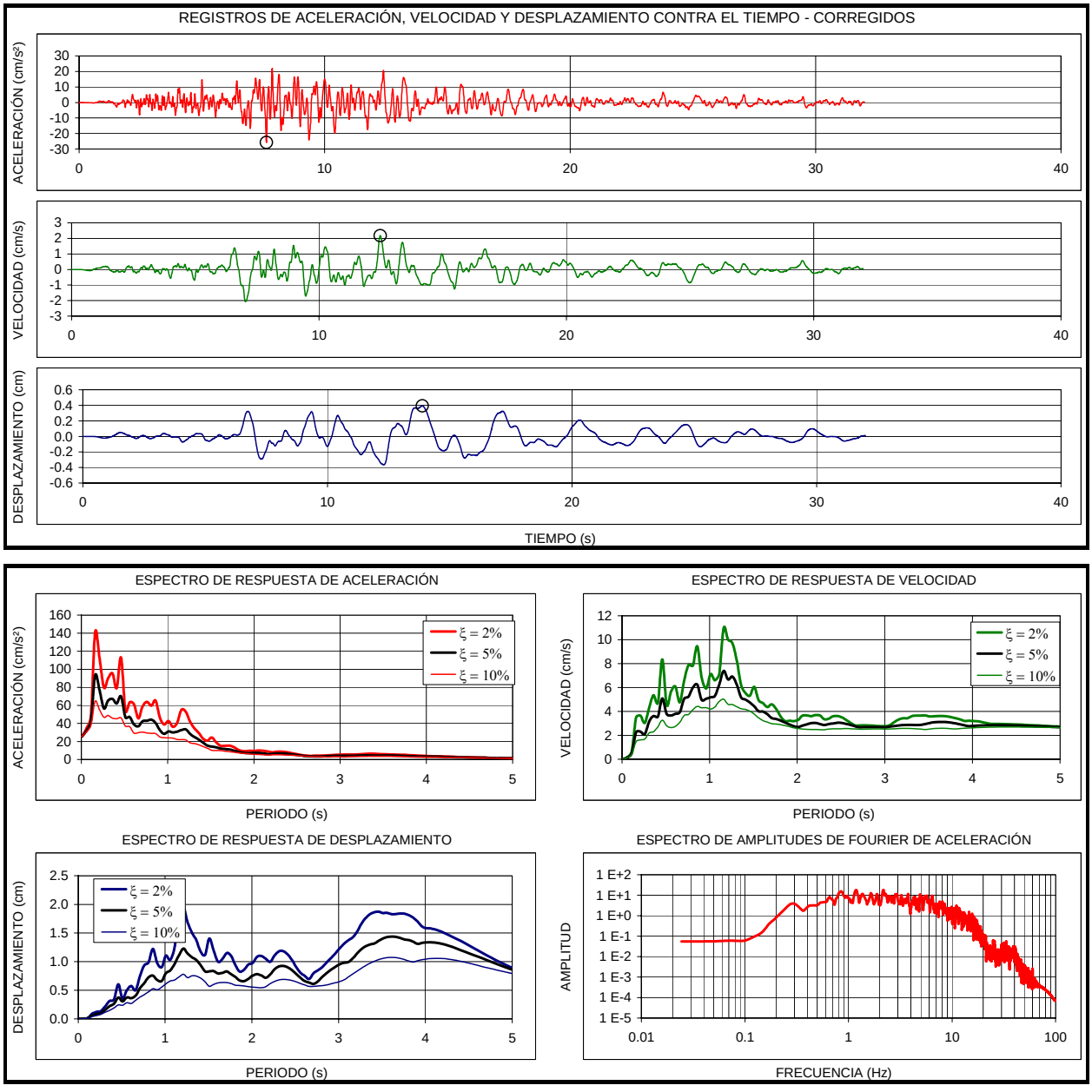
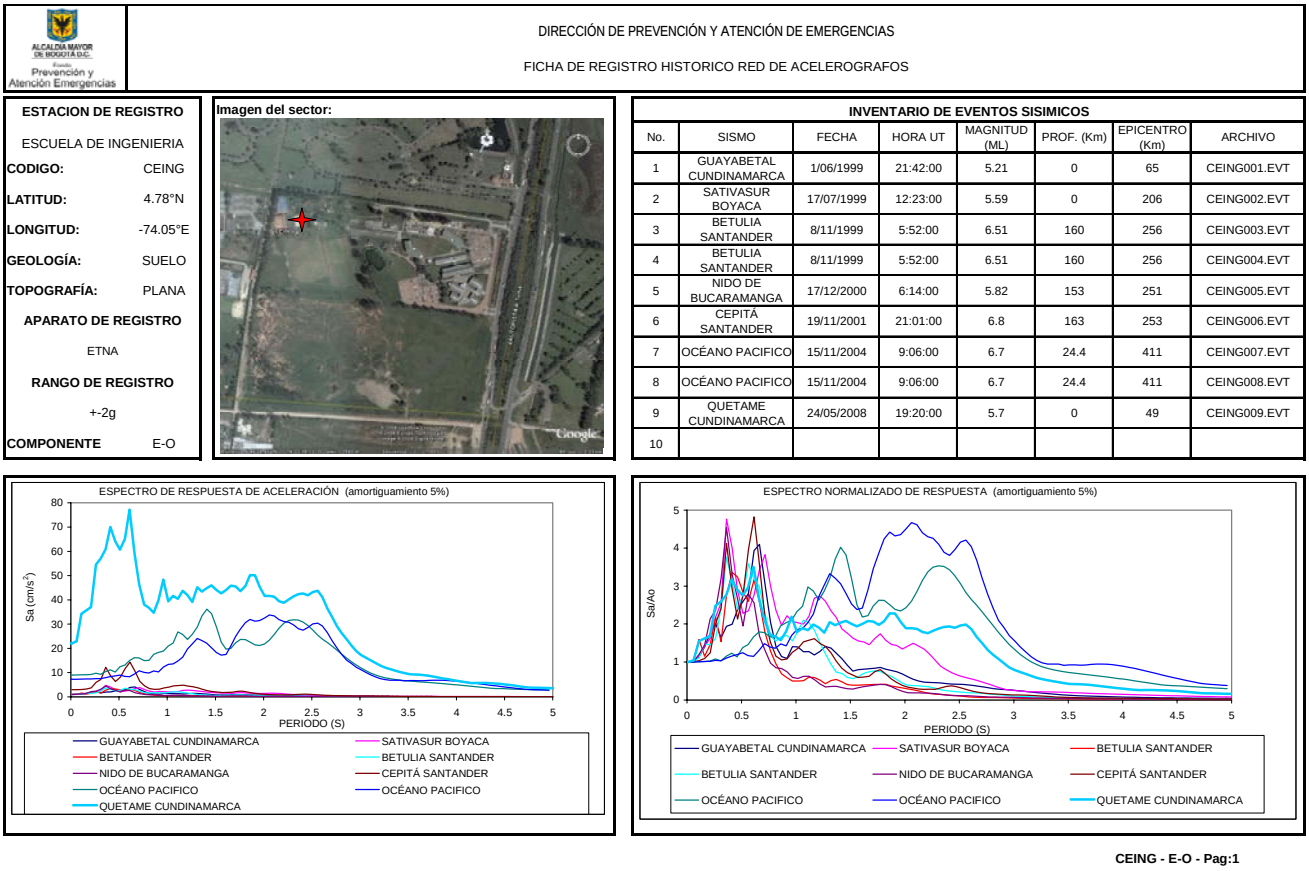



Figura 4. Ejemplo de catálogo de eventos registrados de la RAB



DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

FICHA DE REGISTRO HISTORICO RED DE ACELEROGRAFOS

**ESTACION DE REGISTRO**

ESCUELA DE INGENIERIA

| | |
|---|---|
| **CODIGO:** | CEING |
| **LATITUD:** | 4.78°N |
| **LONGITUD:** | -74.05°E |
| **GEOLOGÍA:** | SUELO |
| **TOPOGRAFÍA:** | PLANA |

**APARATO DE REGISTRO**

ETNA

**RANGO DE REGISTRO**

+-2g

**COMPONENTE** E-O

**Imagen del sector:**



**INVENTARIO DE EVENTOS SISIMICOS**

| No. | SISMO | FECHA | HORA UT | MAGNITUD (ML) | PROF. (Km) | EPICENTRO (Km) | ARCHIVO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | GUAYABETAL CUNDINAMARCA | 1/06/1999 | 21:42:00 | 5.21 | 0 | 65 | CEING001.EVT |
| 2 | SATIVASUR BOYACA | 17/07/1999 | 12:23:00 | 5.59 | 0 | 206 | CEING002.EVT |
| 3 | BETULIA SANTANDER | 8/11/1999 | 5:52:00 | 6.51 | 160 | 256 | CEING003.EVT |
| 4 | BETULIA SANTANDER | 8/11/1999 | 5:52:00 | 6.51 | 160 | 256 | CEING004.EVT |
| 5 | NIDO DE BUCARAMANGA | 17/12/2000 | 6:14:00 | 5.82 | 153 | 251 | CEING005.EVT |
| 6 | CEPITÁ SANTANDER | 19/11/2001 | 21:01:00 | 6.8 | 163 | 253 | CEING006.EVT |
| 7 | OCÉANO PACIFICO | 15/11/2004 | 9:06:00 | 6.7 | 24.4 | 411 | CEING007.EVT |
| 8 | OCÉANO PACIFICO | 15/11/2004 | 9:06:00 | 6.7 | 24.4 | 411 | CEING008.EVT |
| 9 | QUETAME CUNDINAMARCA | 24/05/2008 | 19:20:00 | 5.7 | 0 | 49 | CEING009.EVT |
| 10 | | | | | | | |



**CEING - E-O - Pag:1**

Figura 5. Registro histórico de eventos de la estación CEING

## 3.3 PUBLICACIÓN DE LOS REGISTROS EN EL SIRE

El Sistema de Información para la Gestión de Riesgos y Atención de Emergencias de Bogotá - SIRE es un sistema de información que apoya la administración de la información relacionada con el proceso de gestión de riesgo y atención de emergencias de Bogotá, que se concibe como un instrumento que permite recopilar, integrar, producir y divulgar información técnica y de coordinación a las entidades del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias – SDPAE, y facilita la inclusión del riesgo en la cultura a través de la información disponible y los servicios en línea dirigidos a la comunidad.

Bajo este enfoque, la información obtenida del monitoreo sísmico que se realiza mediante la Red de Acelerógrafos de Bogotá se publica periódicamente en la página del SIRE (www.sire.gov.co), para que esté a disposición de la comunidad y en especial de los expertos en el tema de amenaza sísmica y respuesta de sitio entre otros, de manera que se puedan adelantar investigaciones que sean útiles, para posteriormente actualizar los modelos empleados en los estudios relacionados. En la **Figura 6 y Figura 7** se ilustran las páginas web diseñadas para la RAB y para los registros que a la fecha se han procesado, los cuales se pueden descargar en el formato original del equipo (EVT) o el archivo (ACE) filtrado y corregido por línea base.




Figura 6. Página web de la RAB en el SIRE

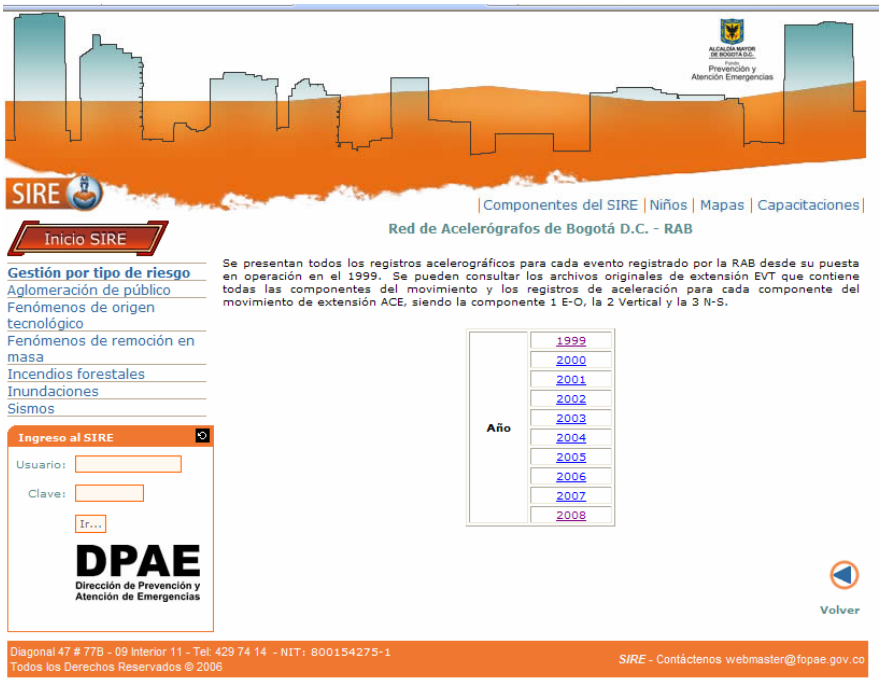



Figura 7. Página web de los eventos registrados por la RAB en el SIRE

CAPITULO 4

# 4 INTERPRETACIÓN DE REGISTROS

En el presente capítulo se resumen los principales aspectos que se logran interpretar de los registros medidos en las estaciones de la RAB, como son los periodos naturales de vibración, los niveles de amplificación, la distribución de aceleraciones máximas y duraciones espacialmente, entre otros. Adicionalmente, se analizarán los registros obtenidos en la estación CBOG1 que pertenece a la Red Nacional Acelerógrafos de Colombia - RNAC, de propiedad de INGEOMINAS que han sido suministrados gentilmente por dicho instituto para ser analizados en conjunto con las demás estaciones, cuyos eventos registrados se resumen en la Tabla 5.

| FECHA d/m/a | HORA hh:mm:ss.ss (UT) | MAG. (ML) | PROF. Km | LAT. (°) | LONG. (°) | MUNICIPIO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 06/06/94 | 20:47:39 | 6.4 | Sup. | 2.850 | -76.070 | PAEZ (CAUCA) |
| 19/01/95 | 15:05:05 | 6.6 | Sup. | 5.034 | -72.952 | PAEZ (BOYACÁ) |
| 19/08/95 | 21:43:34 | 6.5 | 121 | 5.133 | -75.713 | RISARALDA (CALDAS) |
| 01/01/97 | 04:35:55 | 5.8 | 152 | 6.802 | -73.153 | LOS SANTOS (SANTANDER) |
| 11/06/97 | 19:11:04 | 5.8 | 151.4 | 6.820 | -73.103 | LOS SANTOS (SANTANDER) |
| 10/02/98 | 06:24:51 | 4.8 | Sup. | 5.173 | -73.026 | SAN EDUARDO (BOYACÁ) |
| 08/03/98 | 04:59:10 | 5.3 | Sup. | 6.265 | -73.899 | CIMITARRA (SANTANDER) |
| 25/01/99 | 18:19:18 | 6.1 | Sup. | 4.432 | -75.703 | CÓRDOBA (QUINDÍO) |
| 14/04/99 | 07:25:06 | 5.8 | 156 | 6.810 | -73.100 | LOS SANTOS (SANTANDER) |
| 15/05/99 | 10:20:38 | 4.6 | 22.2 | 4.670 | -74.720 | PULI (CUNDINAMARCA) |
| 01/06/99 | 21:42:00 | 5 | Sup. | 4.288 | -73.736 | GUAYABETAL (CUNDINAMARCA) |
| 17/07/99 | 12:21:25 | 5.4 | Sup. | 6.073 | -72.727 | SATIVASUR (BOYACÁ) |
| 08/11/99 | 05:51:20 | 6.2 | 164.4 | 6.866 | -73.185 | ZAPATOCA (SANTANDER) |
| 17/01/00 | 12:20:07.2 | 5.8 | Sup. | 6.67 | -72.05 | FORTUL (ARAUCA) |
| 05/02/00 | 21:52:49 | 5.6 | 147.2 | 6.823 | -73.253 | NIDO DE BUCARAMANGA |
| 24/05/00 | 01:02:02 | 4.4 | 6.6 | 4.76 | -74.67 | PULI (CUNDINAMARCA) |
| 12/09/00 | 10:54:55 | 5.6 | 158 | 6.74 | -73.17 | VILLANUEVA (SANTANDER) |
| 08/11/00 | 07:02:10 | 6.4 | Sup. | 7.13 | -77.94 | JURADO (CHOCÓ) |
| 17/12/00 | 06:13:25 | 5.5 | 155.2 | 6.82 | -73.1 | LOS SANTOS (SANTANDER) |
| 22/09/01 | 3:23:39.2 | 6.0 | 180 | 3.99 | -76.08 | TULUA (VALLE) |
| 19/11/01 | 21:01:42 | 5.9 | 160.5 | 6.813 | -73.004 | CEPITÁ (SANTANDER) |
| 26/04/02 | 1:36:28 | 5.4 | Sup. | 6.72 | -73.71 | EL CARMEN (SANTA) |
| 24/07/02 | 19:38:08 | 4.7 | Sup. | 4.69 | -74.73 | PULI (CUNDINAMARCA) |
| 23/11/02 | 23:56:42 | 5.6 | Sup. | 3.30 | -74.42 | LA URIBE (META) |
| 22/01/03 | 15:55:35 | 5.3 | Sup. | 3.580 | -74.540 | COLOMBIA (HUILA) |
| 26/09/05 | 01:55:39 | Mw=7.5 | 127.4 | -5.670 | -76.41 | MOYOBAMBA (PERÚ) |
| 24/05/08 | 14:21:00 | 5.7 | Sup. | 4.399 | -73.814 | QUETAME (CUNDINAMARCA) |

Sup.= Supericial menor o igual a 5 Km.

Tabla 5. Eventos registrados en la estación CBOG1 de Ingeominas

## 4.1 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN CADA ESTACIÓN

De acuerdo con los mapas de Geología (INGEOMINAS, 1995), Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB-97(Figura 8) (INGEOMINAS & UNIANDES, 1997) y la propuesta de Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, AMZSB-08 (Figura 9) (DPAE, 2008), se identificó en que unidad o zona se encuentra cada estación de la RAB de FOPAE y de RNAC de INGEOMINAS, de modo que se agruparon para efectos de los siguientes análisis en: Cerros, Piedemonte, Lacustre y Aluvial, como se señala en la Tabla 6.

| No. | CÓDIGO | NOMBRE | EQUIPO | GEOLOGÍA | ZONA MZSB-97 | ZONA AMZSB-08 | GRUPO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CEING | E. COL. DE INGENIERÍA | ETNA | Llanura de Inundación | 3 – Lacustre A | Lacustre-150 | LACUSTRE |
| 2 | CUSAL | UNIVERSIDAD DE LA SALLE | ETNA | Coluvión | 2 – Piedemonte | Piedemonte | PIEDEMONTE |
| 3 | CBOSA | COL. FERNANDO MAZUERA | ETNA | Complejo de Conos | 1 – Cerros | Aluvial-100 | ALUVIAL |
| 4 | CCORP | UNIVERSIDAD CORPAS | ETNA | Terraza Alta | 4 – Lacustre B | Lacustre-250 | LACUSTRE |
| 5 | CUAGR | UNIAGRARIA | K - 2 | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-150 | LACUSTRE |
| 6 | CPSUB | ACADEMIA DE POLICÍA | ETNA | Terraza Alta | 2 – Piedemonte | Piedemonte | CERRO |
| 7 | CUSAQ | COL. ESCOLAR DE USAQUEN | ETNA GPS | Complejo de Conos | 2 – Piedemonte | Piedemonte | PIEDEMONTE |
| 8 | CESCA | ESCUELA DE CABALLERÍA | ETNA | Coluvión | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 9 | CBANC | BANCO DE LA REPUBLICA | ETNA | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-100 | LACUSTRE |
| 10 | CTVCA | T.V. CABLE | ETNA GPS | Coluvión | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 11 | CFLOD | PARQUE LA FLORIDA | ETNA | Llanura de Inundación | 4 – Lacustre B | Lacustre-500 | LACUSTRE |
| 12 | CAVIA | AVIANCA | ETNA | Terraza Alta | 4 – Lacustre B | Lacustre-300 | LACUSTRE |
| 13 | CFONT | PTA DE BOMBEO FONTIBON | ETNA | Llanura de Inundación | 5 - Aluvial | Lacustre-300 | LACUSTRE |
| 14 | CNIÑO | C. DE ESTUDIOS DEL NIÑO | ETNA | Llanura de Inundación | 4 – Lacustre B | Lacustre-250 | LACUSTRE |
| 15 | CJABO | JARDÍN BOTÁNICO | ETNA | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-300 | LACUSTRE |
| 16 | CBART | COLEGIO SAN BARTOLOMÉ | ETNA | Coluvión | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 17 | CUNMA | U. MANUELA BELTRÁN | ETNA | Formación Plaeners | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 18 | CDIOS | HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS | ETNA GPS | Complejo de Conos | 5 – Aluvial | Piedemonte | PIEDEMONTE |
| 19 | CCITE | CITEC | ETNA GPS | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-250 | ALUVIAL |
| 20 | CTIEM | CLUB EL TIEMPO | ETNA | Terraza Alta | 4 – Lacustre B | Lacustre-500 | LACUSTRE |
| 21 | CTIMI | PARQUE TIMIZA | ETNA | Complejo de Conos | 5 – Aluvial | Aluvial-200 | ALUVIAL |
| 22 | CTUNA | PARQUE TUNAL | ETNA | Terraza Baja | 5 – Aluvial | Aluvial-50 | ALUVIAL |
| 23 | CARTI | ESCUELA DE ARTILLERÍA | ETNA | Terraza Baja | 2 – Piedemonte | Piedemonte | PIEDEMONTE |
| 24 | CMARI | BOMBEROS MARICHUELA | ETNA | Complejo de Conos | 1 – Cerros | Cerro | PIEDEMONTE |
| 25 | CSMOR | COLEGIO SIERRA MORENA | ETNA | Coluvion | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 26 | CTEJE | ESCUELA DE TEJEDORES | ETNA GPS | Complejo de Conos | 5 – Aluvial | Aluvial-100 | ALUVIAL |
| 27 | CVITE | TANQUES DE VITELMA | ETNA | Coluvion | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 28 | CLAGO | COLEGIO LAUREANO GÓMEZ | ETNA GPS | Terraza Alta | 4 – Lacustre B | Lacustre-200 | LACUSTRE |
| 29 | CGRAL | ESCUELA GENERAL SANTANDER | K - 2 | Complejo de Conos | 5 – Aluvial | Aluvial-150 | ALUVIAL |
| 30 | CCKEN | COL-KENNEDY | ETNA | Terraza Baja | 5 – Aluvial | Aluvial-250 | ALUVIAL |
| 31 | CBOG1 | INGEOMINAS | K - 2 | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-200 | LACUSTRE |
| 32 | CBOG2 | GAVIOTAS (INGEOMINAS) | ETNA | Formación Plaeners | 1 – Cerros | Cerro | CERRO |
| 33 | CREAC | REACTOR (INGEOMINAS) | ETNA | Terraza Alta | 3 – Lacustre A | Lacustre-250 | LACUSTRE |

Tabla 6. Clasificación de estaciones de acuerdo con las zonas geológicas y de respuesta sísmica

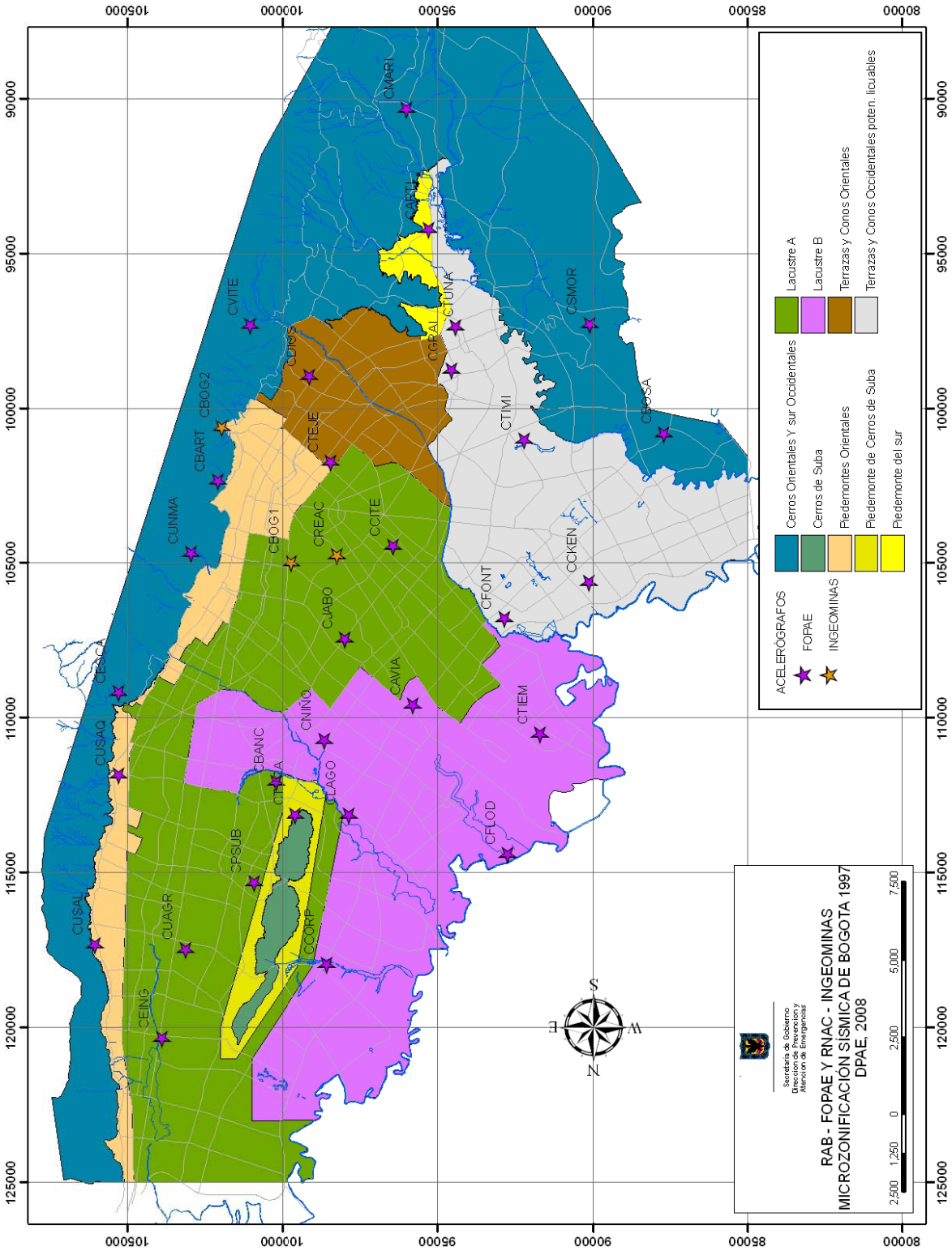



Figura 8. Localización de estaciones de la RAB en el mapa de MSB-97

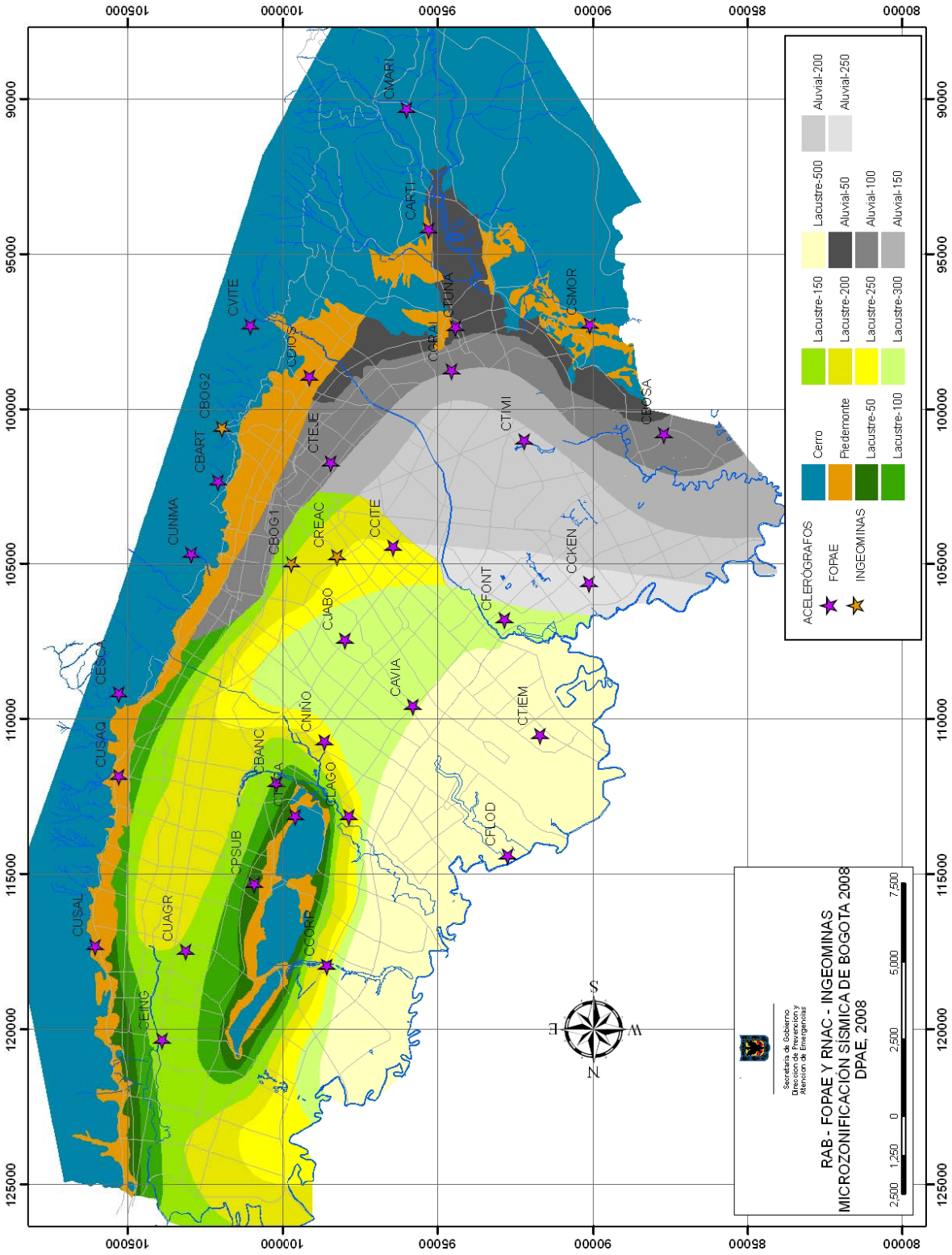



Figura 9. Localización de estaciones de la RAB en el mapa de AMSB-08

Para cada estación se calcularon los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento, y en las estaciones con sensor en profundidad (Down Hole) ver Tabla 7, se obtuvieron relaciones espectrales de cada señal. Para un mejor entendimiento de los análisis se resume brevemente algunos conceptos importantes a continuación.

Espectro de respuesta: describe la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad (single-degree of freedom SDOF) para una excitación particular, la máxima respuesta o valor espectral será función de la frecuencia o periodo natural y de la relación de amortiguamiento del sistema SDOF. El espectro de respuesta se gráfica usualmente en termino de valores espectrales de aceleración, velocidad o desplazamiento versus el periodo natural del sistema SDOF.

Espectro de amplitudes de Fourier: describe como las amplitudes del movimiento se distribuyen con respecto a las frecuencias de los ciclos, en éste se aprecia claramente el contenido frecuencial de la señal.

Función de transferencia: es una aproximación lineal del comportamiento del medio transmisor, las funciones de transferencia son derivadas a partir de los espectros de amplitudes de Fourier en superficie y roca, de esta manera se puede observar el efecto del medio en la señal en términos de amplificación para cada frecuencia de la señal.

Relación espectral: se define como el cociente entre el espectro de respuesta en superficie y el espectro de respuesta en roca de la señal analizada, de esta manera se pueda observar el efecto del depósito de suelo a la señal de análisis en términos de la amplificación presentada para cada período de vibración.

Periodo dominante: corresponde al inverso de la frecuencia de mayor contenido frecuencial de la señal, usualmente se emplea el término para caracterizar el movimiento sísmico y se correlaciona con la distancia a la fuente que la originó.

Periodo natural: corresponde al periodo de vibración del depósito donde se presenta la mayor amplificación, el cual se manifiesta en el primer modo de vibración.

### 4.1.1 Zona de Cerros

La zona de cerros comprende los sectores en los que afloran las rocas sedimentarias, bajo esta condición se encuentran siete estaciones de la RAB, de las cuales dos están en los cerros de suba, Academia de Policía (CPSUB) y TV Cable (CTVCA); cuatro en los cerros orientales, Escuela de Caballería (CESCA), Universidad Manuela Beltrán (CUNMA), Colegio San Bartolomé (CBART) y Tanques de Vitelma (CVITE); y una en los cerros del sur en el Colegio Sierra Morena (CSMOR). De la Figura 10 a la Figura 16 se presentan los registros medidos en las estaciones de la RAB localizadas en la zona de Cerros.

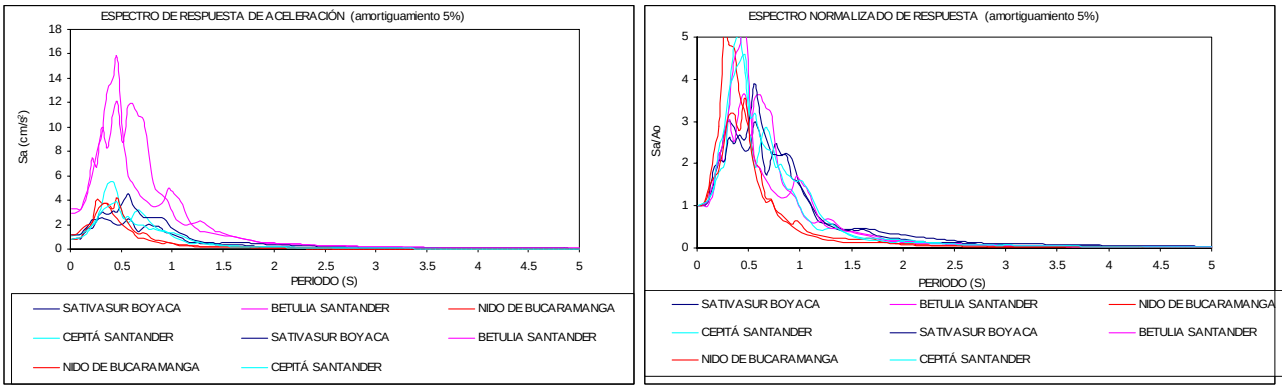



Figura 10. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CPSUB

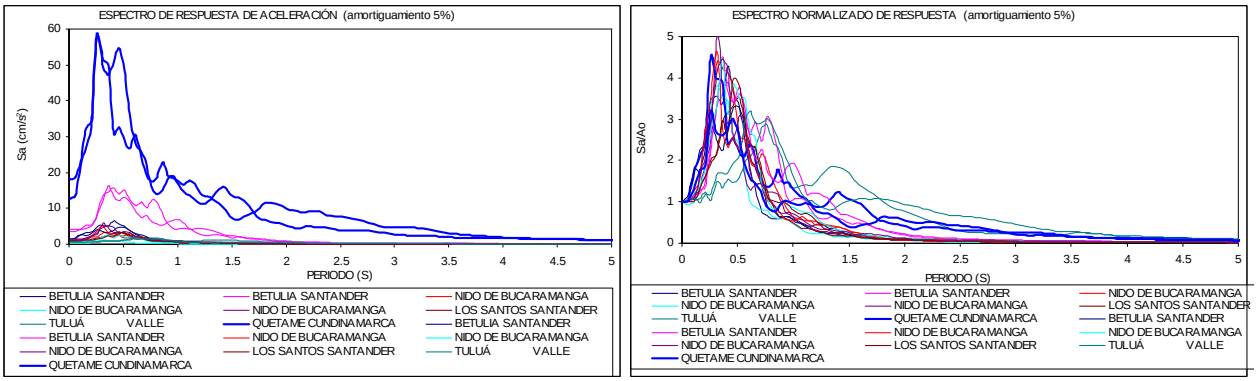



Figura 11. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTVCA

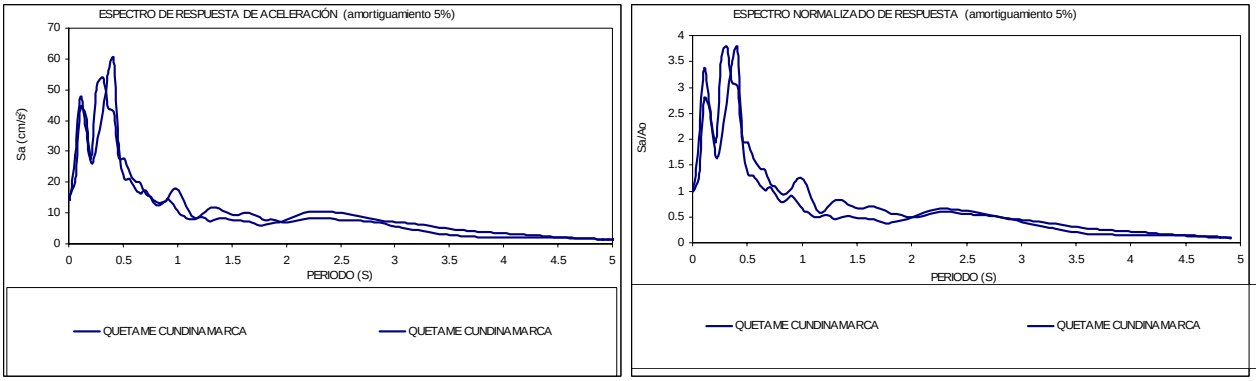



Figura 12. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CESCA

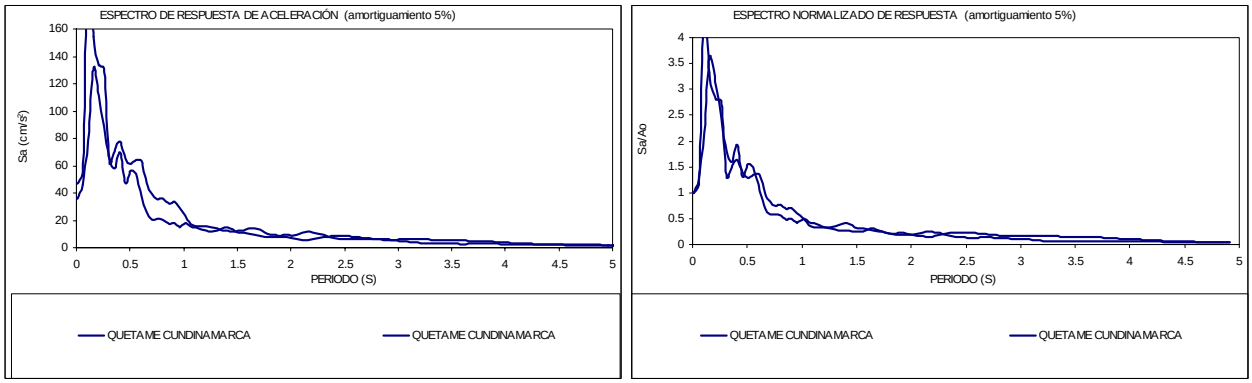



Figura 13. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUNMA

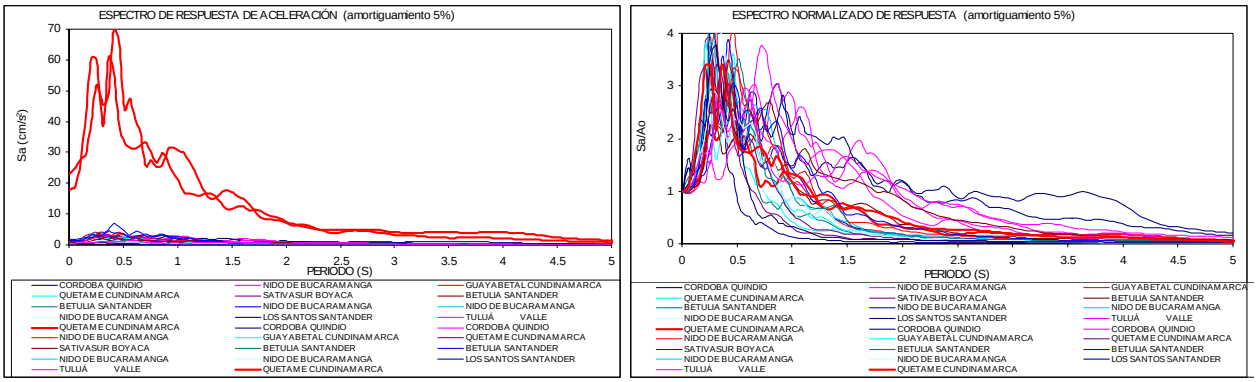



Figura 14. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBART

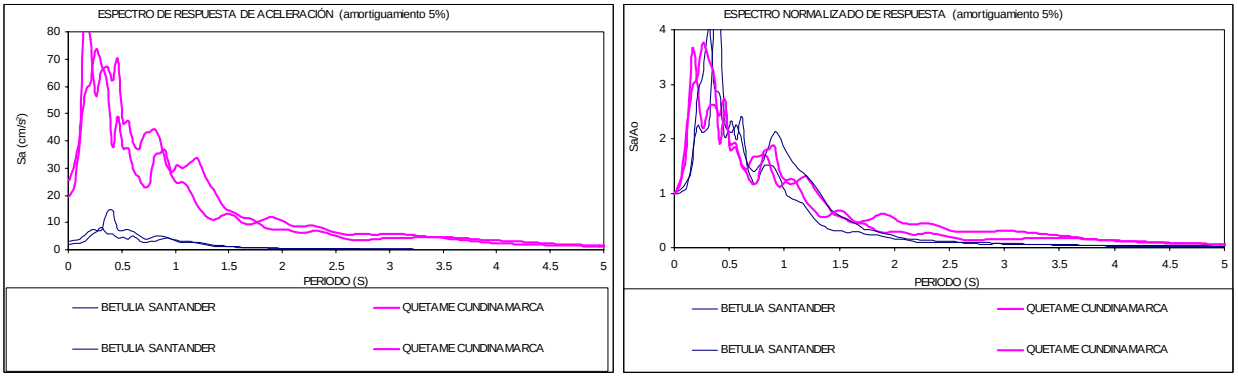



Figura 15. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CVITE

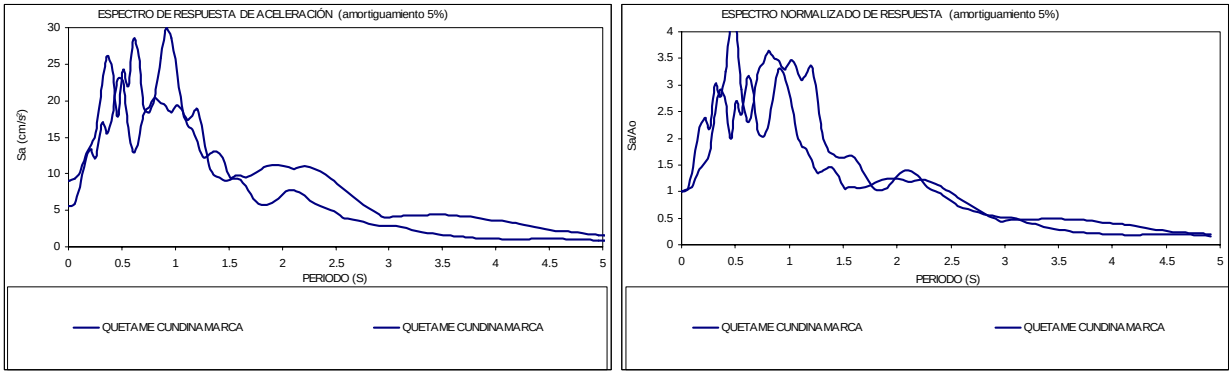



Figura 16. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CSMOR

De acuerdo con las figuras anteriores los periodos dominantes de las señales registradas están entre 0.2 y 0.4 s, a excepción de la estación CSMOR, que la señal que registró tiene un periodo dominante entre 0.5 y 1 s. Se presentan relaciones Sa/Ao hasta de 5 en las estaciones de los Cerros de Suba y de 4 para las demás estaciones.

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

La estación de CSMOR presenta al parecer menos efecto topográfico que las demás y su registro es muy similar al registrado en el Down Hole de la Escuela General Santander CGRAL del sismo de Quetame, como se ilustrará más

adelante. Se destaca de esta estación su localización pues se encuentra en los cerros del sur de la ciudad, donde la pendiente del terreno es baja a moderada y por ello el efecto topográfico puede ser poco.

### 4.1.2 Zona de Piedemonte

La zona de piedemonte corresponde a los depósitos que se encuentran entre los cerros y las zonas de planicie (lacustre y aluvial) compuesta predominantemente por suelos duros de espesores menores a 50 m. De acuerdo con esto se localizan cinco estaciones de la RAB en esta zona, de las cuales dos están en el piedemonte del norte de la ciudad, Universidad de la Salle (CUSAL) y la Colonia Escolar de Usaquén (CUSAQ); una en el piedemonte del centro en el Hospital San Juan de Dios (CDIOS) y dos en los piedemontes del sur en la Escuela de Artillería (CARTI) y en los Bomberos de Marichuela (CMARI).

De la **Figura 17** a la **Figura 21** se presentan los registros medidos en cada estación de la RAB en la zona de piedemonte.

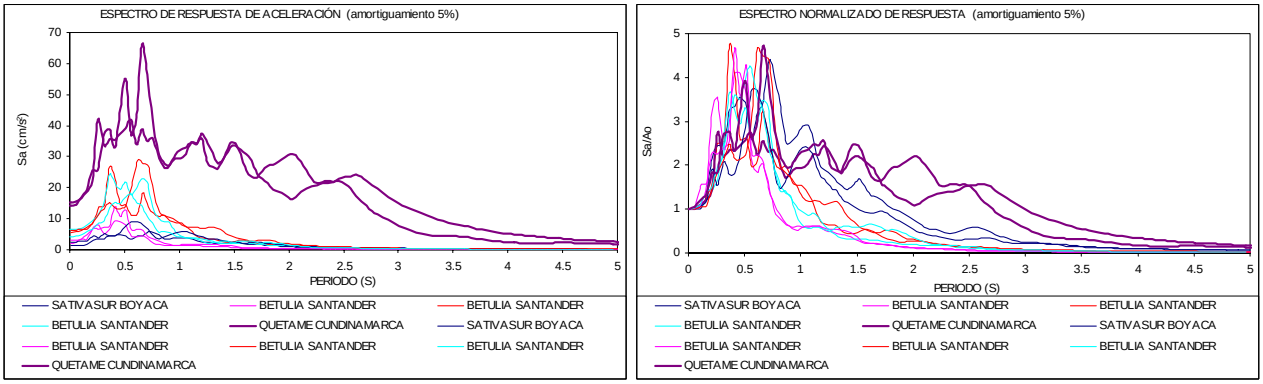



Figura 17. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUSAL

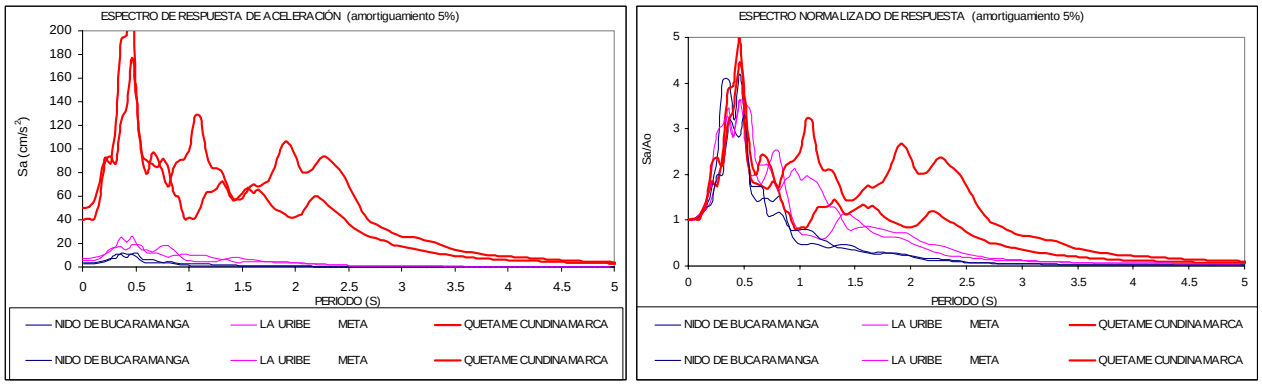



Figura 18. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUSAQ

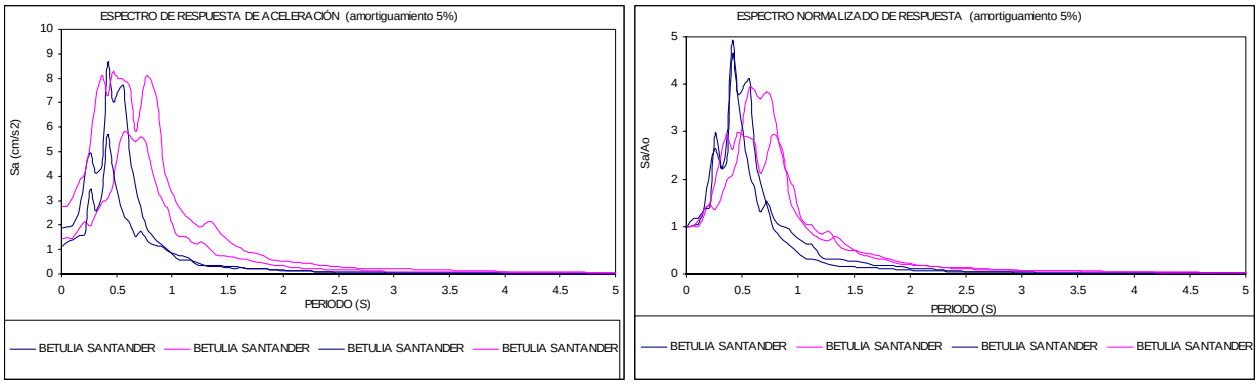



Figura 19. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CDIOS

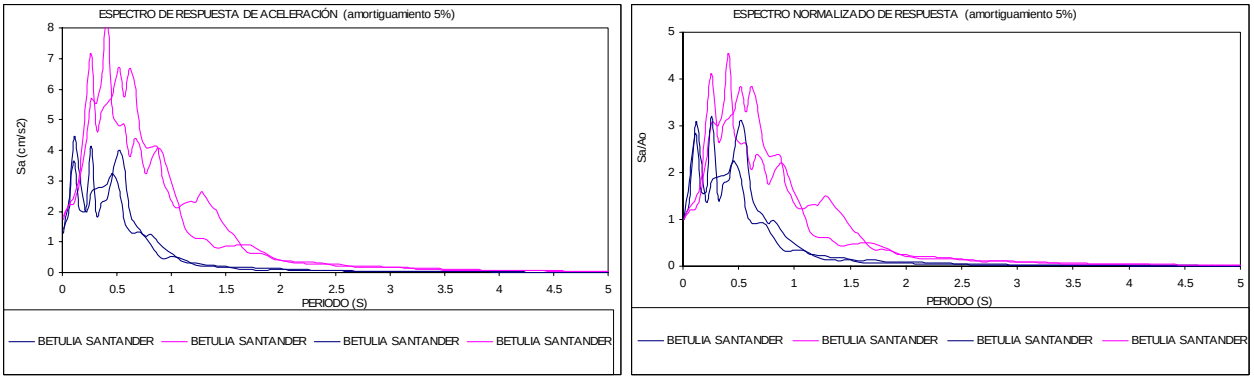



Figura 20. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CARTI

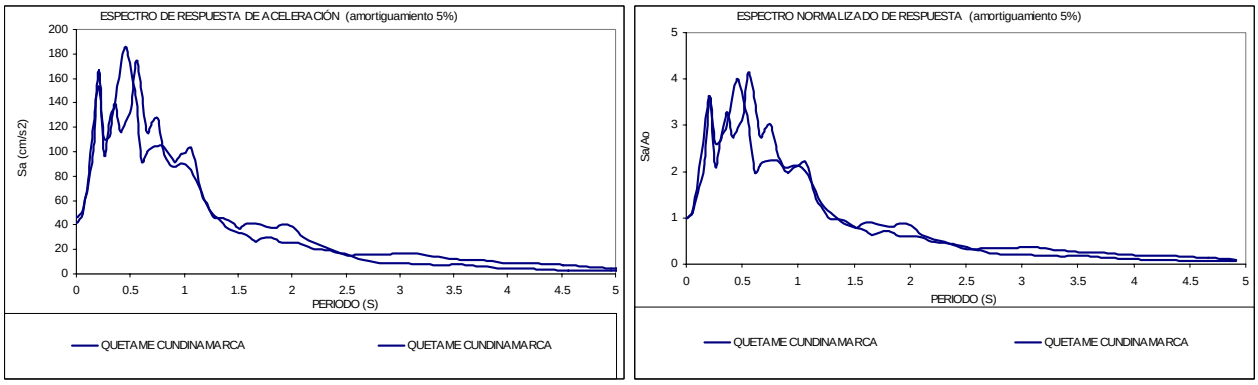



Figura 21. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CMARI

Se observa en las figuras anteriores que los periodos dominantes de las señales registradas en el piedemonte están entre 0.4 y 0.7 s con relaciones Sa/Ao hasta de 4, además las estaciones del piedemonte norte de la ciudad CUSAL y CUSAQ presentaron para el sismo de Quetame respuestas espectrales considerables en altos periodos (1.5 a 2.5 s) con relaciones Sa/Ao hasta de 2.5.

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

### 4.1.3 Zona Lacustre

La zona lacustre corresponde a los sectores compuestos por suelos de origen lacustre de espesor que varia entre 50 y 500 m, en esta zona se localizan 11 estaciones de la RAB de FOPAE y una estación de la RNAC propiedad de INGEOMINAS, distribuidas de la siguiente manera: 3 al norte entre los cerros de Suba y Orientales, Universidad Agraria (CUAGR), Escuela colombiana de ingeniería (CEING), y Banco de la Republica (CBANC); 2 al costado occidental de los cerros de Suba, en la Universidad Corpas (CORP) y el Colegio Laureano Gómez (CLAGO); y 7 estaciones entre la Cl 80 y la Cl 13 apróximadamente, en INGEOMINAS (CBOG1), Centro de Estudios del Niño (CNIÑO), Jardín Botánico (CJABO), Avianca (CAVIA), Planta de Bombeo de Fontibón (CFONT), Club el Tiempo (CTIEM) y Parque de la Florida (CFLOD). De la **Figura 22** a la **Figura 33** se presentan los registros medidos en cada estación de la RAB en la zona lacustre.

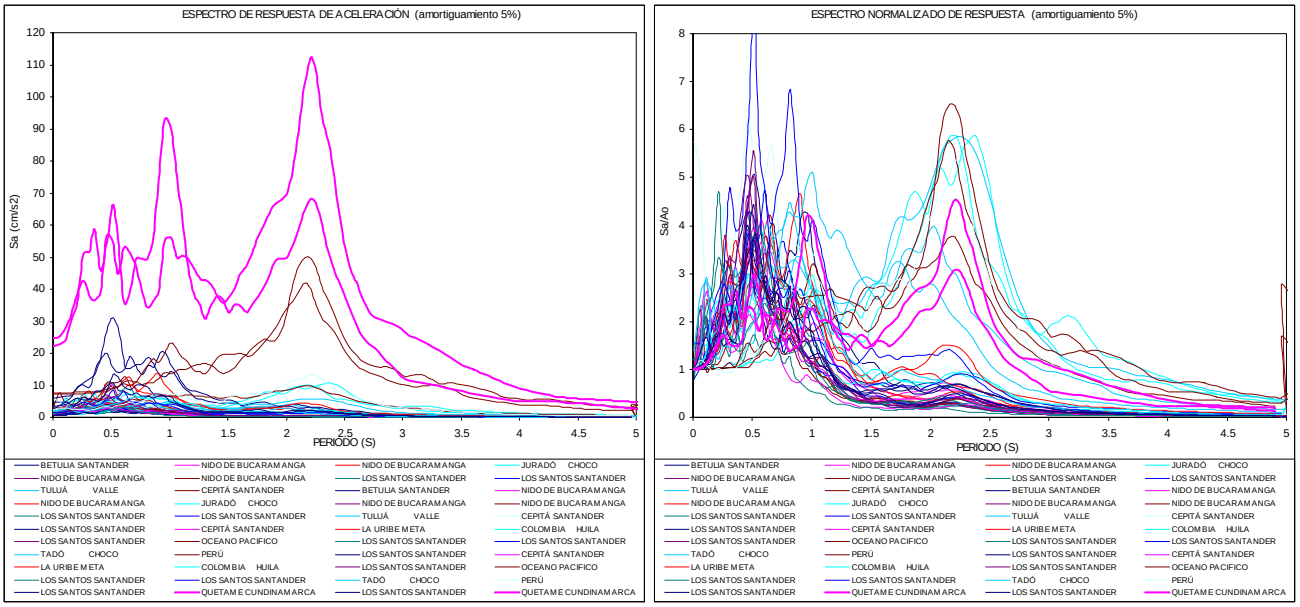



Figura 22. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUAGR Superficie

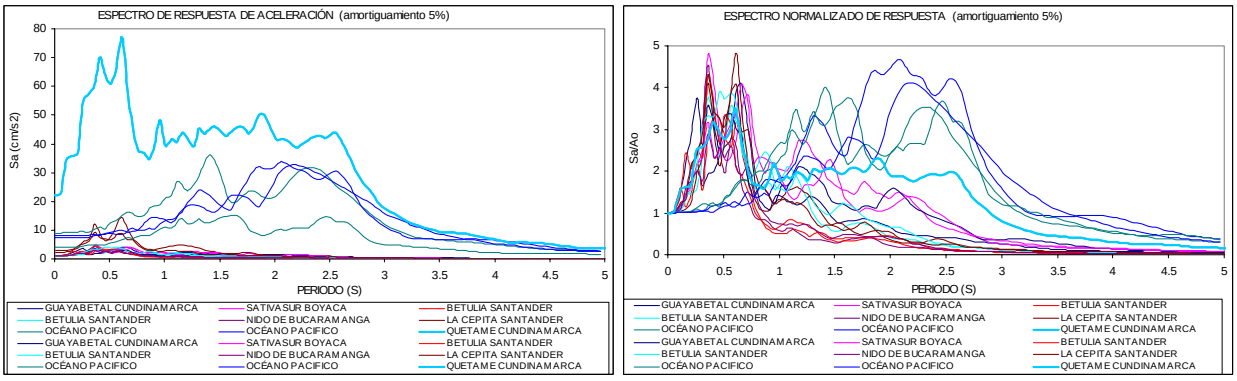



Figura 23. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CEING

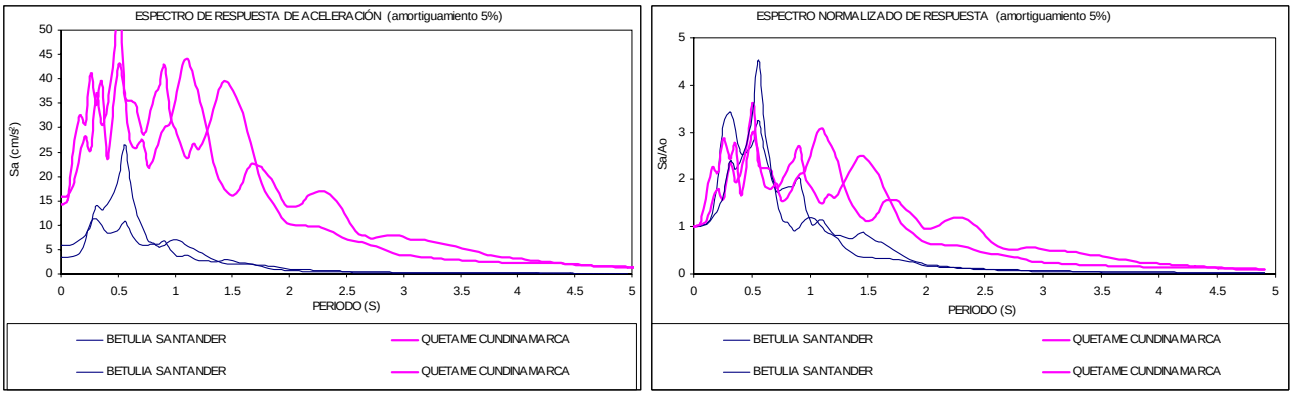



Figura 24. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBANC

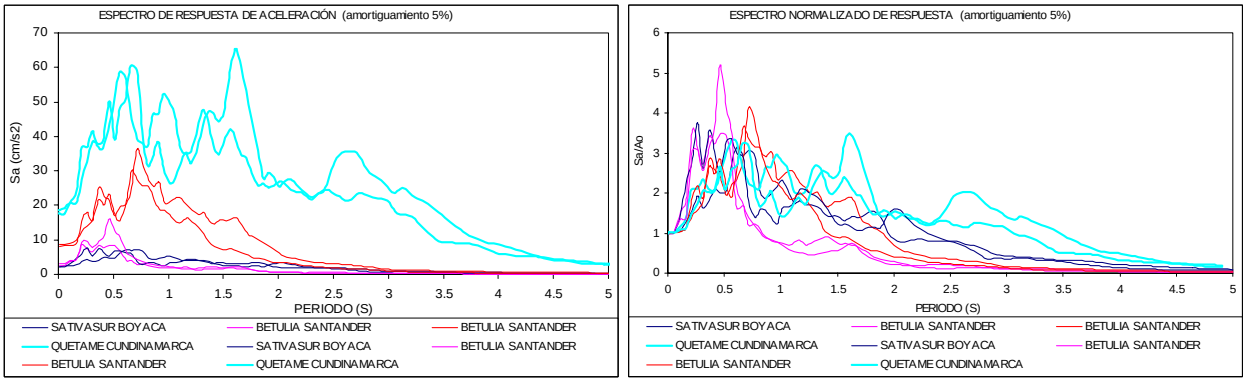



Figura 25. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCORP

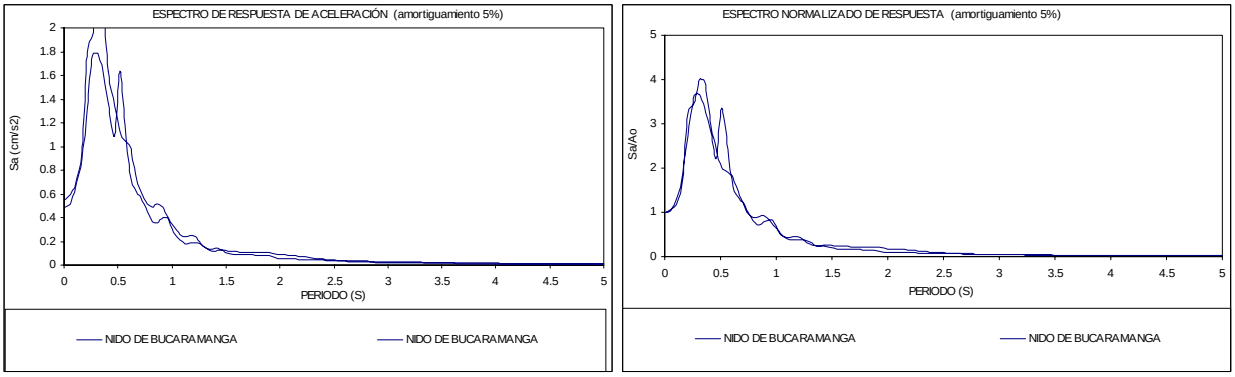



Figura 26. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CLAGO

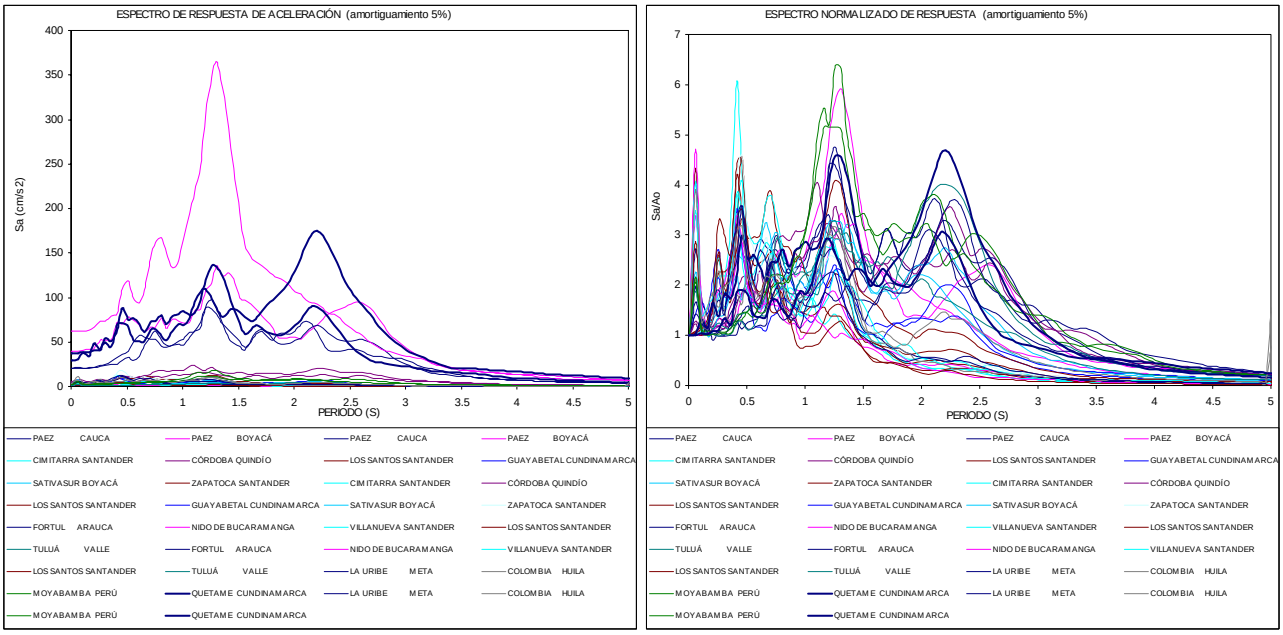



Figura 27. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOG1 Superficie

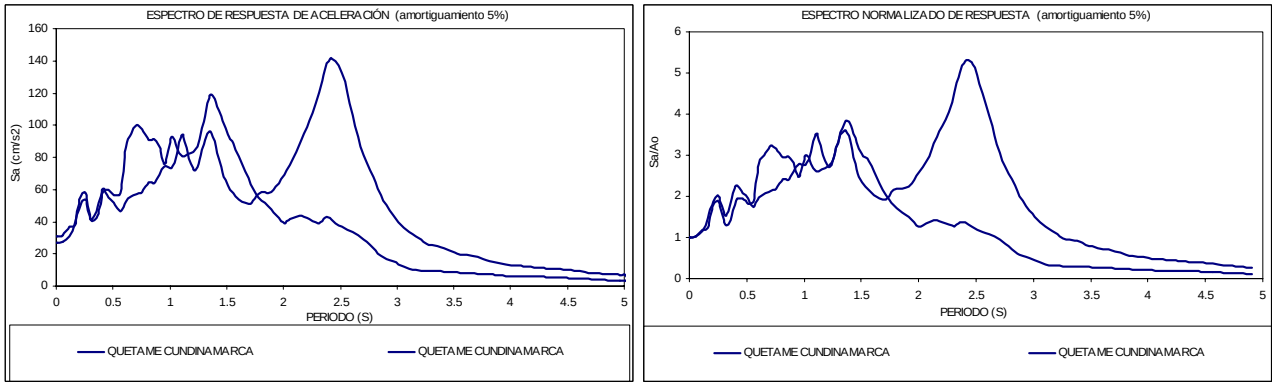



Figura 28. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CNIÑO

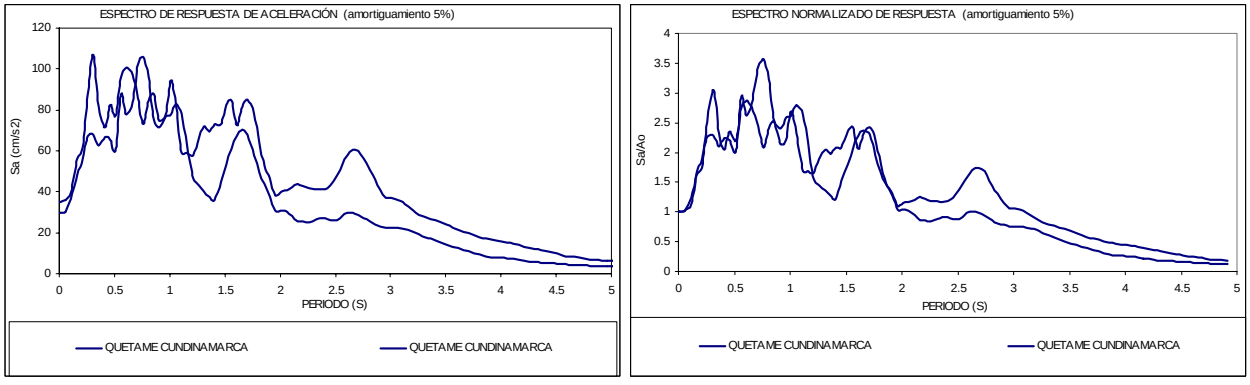



Figura 29. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CJABO

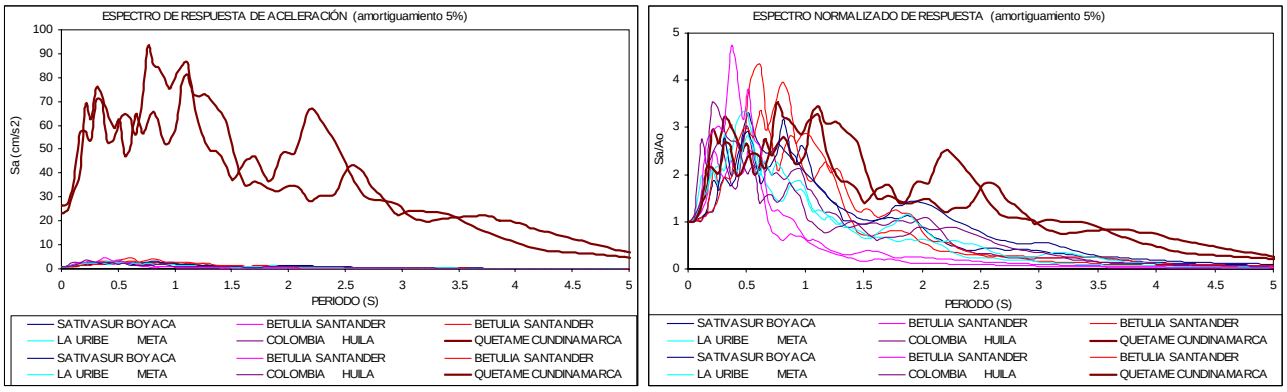



Figura 30. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CAVIA

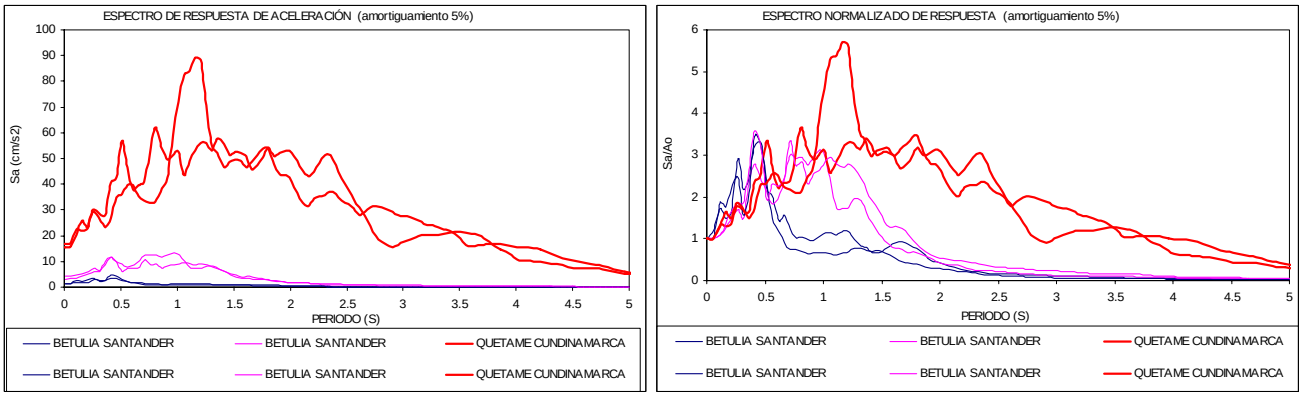



Figura 31. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CFONT

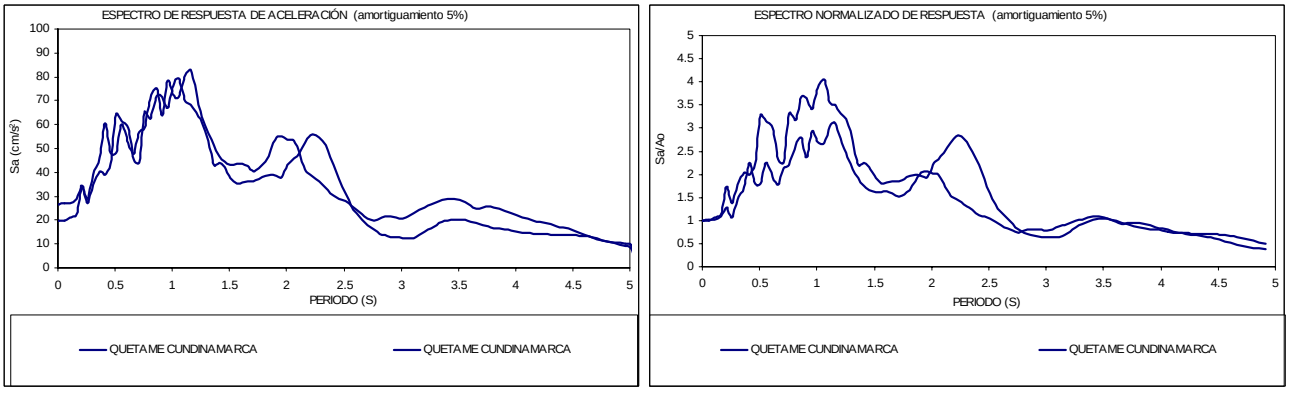



Figura 32. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTIEM

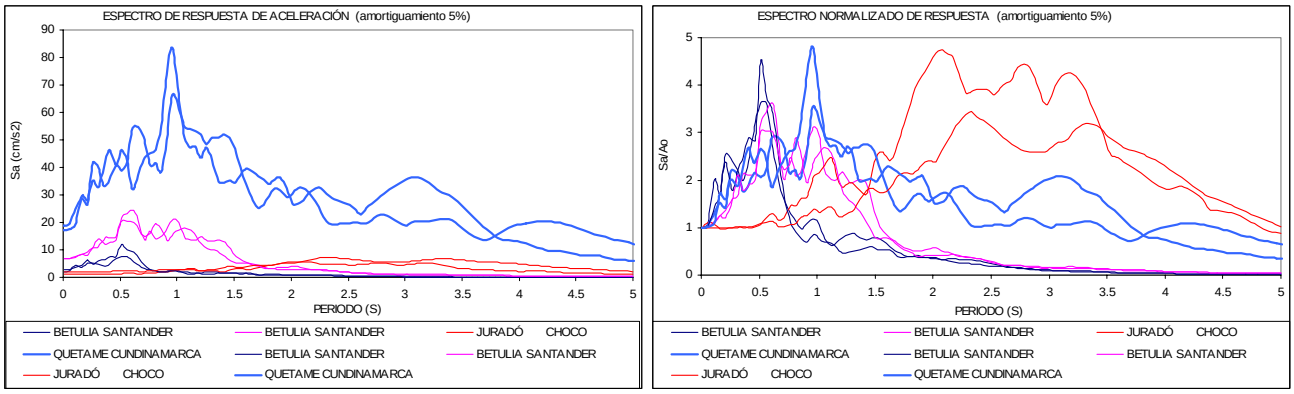



Figura 33. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CFLOD

En general, se observa en las figuras anteriores que los periodos dominantes de las señales registradas se presentan en varios segundos, los cuales son en función de la señal de entrada (magnitud y distancia) y el espesor del depósito bajo cada estación, de este modo se destacan los siguientes aspectos:

- Los sismos originados en el Nido de Bucaramanga (fuente profunda a 260 Km de la ciudad aproximadamente) presentan aceleraciones espectrales inferiores a 20 Gales a un periodo de 0.5 s. Se destaca que a pesar de que estos sismos son lejanos no presentan contenidos frecuenciales importantes a periodos altos.

- Las señales de sismos originados en la zona de subducción (Jurado, Perú y Océano Pacifico) presentan aceleraciones espectrales hasta de 50 Gales entre 2.0 y 3.0 s de periodos.

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

- Se observa igualmente que los sismos de menor energía llegan a movilizar solamente los modos secundarios de vibración natural del depósito y que los sismos de mayor energía son capaces de producir amplificaciones en los modos primarios y secundarios. En la Figura 22 se aprecia que las señales de los sismos del Nido de Bucaramanga presentan periodos dominantes de 0.5 s y las señales de las fuentes regionales, como el sismo de Quetame, presentan tres periodos dominantes, a 0.6, 1.1 y 2.3 s. En el numeral 4.1.5 se resume de manera más clara el efecto del depósito de suelo a las señales con base en las señales registradas en los Down Hole.

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

- Los periodos naturales de vibración del depósito aumentan en la medida que las estaciones se alejan de los cerros, lo que es acorde con el sentido en que se profundiza el basamento rocoso, por ejemplo la estación CBANC, cercana a los cerros de Suba, presenta un periodo natural de 1.05 s y la estación CFLOD, al lado del Río Bogotá, tiene un periodo de natural de 4.25 s. Sin embargo, la estimación del periodo natural de vibración se mostrará en el numeral 4.2.2 con base en las relaciones espectrales calculadas para el sismo de Quetame.

### 4.1.4 Zona Aluvial

La zona aluvial corresponde a los sectores compuestos por suelos de origen aluvial de espesor que varia entre 50 y 300 m, en esta zona se localizan siete estaciones de la RAB; Escuela General Santander (CGRAL), Parque Tunal (CTUNA), Escuela de Tejedores (CTEJE), Parque Timiza (CTIMI), Colegio Fernando Mazuera (CBOSA), Centro de Investigación de Tecnología de la Universidad de los Andes (CCITE) y el Col de Kennedy (CCKEN). De la **Figura 34** a la **Figura 40** se presentan los registros medidos en cada estación de la RAB en la zona aluvial.

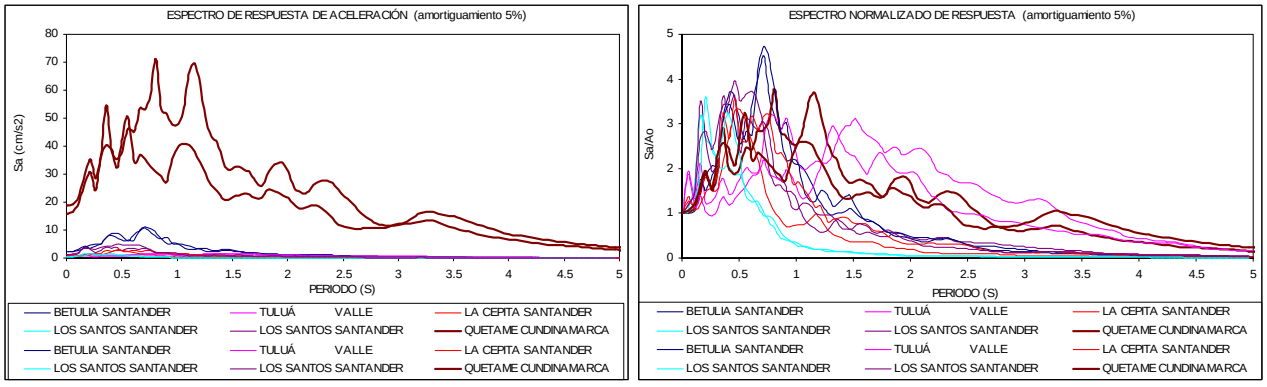



Figura 34. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CGRAL Superficie

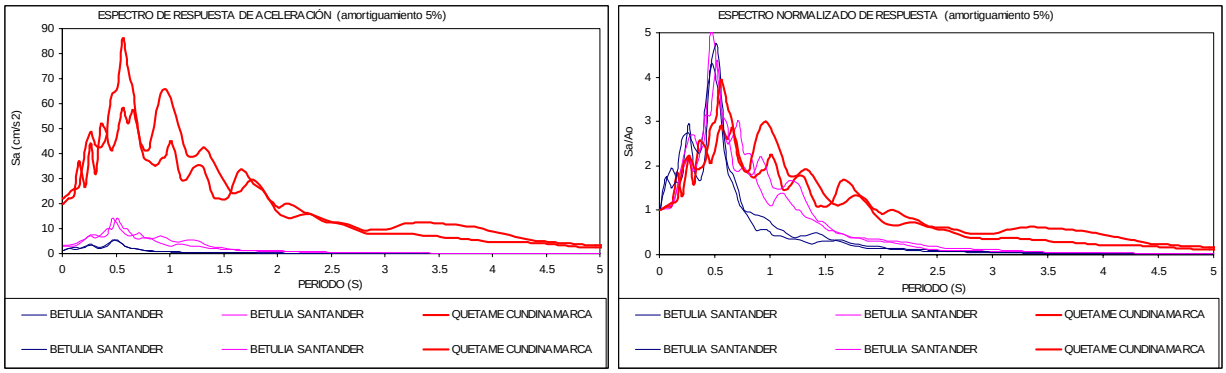



Figura 35. Espectros de respuesta y respuesta normalizado CTUNA

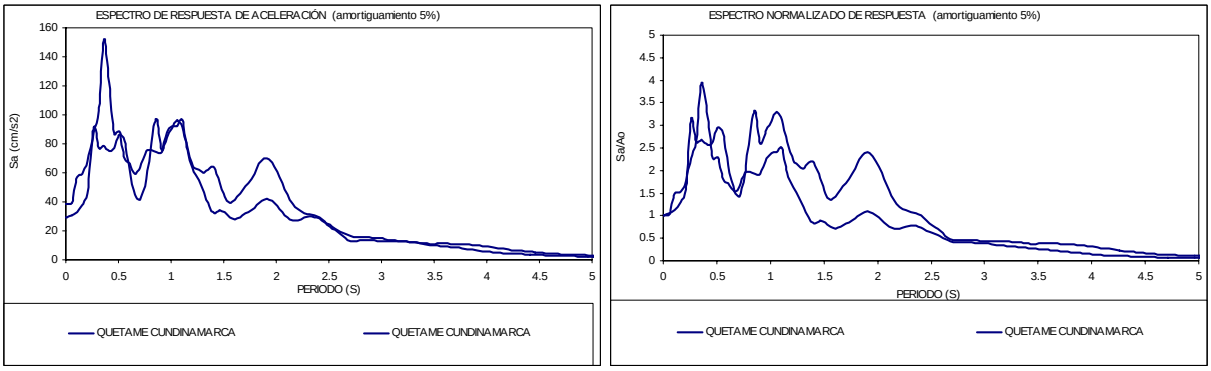



Figura 36. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTEJE

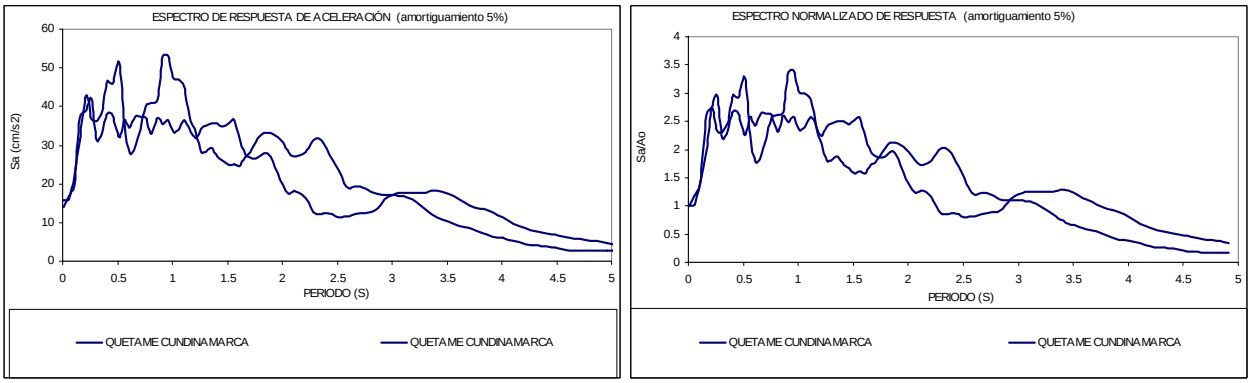



Figura 37. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CTIMI

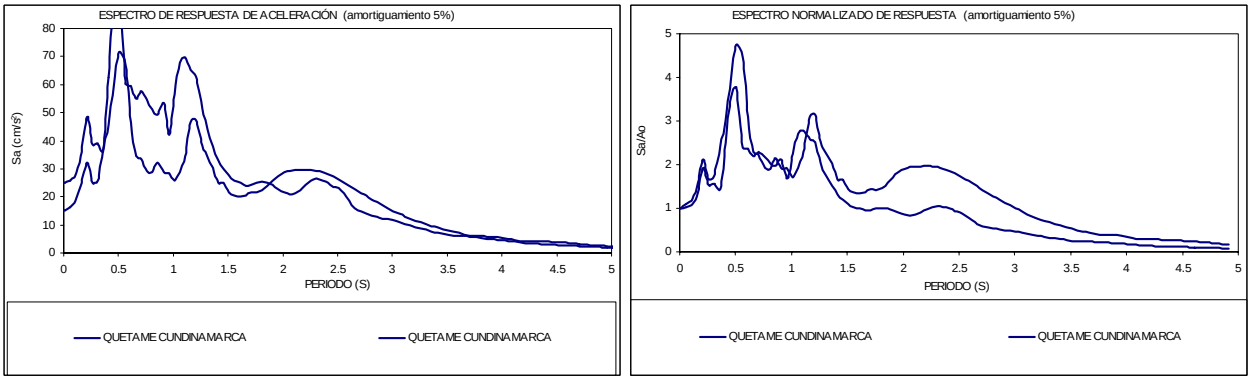



Figura 38. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOSA

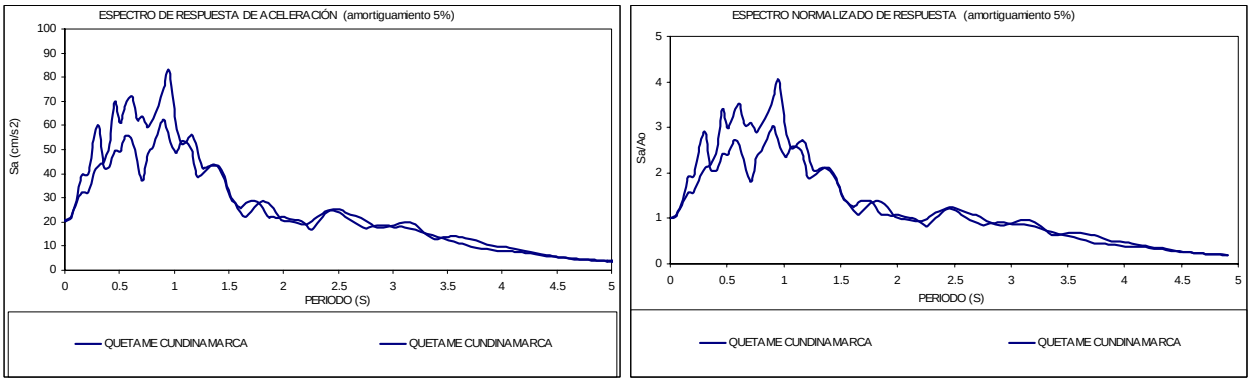



Figura 39. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCITE

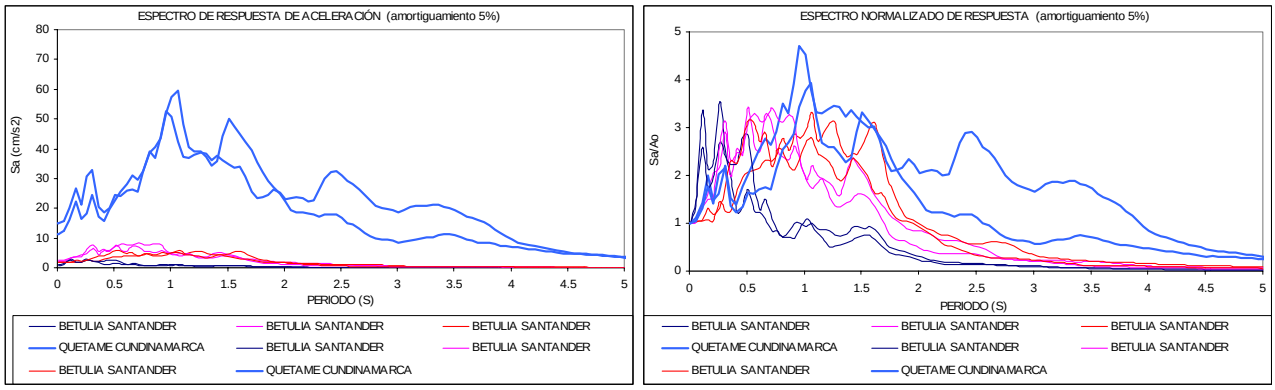



Figura 40. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CCKEN

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

En comparación con las otras zonas en las que se agruparon las estaciones, cerros, piedemonte y lacustre, los registros de la zona aluvial presentan las menores aceleraciones espectrales, lo cual puede obedecer al tipo de material predominante, limos arenosos y arenas arcillosas, que por su comportamiento dinámico degradan y amortiguan más que otros materiales.

### 4.1.5 Registros en profundidad y relaciones espectrales

Una de las bondades del diseño actual de la RAB es poder contar con registros en profundidad o denominados Down Hole, los cuales se ubicaron en tres estaciones (dos de la RAB y una de la RNAC) de manera tal que se abarcara los sectores norte, centro y sur de la ciudad. Estos sensores se localizaron en el contacto con el basamento rocoso con el fin de estudiar el comportamiento sísmico de los depósitos, en la Tabla 7 se resumen las estaciones con Down Hole.

| Estación | Nombre | Zona | Profundidad del acelerógrafo |
|---|---|---|---|
| CUAGR | Uniagraria | Lacustre | 130 m |
| CBOG1* | Ingeominas | Lacustre | 180 m |
| CGRAL | Esc. General Santander | Aluvial | 100 m |

*CBOG1: propiedad de INGEOMINAS.

Tabla 7. Estaciones con Down Hole

Es importante mencionar que los registros de los Down Hole corresponden a una condición de estados de esfuerzos confinada, por lo cual en el cálculo de las relaciones espectrales se debe multiplicar por dos estas señales, para tener en cuenta el efecto del confinamiento y así aproximarlo a una condición de superficie o campo libre.

En la Figura 41 se presentan los espectros de respuesta y respuestas normalizadas en el Down Hole y en la Figura 42 se muestran las relaciones espectrales calculadas a partir de las mediciones en superficie y profundidad de los registrados de la estación de Uniagraria (CUAGR).

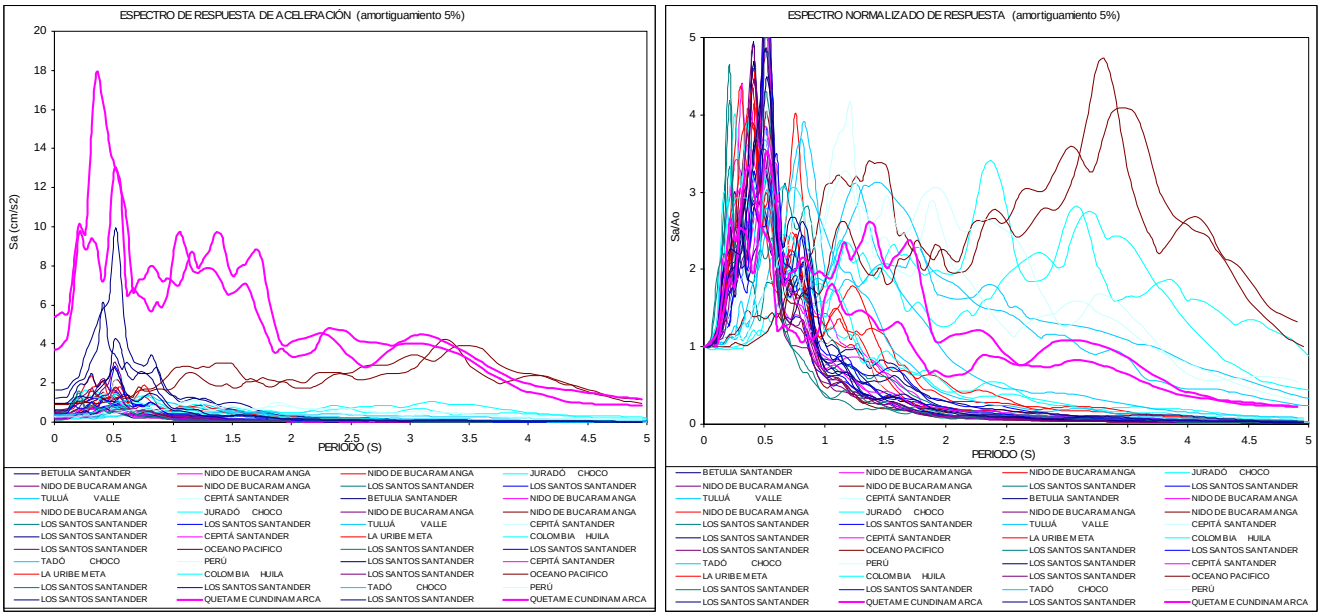



Figura 41. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CUAGR Down Hole

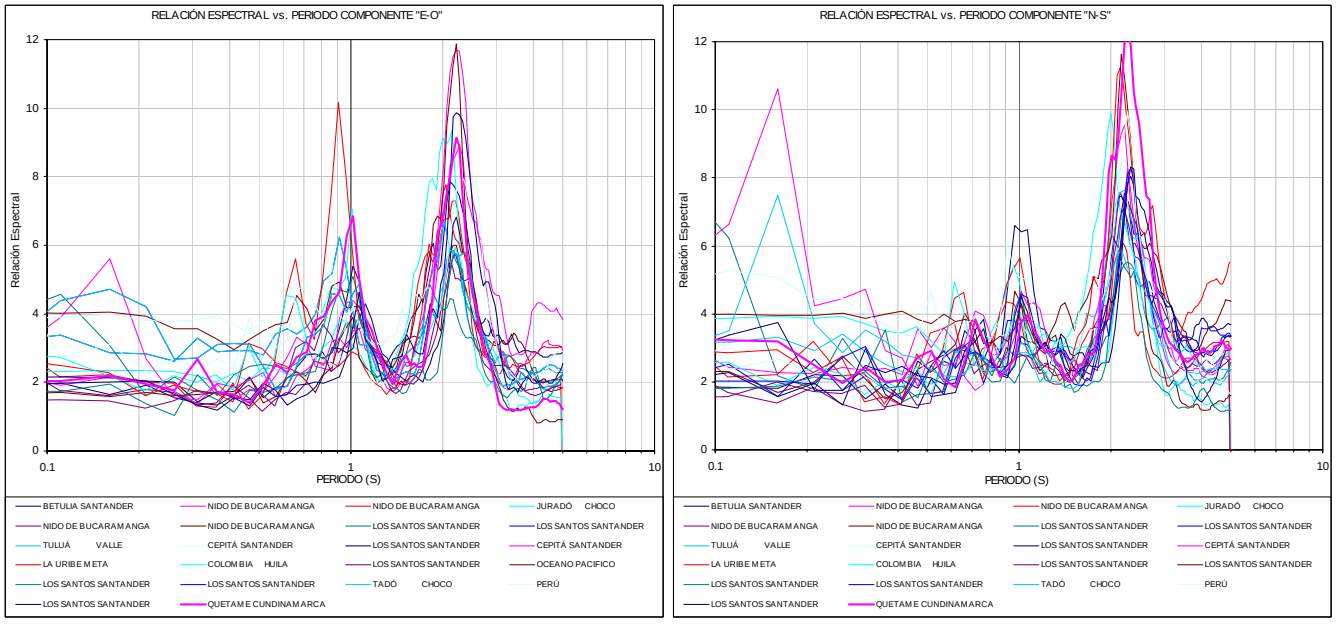



Figura 42. Relaciones espectrales CUAGR

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

En la **Figura 43** se presentan los espectros de respuesta y respuestas normalizadas en el Down Hole y en la **Figura 44** se muestran las relaciones espectrales calculadas a partir de las mediciones en superficie y profundidad de los registrados de la estación de Ingeominas (CBOG1).

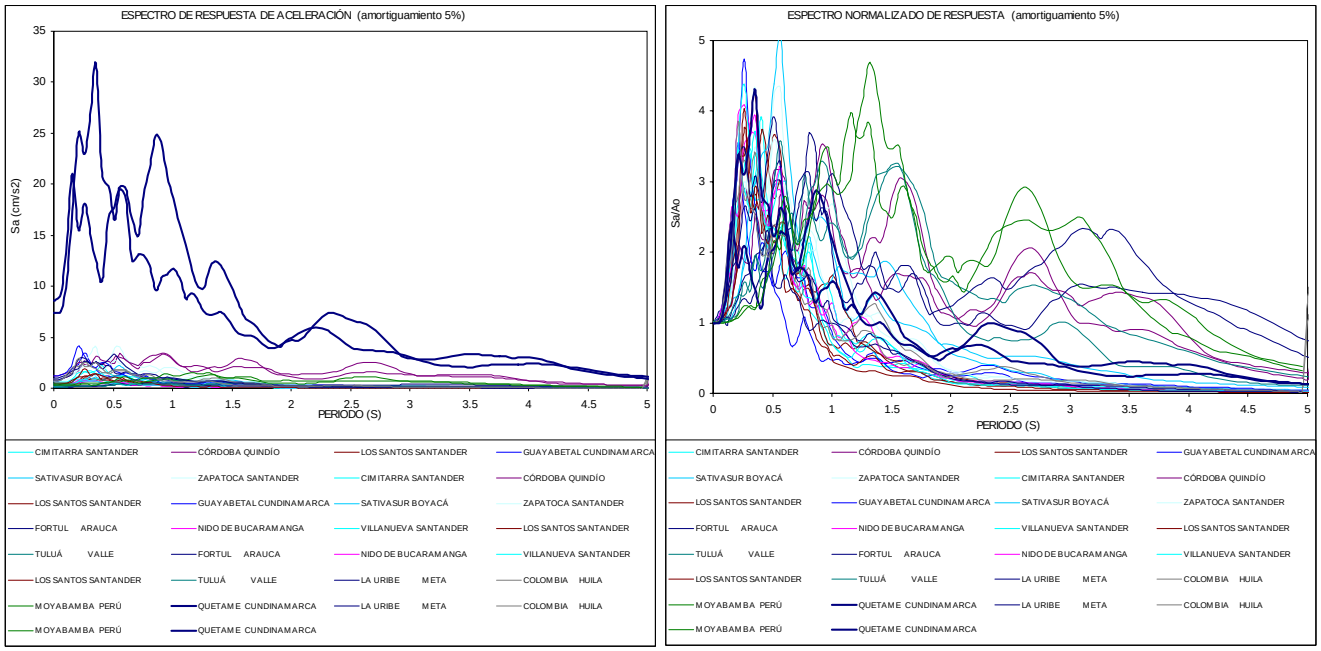



Figura 43. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CBOG1 Down Hole

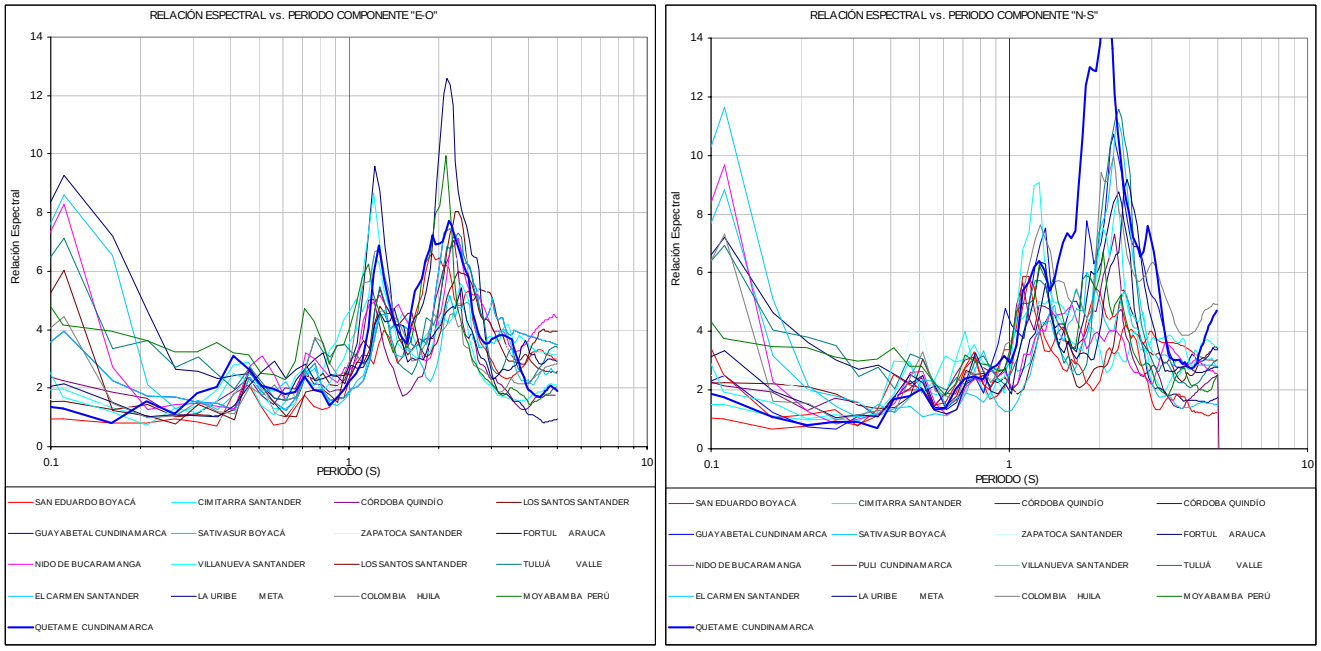



Figura 44. Relaciones espectrales CBOG1

Similar a la estación CUAGR es el comportamiento de los depósitos en CBOG1 presentando grandes variaciones en los niveles de amplificación, pero se identifican claramente los periodos naturales de vibración del suelo en 2.3 s con amplificaciones entre 6 y 12, en 1.15 s con amplificaciones entre 4 y 8 y en 0.75 y 0.45 s con amplificaciones hasta de 3 veces. A un periodo de 0.1 s se identifica amplificaciones importantes, pero al revisar cuidadosamente los registros se encontró que se trata de ruido en la señal, no es la respuesta del suelo como se observa en las señales más recientes.

Los registrados de la estación de La Escuela General Santander (CGRAL) se presentan en la Figura 45 en términos de espectros de respuesta y respuestas normalizadas en el Down Hole y en la Figura 46 se muestran las relaciones espectrales calculadas a partir de las mediciones en superficie y profundidad.

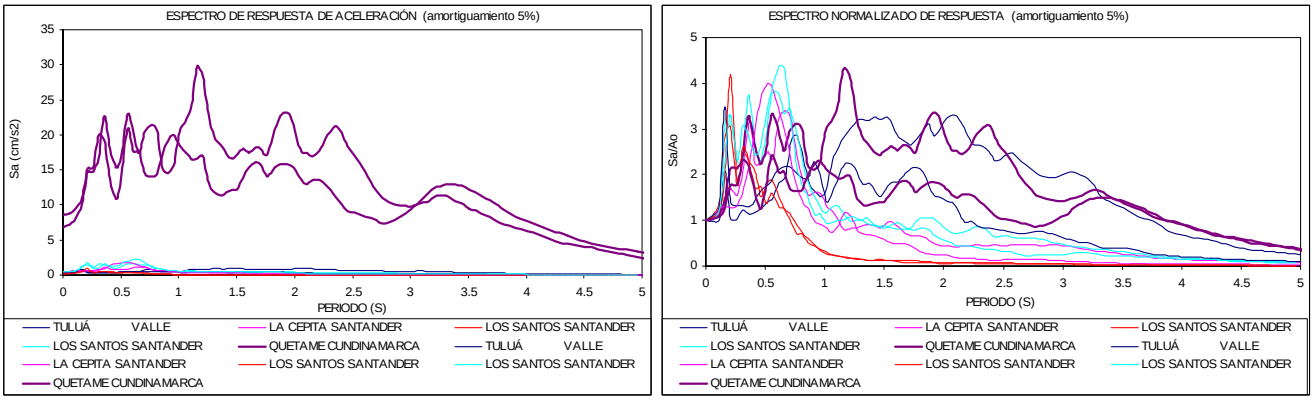



Figura 45. Espectros de respuesta y respuestas normalizadas CGRAL Down Hole.

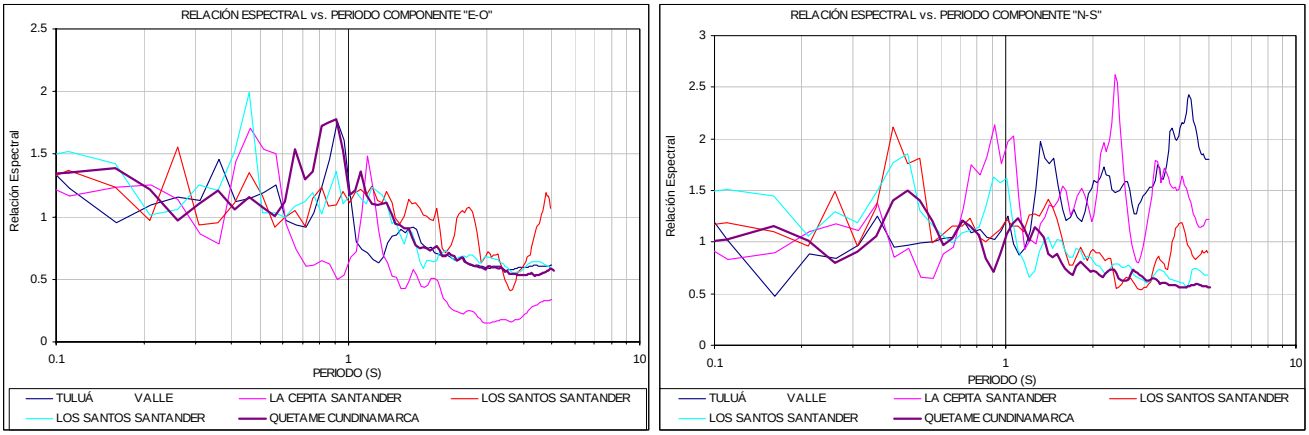



Figura 46. Relaciones espectrales CGRAL

Las relaciones espectrales calculadas de la estación CGRAL presentan menor dispersión que en las otras estaciones analizadas, se distinguen dos periodos naturales de vibración, uno entre 0.9 y 1 s y un segundo modo a 0.45 s, con amplificaciones de 1.5 a 2 veces. Se destaca que para periodos altos (mayor a 1 s) la mayoría de los registros se presentaron de-amplificaciones (Relación espectral menor a 1). Sin embargo, el hecho que no se distinga claramente un periodo dominante en la respuesta espectral de este sitio y que la forma de los espectros de respuesta en el Down Hole, hacen pensar que el sensor no se encuentra exactamente en el contacto con el basamento rocoso, luego los resultados presentados de esta estación merecen una revisión más detallada.

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

## 4.2 ANÁLISIS DE SISMOS DESTACADOS

Como se mencionó en el numeral 2.3 se ha registrado a la fecha 33 eventos sísmicos en la RAB, en la Figura 47 se resumen los valores de aceleración máxima registrada en superficie en cada evento, se puede apreciar que la mayoría de eventos han tenido aceleraciones inferiores a 5 Gales, algunos con aceleraciones entre 5 y 10 Gales y el evento del 24 de mayo de 2008 en Quetame presentó una aceleración máxima del orden de 50 Gales (incluyendo efectos de sitio).

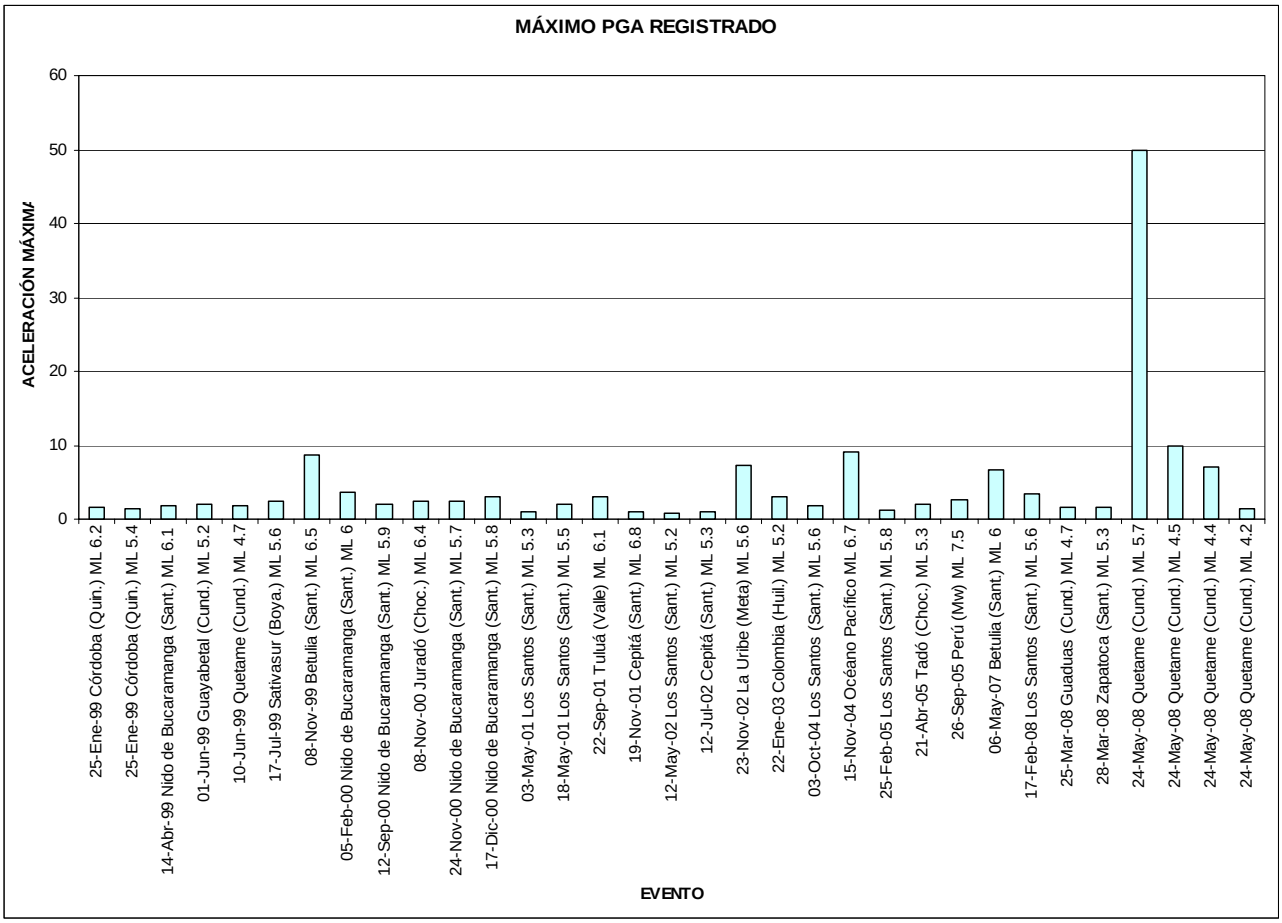



Figura 47. Aceleraciones máximas registradas en superficie por evento sísmico

A continuación se presentan los análisis realizados para los dos eventos sísmicos con mayor número de registros obtenidos por la RAB de dos fuentes sismogénicas, Betulia Santander en el día 08/11/99 y Quetame Cundinamarca el día 24/05/08.

### 4.2.1 Evento del día 8 de noviembre de 1999 Betulia, Santander

#### 4.2.1.1 Características del evento:

Fecha: 08 – Nov – 1999
Hora UT: 05:52
Magnitud ML: 6.5
Profundidad: 160 Km
Epicentro: Latitud 6.92º N Longitud -73.18º E
Estaciones de registro (17): CEING, CUSAL, CCORP, CUAGR, CPSUB, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CBART, CDIOS, CTUNA, CARTI, CVITE, CGRAL, CRADI* y CBOG1**.
*Cambio a CCKEN, **Propiedad de INGEOMINAS

#### 4.2.1.2 Aceleraciones máximas registradas en superficie

En la Tabla 8 se resumen los valores de aceleraciones máximas registradas en las estaciones para cada componente del movimiento y en la Figura 48 se presenta su correspondiente distribución espacial.

| CODIGO | NOMBRE | Amáx E-O | Amáx V | Amáx N-S |
|---|---|---|---|---|
| CEING | ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA | 8.67 | 1.95 | 6.99 |
| CUSAL | UNIVERSIDAD DE LA SALLE | 5.62 | 4.8 | 6.15 |
| CCORP | UNIVERSIDAD CORPAS | 8.77 | 2.13 | 8.17 |
| CUAGR | UNIAGRARIA Superficie | 6.17 | 2.65 | 4.69 |
| CUAGR | UNIAGRARIA Down hole | 1.64 | 0.84 | 1.24 |
| CPSUB | ACADEMIA DE POLICIA | 3.29 | 1.53 | 2.91 |
| CTVCA | T.V. CABLE | 4.06 | 1.81 | 3.58 |
| CFLOD | PARQUE LA FLORIDA | 6.77 | 1.52 | 6.7 |
| CAVIA | AVIANCA | 5.81 | 1.28 | 6.21 |
| CFONT | PLANTA DE BOMBEO FONTIBON | 4.22 | 1.41 | 3.2 |
| CBART | COLEGIO SAN BARTOLOME | 1.83 | 0.77 | 1.27 |
| CDIOS | HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS | 2.51 | 1.28 | 2.75 |
| CTUNA | PARQUE TUNAL | 3.19 | 1.27 | 2.76 |
| CARTI | ESCUELA DE ARTILLERIA | 1.84 | 1.66 | 1.74 |
| CVITE | TANQUES DE VITELMA | 3.27 | 0.94 | 2.02 |
| CGRAL | ESCUELA GENERAL SANTANDER Superficie | 2.4 | 2.03 | 2.34 |
| CCKEN | COL-KENNEDY (anterior CRADI) | 2.21 | 1.46 | 2.42 |
| CBOG1 | INGEOMINAS Superficie | 3.01 | 1.33 | 3.83 |
| CBOG1 | INGEOMINAS Down Hole | 0.94 | 0.61 | 0.76 |

Tabla 8. Valores de aceleración máxima registrada sismo de Betulia 08/11/1999

A partir de los datos registrados del sismo de Betulia de 1999 se tiene que en la zona lacustre (norte y nor-occidente de la ciudad) se presentaron las mayores amplificaciones, a diferencia de los sectores aluviales (sur y sur occidente de la ciudad). Se aprecia igualmente la atenuación de la onda entre Down hole de Uniagraria e Ingeominas siguiendo la dirección de llegada de la onda proveniente del norte del país.

En cuanto a los periodos naturales de vibración, la energía del evento fue muy baja como para determinarlos claramente, puesto que se aprecia en los espectros de respuesta de los registros el dominio de periodos secundarios de vibración o el periodo dominante de la señal original, por lo que no se identificó con claridad el periodo fundamental de los depósitos.

### 4.2.2 Evento de día 24 de mayo de 2008 Quetame Cundinamarca

#### 4.2.2.1 Características del evento:

Fecha: 24 – May – 2008
Hora UT: 19:20
Magnitud ML: 5.7
Profundidad: Superficial
Epicentro: Latitud 4.399º N Longitud -73.814º E
Estaciones de registro (29): CEING, CUSAL, CBOSA, CCORP, CUAGR, CUSAQ, CESCA, CBANC, CTVCA, CFLOD, CAVIA, CFONT, CNIÑO, CJABO, CBART, CUNMA, CCITE, CTIEM, CTIMI, CTUNA, CMARI, CSMOR, CTEJE, CVITE, CGRAL, CCKEN, CBOG1*, CBOG2* y CREAC*.
*Propiedad de INGEOMINAS

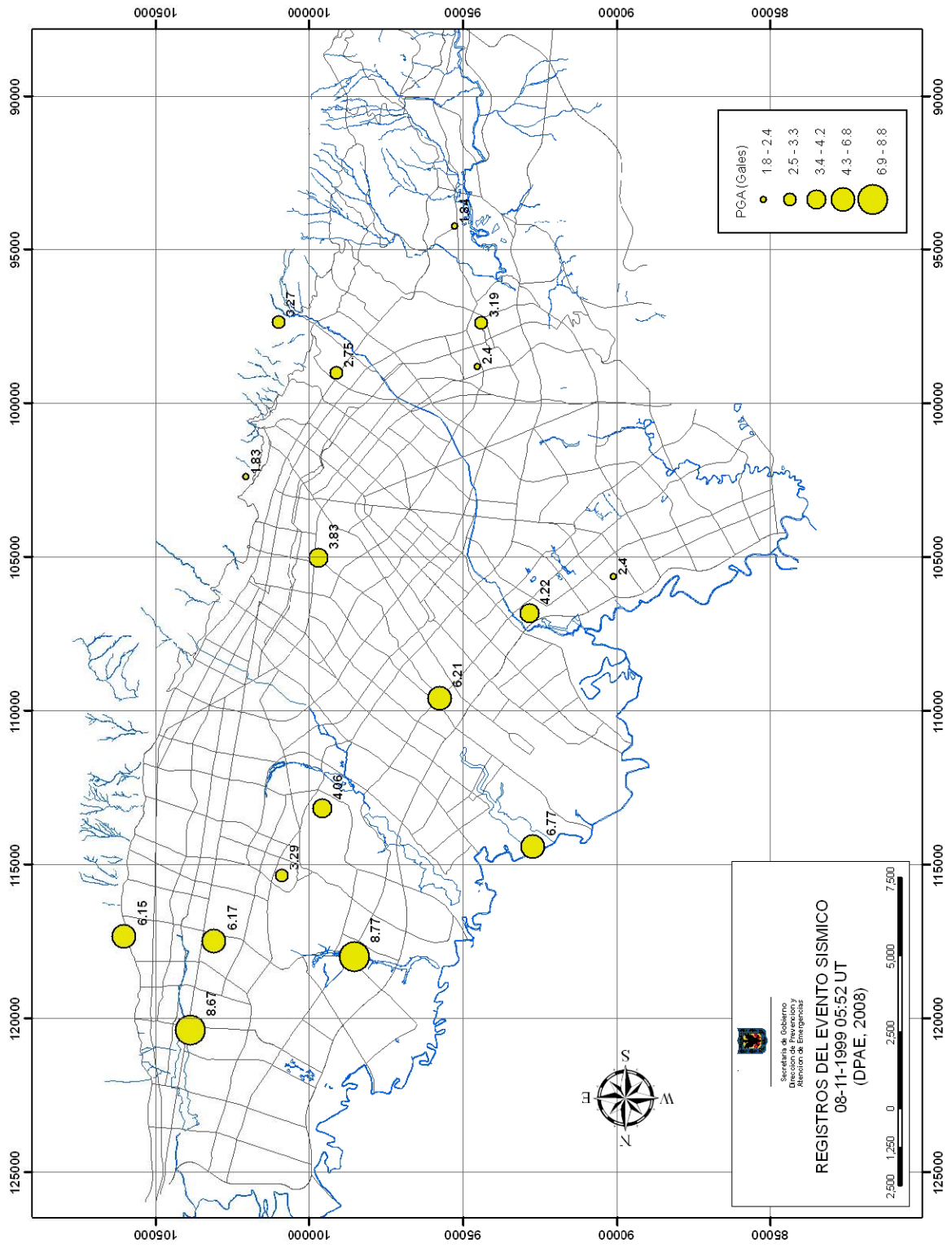



Figura 48. Distribución de aceleraciones máximas registradas sismo de Betulia 08/11/1999

En la Figura 49 se presenta la localización del epicentro del evento junto con las réplicas, la distancia aproximada a las estaciones ubicadas en cerros orientales estuvo entre 35 y 40 km, a la estación de Ingeominas 42 km y a la estación de Parque la Florida 50 km.

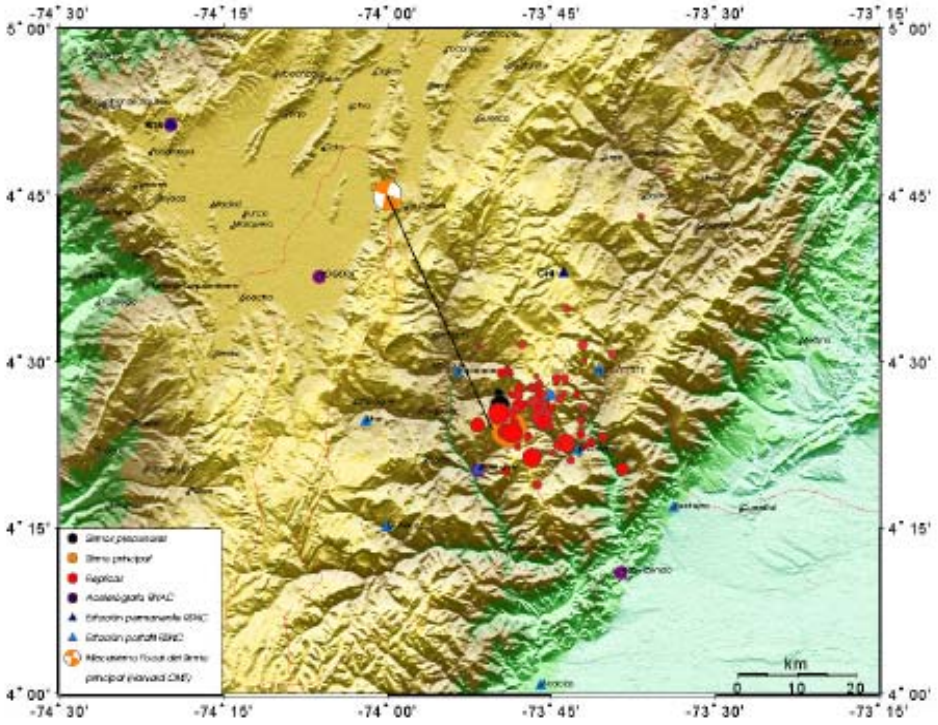



Figura 49. Localización del epicentro y replicas del sismo de Quetame (Ingeominas, 2008)

4.2.2.2 Cálculo de la componente rotada

Para los análisis posteriores es necesario calcular la componente del movimiento en el sentido transversal, es decir en la dirección de mayor contenido de ondas de corte, que son las ondas importantes en la evaluación de la respuesta de sitio y nos simplifica los análisis de dos componentes, EO y NS, a una sola que se denominara SH.

El procedimiento para la obtención de la componente rotada consistió en calcular el ángulo de rotación para el cual la resultante del movimiento tienen la mayor Intensidad de Arias, para esta componente se calcularon los parámetros sísmicos y espectros que se presentan a continuación.

4.2.2.3 Aceleraciones máximas y duración de la fase intensa registradas en superficie

A partir de cada uno de los registros obtenidos de la componente de ondas de corte, SH, se cálculo los valores de aceleraciones máximas, intensidad de Arias y Duración de la fase intensa. Los valores respectivos de cada estación se resumen en la Tabla 9.

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

* Duración cortada por el registro

Tabla 9. Parámetros sísmicos de los registros del sismo de Quetame en Bogotá, componente SH

A partir de los datos se proyecto la distribución espacial de las aceleraciones máximas registradas en la ciudad, para de manera aproximada estimar el mapa de iso-aceleraciones como se ilustra en la Figura 50. La variación marcada de las aceleraciones máximas se debe entender como una tendencia general por la poca cantidad de puntos de control y las condiciones heterogéneas de contorno.

En la Figura 51 se presenta la variación de la duración de la fase intensa medida en cada una de las estaciones de la RAB. Algunos datos fueron corregidos por que estaban las señales cortadas por lo que se estimó la duración con base en los registros cercanos de la misma zona.

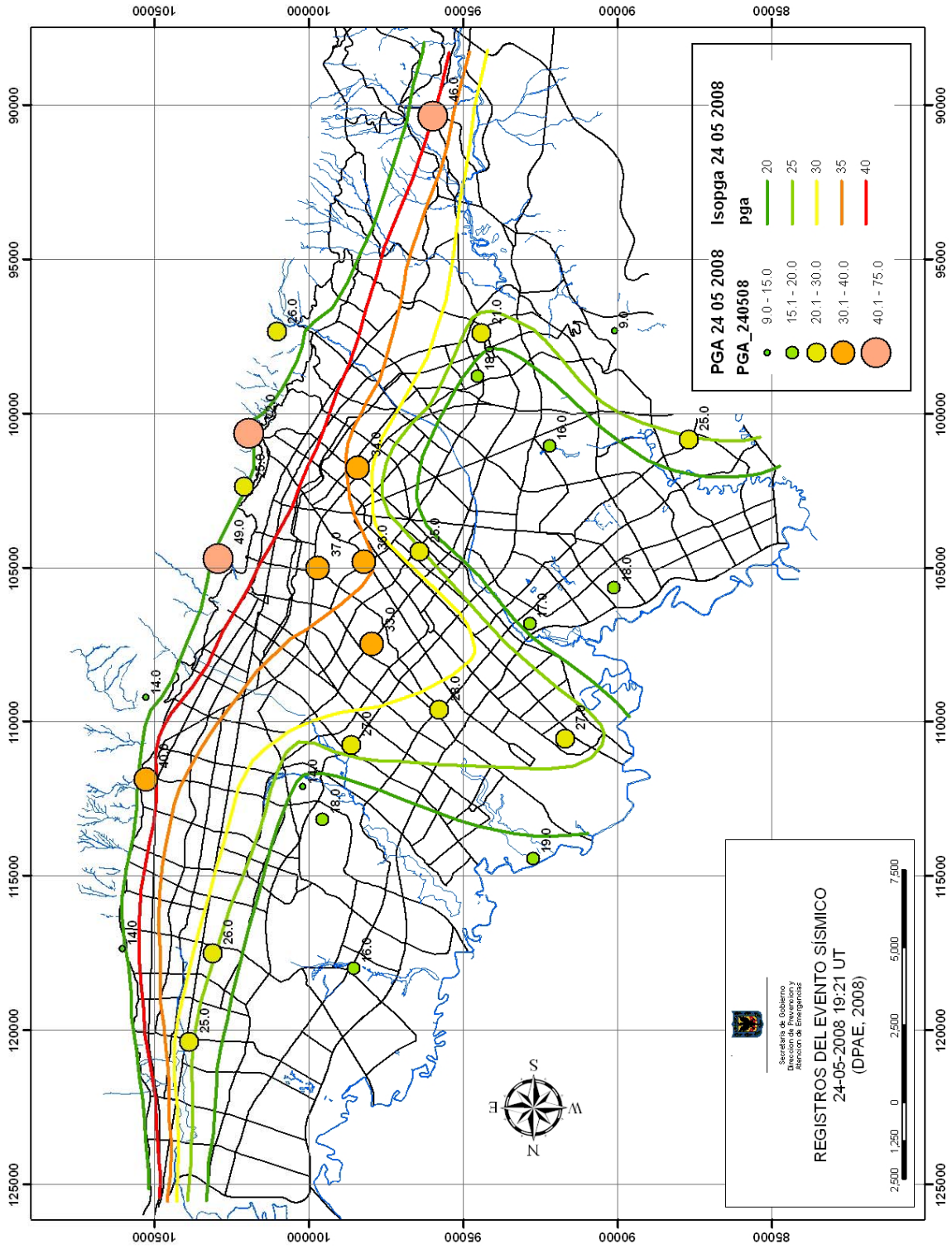



Figura 50. Distribución de aceleraciones máximas registradas sismo de Quetame 24/05/2008

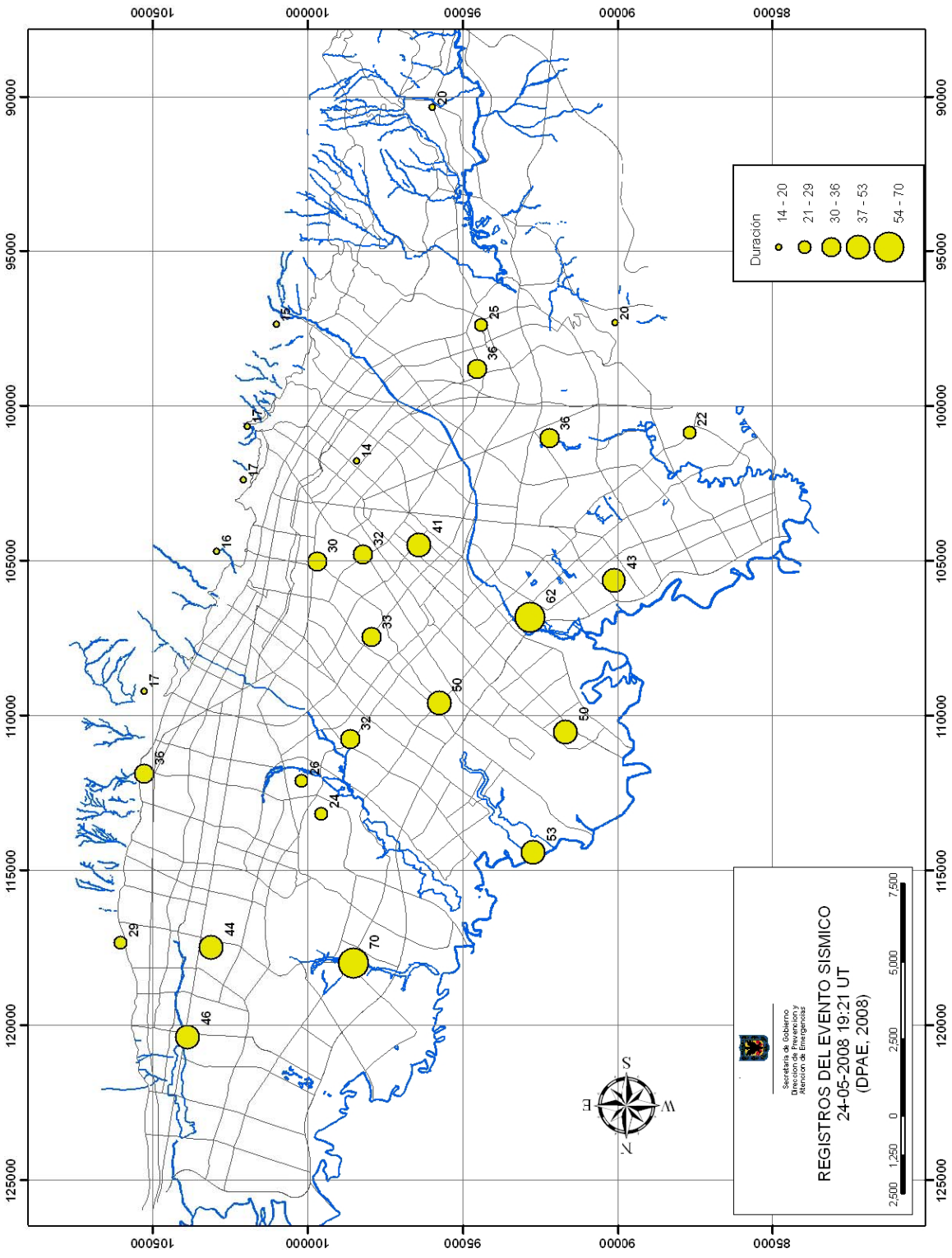



Figura 51. Distribución de la duración de la fase intensa del sismo de Quetame 24/05/2008

#### 4.2.2.4 Espectros de respuesta y relaciones espectrales

A continuación se presentan en la Figura 52 los espectros de respuesta de los registros obtenidos en roca profunda Down Hole y se comparan con los de roca en superficie (multiplicando por dos los registros Down Hole).

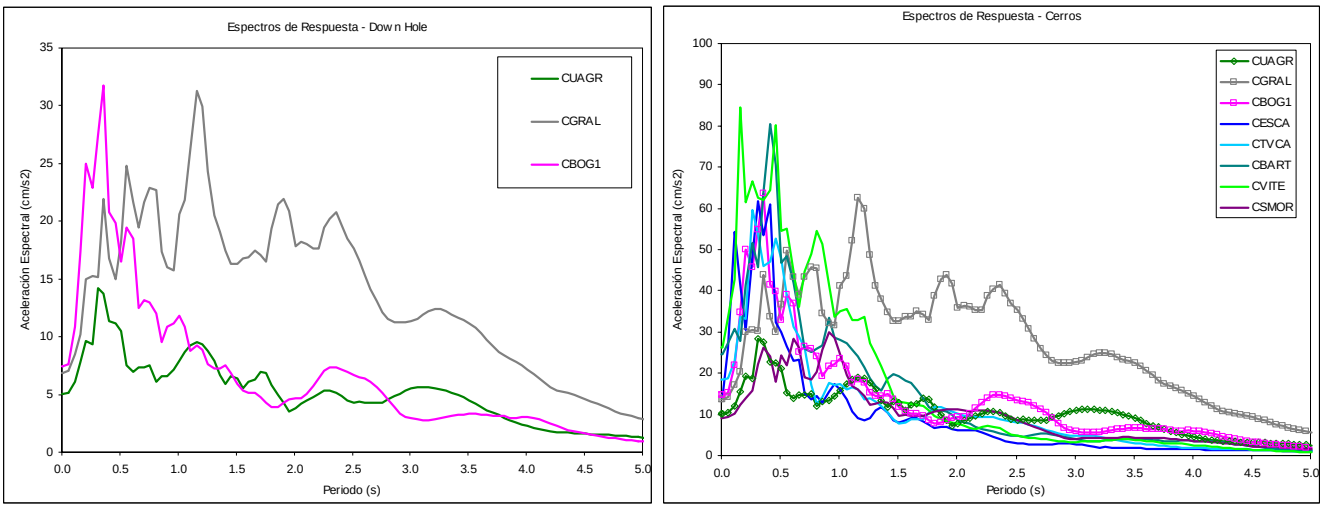



Figura 52. Espectros de respuesta de roca en Down Hole y Superficie

Se aprecia en la figura anterior que las señales tienen un periodo dominante de 0.35 s en CBOG1 y CUAGR, sin embargo en CGRAL el periodo dominante es 1.0 s, se destaca que el contenido frecuencial para periodos altos es importante. En comparación con los registros de superficie se aprecia que en la mayoría de las estaciones hubo amplificación en los periodos bajos de la señal por efecto topográfico y de-amplificación de los periodos altos.

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

Se aprecia que la estación CSMOR registró las menores aceleraciones y su contenido frecuencial difiere de las demás en superficie rocosa, pero se asemeja a los registros de Down Hole. Aunque este es el primer registro de esa estación es posible que las condiciones de sitio en las que se encuentren sirvan para tenerla en cuenta como estación de referencia en roca sin efectos de sitio.

Para todos los registros en superficie del sismo de Quetame se calcularon los espectros de respuesta y se estimaron de manera aproximada las relaciones espectrales entre la respuesta en superficie y el registro de Down Hole mas cercano, básicamente la zona norte de la ciudad trabajó con el registro de CUAGR, el centro y sur de la ciudad con el registro de CBOG1, como se mencionó el registro de CGRAL no se tuvo en cuenta por que al parecer no corresponde a roca.

En la Figura 53 se presentan los resultados para la zona de cerros, en la Figura 54 para el piedemonte, en la Figura 55 para la zona lacustre y en la Figura 56 para los depósitos aluviales.

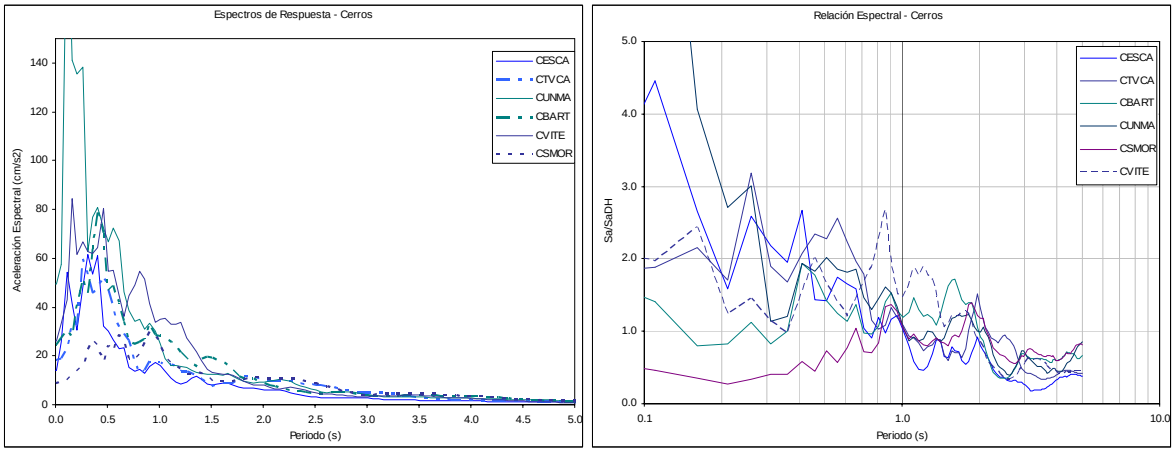



Figura 53. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona cerros

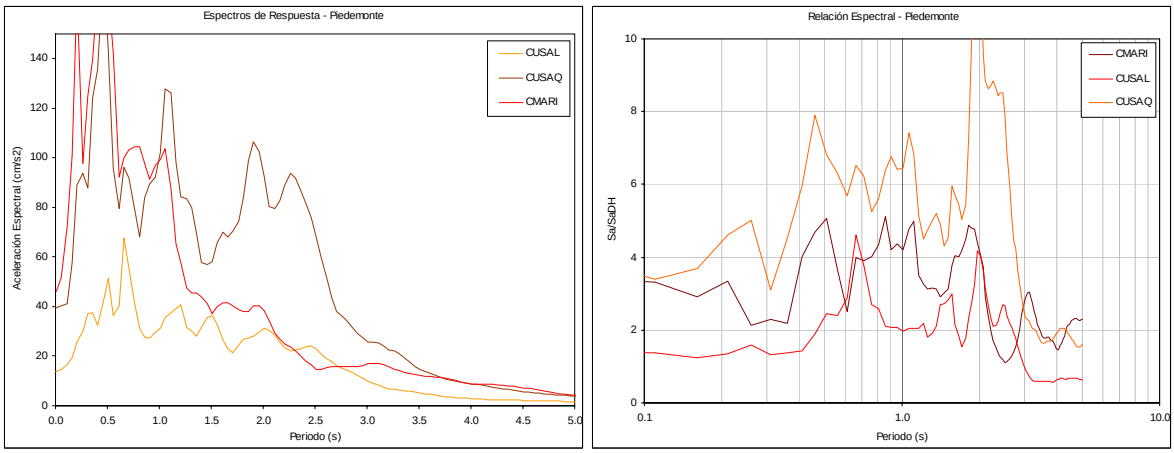



Figura 54. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona piedemonte

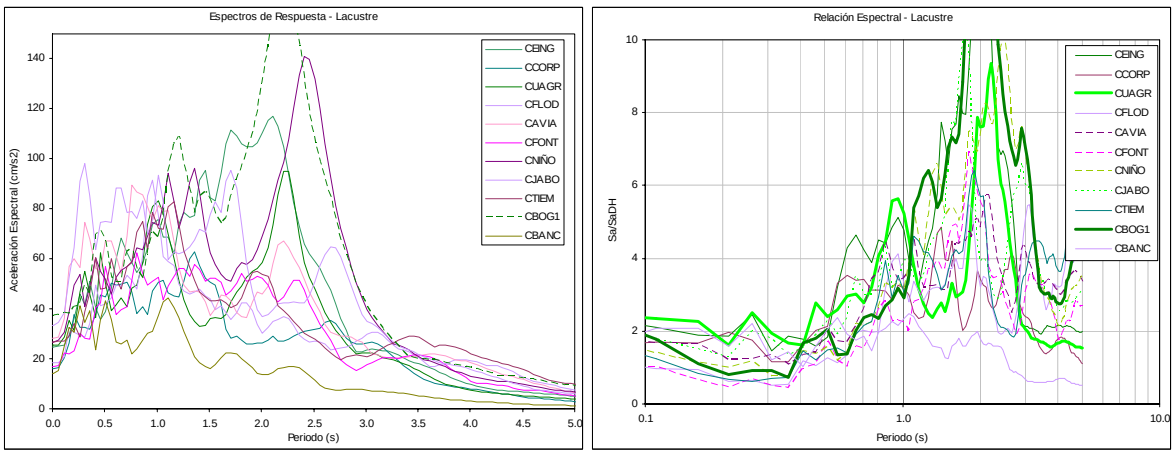



Figura 55. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona lacustre

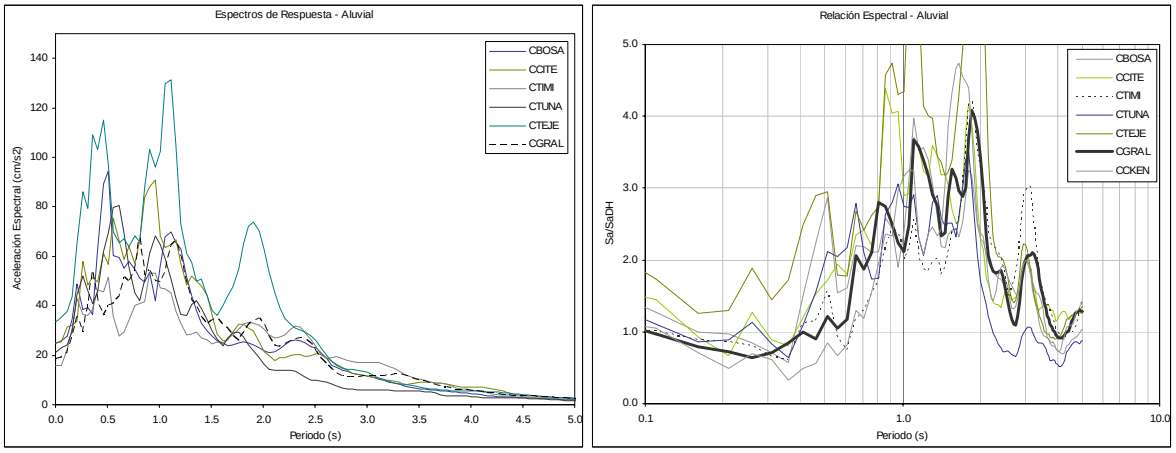



Figura 56. Espectros de respuesta y relaciones espectrales calculadas para la zona aluvial

Se destacan los siguientes aspectos de las anteriores figuras:

- Zona de cerros: se amplifica de 2 a 4 veces la señal en periodos entre 0.1 y 0.7 y de-amplifica los periodos mayores a 2 segundos.

- Zona de piedemonte: amplifica de 4 a 6 veces tanto para los periodos bajos entre 0.5 y 0.8 como para periodos altos de 2 segundos.

- Zona lacustre: amplifica de 4 a 10 veces la señal varían entre 1 a 4 segundos de periodo, no hay un solo periodo característico para toda la zona, la respuesta de cada estación está dominada en el intervalo de periodos altos. Sin embargo, si se asocia cada estación al espesor del depósito se ve claramente la correspondencia entre el periodo y el espesor de suelo, de manera que las estaciones con espesor de 50 m (CBANC) tienen un periodo natural de 1.05 s y la estación con 500 m de espesor de sedimento (CFLOD) es de 4.25 s.

- Zona aluvial: las amplificaciones son del orden de 3 a 4 veces entre 0.8 y 1.9 s de periodo, se aprecia que las estaciones más cercanas a los cerros presentan mayores amplificaciones y las más lejanas un poco menos, es decir que similar a la zona lacustre hay relación de las respuestas con el espesor de sedimentos.

#### 4.2.2.5 Periodo natural de vibración del depósito

A partir de las relaciones espectrales calculadas para cada una de las estaciones que registraron el evento de Quetame se estimaron los periodos naturales de vibración, para ello se consideró el periodo en el cual se presentó la mayor amplificación de la señal. Los periodos calculados se presentan en la Tabla 10 y en la Figura 57 la correlación estimada con el espesor de sedimento aproximado del sitio de cada estación.

En general, se puede observar que la zona de cerros tiene periodos menores a 0.4 s; zona de piedemonte entre 0.4 y 0.65 s; la zona lacustre entre 1.05 y 4.25 s y la zona aluvial entre 0.85 y 1.8 s (ver Figura 58).

| Código | Nombre | Periodo Natural (s) | Profundidad Depósito (m) |
|---|---|---|---|
| CEING | ESC. COLOMBIANA DE INGENIERIA | 1.95 | 110 |
| CUSAL | UNIVERSIDAD DE LA SALLE | 0.65 | 30 |
| CBOSA | COLEGIO FERNANDO MAZUERA | 0.95 | 70 |
| CCORP | UNIVERSIDAD CORPAS | 2.7 | 220 |
| CUAGR | UNIAGRARIA Sup. | 2.2 | 130 |
| CUSAQ | COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN | 0.45 | 30 |
| CESCA | ESCUELA DE CABALLERIA | 0.3 | 0 |
| CBANC | BANCO DE LA REPUBLICA | 1.05 | 60 |
| CTVCA | T.V. CABLE | 0.25 | 0 |
| CFLOD | PARQUE LA FLORIDA | 4.25 | 500 |
| CAVIA | AVIANCA | 2.95 | 300 |
| CFONT | PLANTA DE BOMBEO FONTIBON | 3.2 | 270 |
| CNIÑO | CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO | 2.45 | 220 |
| CJABO | JARDÍN BOTANICO | 2.9 | 260 |
| CBART | COLEGIO SAN BARTOLOME | 0.3 | 0 |
| CUNMA | UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN | 0.2 | 10 |
| CCITE | CITEC | 1.8 | 200 |
| CTIEM | CLUB EL TIEMPO | 3.25 | 375 |
| CTIMI | PARQUE TIMIZA | 1.65 | 160 |
| CTUNA | PARQUE TUNAL | 0.9 | 80 |
| CMARI | BOMBEROS MARICHUELA | 0.4 | 25 |
| CSMOR | COLEGIO SIERRA MORENA | 0.3 | 0 |
| CTEJE | ESCUELA DE TEJEDORES | 0.85 | 80 |
| CVITE | TANQUES DE VITELMA | 0.15 | 0 |
| CGRAL | ESCUELA GENERAL SANTANDER Sup. | 1.1 | 100 |
| CCKEN | COL-KENNEDY | 1.65 | 220 |
| CBOG1 | INGEOMINAS Sup. | 2.1 | 180 |

Tabla 10. Periodo natural del depósito a partir de las relaciones espectrales obtenidas del sismo de Quetame

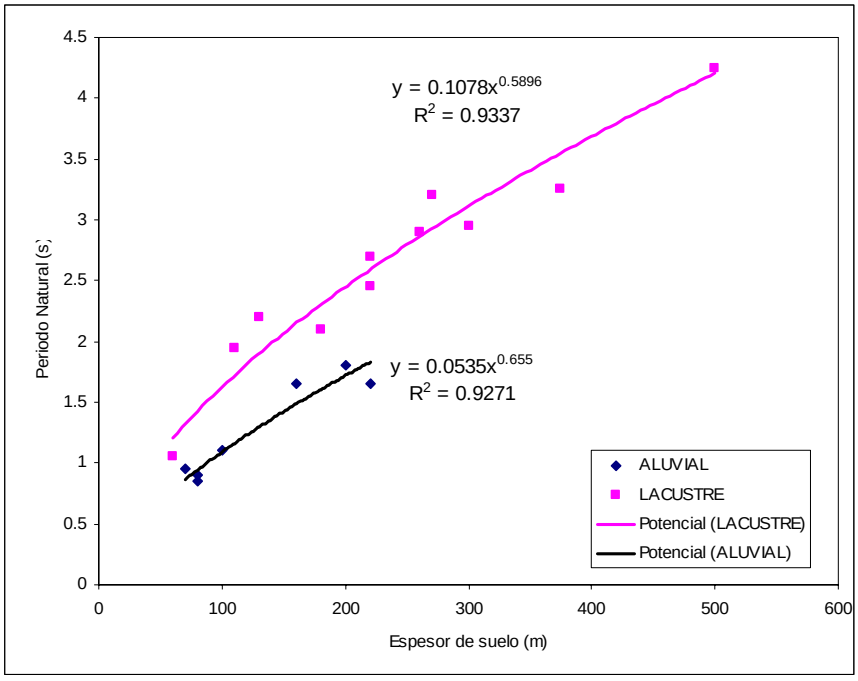



Figura 57. Correlación estimada entre espesor del deposito y periodo natural zona Lacustre y Aluvial

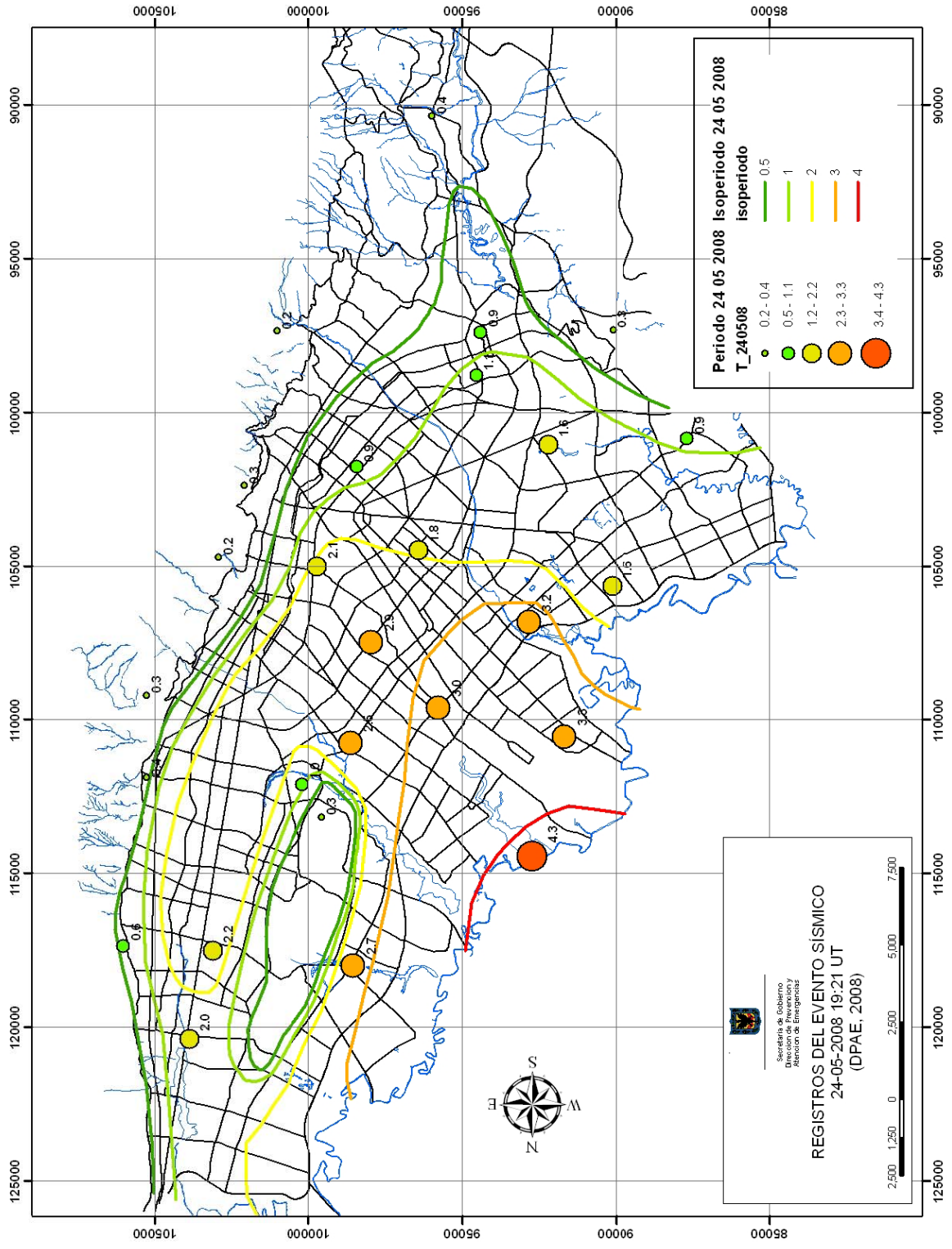



Figura 58. Distribución del periodo natural del depósito a partir del sismo de Quetame 24/05/2008

## 4.3 SÍNTESIS DE RESULTADOS

A partir de los análisis de los espectros de respuesta de todos los registros obtenidos a la fecha se destacaron los siguientes aspectos generales:

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

- Zona de piedemonte: Los periodos dominantes de las señales registradas en el piedemonte están entre 0.4 y 0.7 s con relaciones Sa/Ao hasta de 4 veces, las estaciones del piedemonte norte de la ciudad CUSAL y CUSAQ presentaron para el sismo de Quetame respuestas espectrales considerables en altos periodos (1.5 a 2.5 s) con relaciones Sa/Ao hasta de 2.5 veces. En términos generales se amplifican las señales de 4 a 6 veces tanto para los periodos bajos entre 0.5 y 0.8 como para periodos altos de 2 segundos en la zona norte.

- Zona lacustre: Las señales provenientes del Nido de Bucaramanga presentaron periodos dominantes de 0.5 s y las señales de las fuentes regionales, como el sismo de Quetame, presentaron tres periodos dominantes, a 0.6, 1.1 y 2.3 s. Las relaciones Sa/Ao para periodos bajos (menor a 1 s) son de alrededor de 3 a 4 veces y para los periodos altos (mayor a 1 s) están entre 4 y 6. Las amplificaciones estimadas son del orden de 4 a 10 veces entre 1 a 4 s de periodo. No hay un solo periodo característico para toda la zona, la respuesta de cada estación está dominada en el intervalo de periodos altos. Sin embargo, si se asocia cada estación al espesor del depósito se ve claramente la correspondencia entre el periodo y el espesor de suelo, de manera que las estaciones con espesor de 50 m (CBANC) tienen un periodo natural de 1.05 s y la estación con 500 m de sedimento (CFLOD) es de 4.25 s.

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

CAPITULO 5

# 5 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE RESPUESTA EN LOS SITIOS CON DOWN HOLE

En el presente capítulo se presentará la evaluación de algunas propiedades dinámicas de los depósitos de la ciudad de Bogotá a partir de los registros obtenidos por la RAB junto con la calibración obtenida de los modelos de respuesta unidimensional en los sitios con Down Hole. Particularmente se presentarán los análisis realizados para la estimación de la velocidad de onda de corte - Vs y amortiguamiento viscoso o mínimo - Dmin con base en los datos del sismo del municipio de Quetame y el mapa de espesores de sedimento; para la calibración de los modelos de respuesta unidimensionales de los sitios con Down Hole se tiene en cuenta la Vs y Dmin estimados, modelos de degradación de las propiedades dinámicas recientemente propuestos y los perfiles estratigráficos de los sitios estudiados.

## 5.1 PROPIEDADES DINÁMICAS

Las propiedades que influyen en la respuesta sísmica de un depósito de suelo son la velocidad de onda de corte, el amortiguamiento viscoso del material, la degradación del módulo de corte, la relación de amortiguamiento histerético, las condiciones de frontera y los efectos topográficos. Por otro lado, los niveles de aceleración registrados por la RAB son bajos, por lo que es solamente posible estudiar las propiedades dinámicas a bajas deformaciones, como son la velocidad de onda cortante y el amortiguamiento viscoso o mínimo; puesto que es necesario contar con registros de mayor intensidad para estimar el comportamiento no lineal, representado por la degradación del módulo y aumento del amortiguamiento histerético.

Por lo anterior, en la calibración de los modelos de respuesta unidimensional de los sitios con Down Hole se emplearán curvas de degradación y amortiguamiento recomendadas en los estudios recientes. Estos modelos incorporan el concepto de amortiguamiento viscoso y la variación de las propiedades dinámicas como degradación y amortiguamiento en función del confinamiento, aspectos que no se tuvieron en cuenta anteriormente en los estudios realizados.

### 5.1.1 Velocidad de onda cortante

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

***Método 1***

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

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

Donde

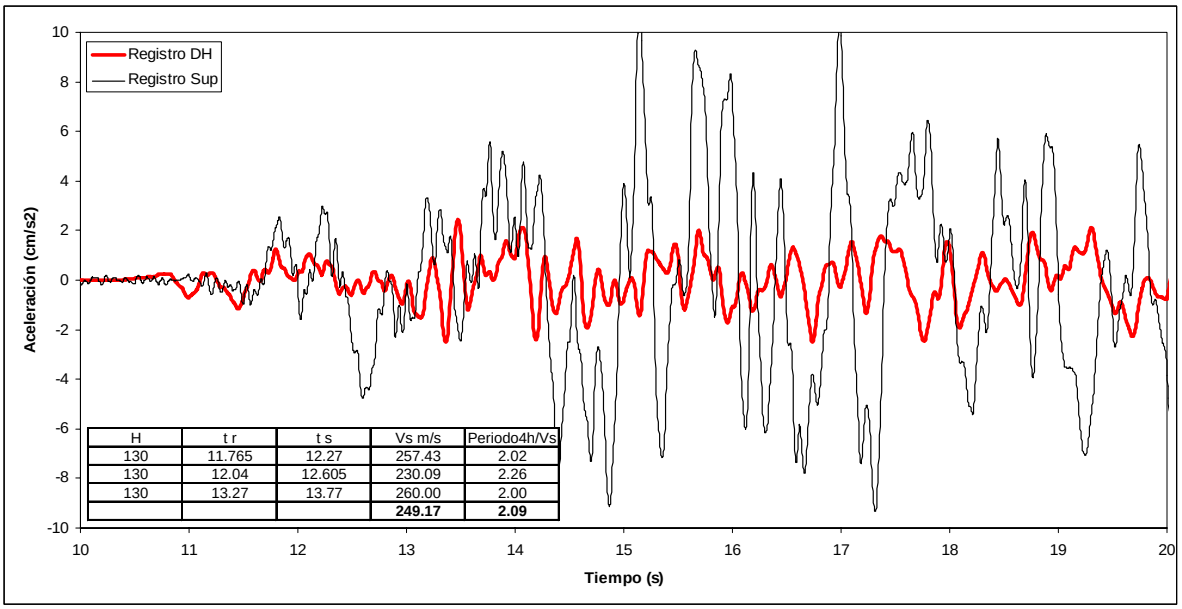
$\overline{Vs}$ : Velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca

$H$ : Espesor del depósito hasta la roca

$T_f$ : Periodo fundamental del depósito (primer modo)

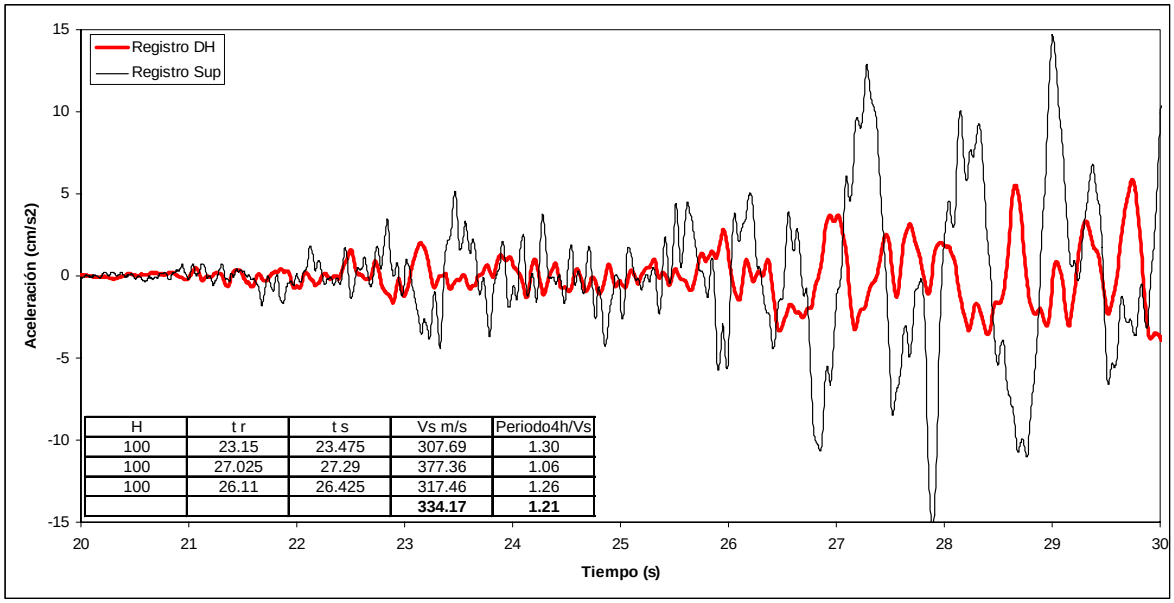
***Método 2***

El segundo método consistió en medir directamente de los registros de las ondas de corte (SH) del sismo del municipio de Quetame el tiempo que dura la onda de corte desde el sensor en profundidad hasta el sensor en superficie, para este ejercicio se escogieron las ventanas de tiempo inicial de la señal, buscando la correspondencia entre los pulsos de la señal en profundidad (DH) y su respuesta en superficie (Sup), los acelerogramas de las estaciones de la Universidad Agraria – CUAGR, Escuela General Santander – CGRAL e INGEOMINAS – CBOG1 se presentan de la **Figura 59** a la **Figura 61**.



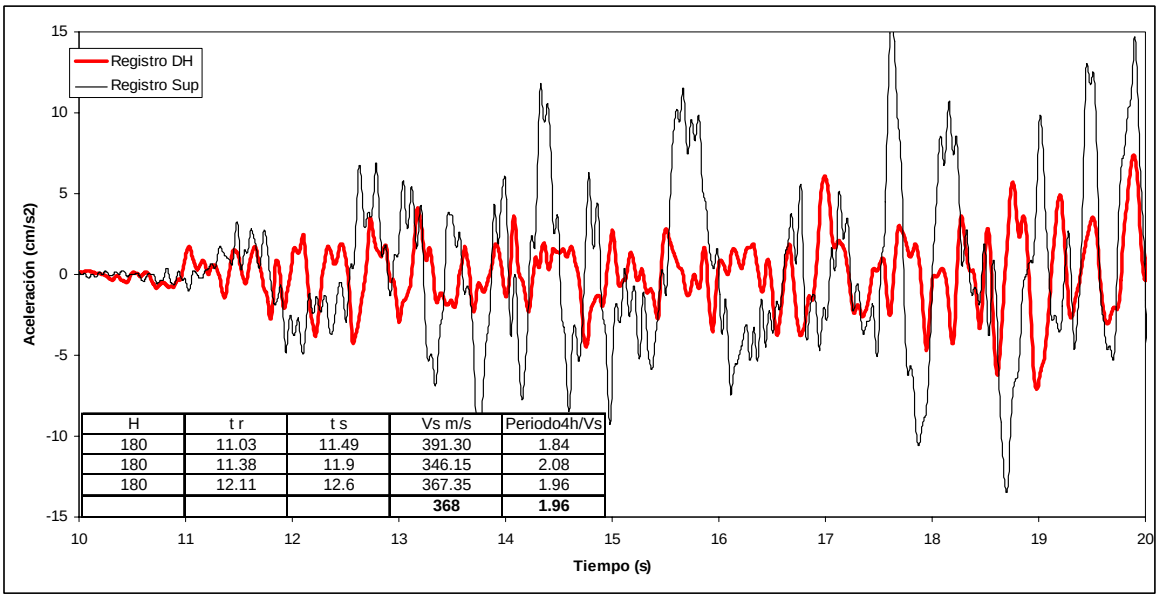

| H | t r | t s | Vs m/s | Periodo4h/Vs |
|---|---|---|---|---|
| 130 | 11.765 | 12.27 | 257.43 | 2.02 |
| 130 | 12.04 | 12.605 | 230.09 | 2.26 |
| 130 | 13.27 | 13.77 | 260.00 | 2.00 |
| | | | **249.17** | **2.09** |

Figura 59. Acelerograma en profundidad y superficie CUAGR




| H | t r | t s | Vs m/s | Periodo4h/Vs |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 23.15 | 23.475 | 307.69 | 1.30 |
| 100 | 27.025 | 27.29 | 377.36 | 1.06 |
| 100 | 26.11 | 26.425 | 317.46 | 1.26 |
| | | | **334.17** | **1.21** |

Figura 60. Acelerograma en profundidad y superficie CGRAL




| H | t r | t s | Vs m/s | Periodo4h/Vs |
|---|---|---|---|---|
| 180 | 11.03 | 11.49 | 391.30 | 1.84 |
| 180 | 11.38 | 11.9 | 346.15 | 2.08 |
| 180 | 12.11 | 12.6 | 367.35 | 1.96 |
| | | | **368** | **1.96** |

Figura 61. Acelerograma en profundidad y superficie CBOG1

Es importante mencionar que los valores obtenidos por este método son aproximados, puesto que en superficie los diferentes tipos de ondas pueden superponerse y la determinación de una onda clara y completa es difícil. Sin embargo, los resultados calculados por el método 2 son similares a los obtenidos por el método 1 como se puede observar en la Tabla 11.

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

Tabla 11. Valores estimados de la velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca

Los resultados anteriores representan la velocidad de onda cortante promedio tomando todo el depósito hasta la roca, de allí se puede establecer una correlación entre el espesor - H y la Velocidad de onda cortante promedio - Vs promedio para las zonas lacustre y aluvial, en el caso de la zona de piedemonte no hay una tendencia clara por que estos depósitos son de poco espesor y muy heterogéneos, de manera que las estaciones del piedemonte norte se correlaciona más con la zona lacustre, pero los piedemontes del centro y sur se asemejan más a la zona aluvial, como se presenta en la Figura 62.

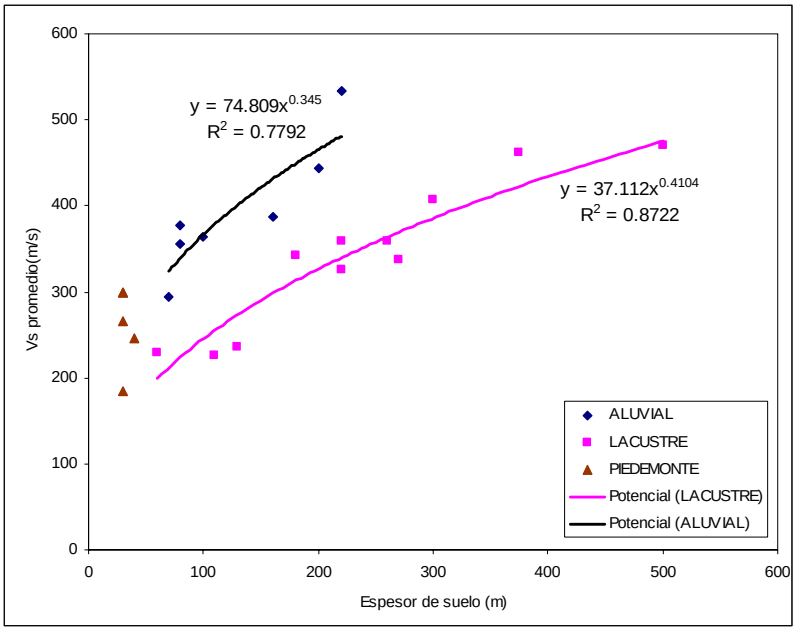



Figura 62. Relación entre el espesor del depósito y la velocidad de onda cortante promedio

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

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

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

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

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

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

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

Realizando un retro-análisis con los valores promedios de la velocidad de onda cortante para cada sitio de la RAB y teniendo en cuenta un perfil estratigráfico simplificado se obtienen las constantes para estimar la velocidad de onda de cada estrato en función de la profundidad como se resume en la Tabla 12.

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

Tabla 12. Valores estimados de a y b para los tipos de suelos generales

Dado que la ecuación (4) no es dimensionalmente correcta se puede expresar de acuerdo con Díaz (2007) en términos del esfuerzo efectivo medio del estrato - $\sigma'_0$ normalizando por la presión atmosférica – Pa elevado a un exponente *b* por una velocidad de onda de corte de referencia $Vs_{ref}$ que depende del tipo de material sometido a un esfuerzo efectivo promedio igual a la Pa, de la siguiente manera:

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

Los valores estimados de "$V_{ref}$" para diferentes tipos de suelos para la ecuación anterior se ilustran en la Tabla 13.

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

Tabla 13. Valores estimados de $Vs_{ref}$ y b para los tipos de suelos generales

En la Figura 63 se presenta el perfil de velocidad calculado por las expresiones (4) y (5) en el sitio de la estación de INGEOMINAS y en la Tabla 14 se resume los valores promedios de velocidad de onda cortante calculados para el perfil de análisis por todos los métodos presentados.

| Método | Vs promedio (m/s) |
|---|---|
| A partir del periodo fundamental | 343 |
| A partir del registro en DH y Sup | 368 |
| Ponderado en función de la profundidad | 309 |
| Ponderado en función del confinamiento | 309 |

Tabla 14. Velocidad de onda promedio del perfil CBOG1 estimada por diferentes métodos

En general se observa que en el sitio de la estación CBOG1 (INGEOMINAS) la velocidad de onda promedio del depósito de 180 m de espesor se encuentra entre 300 y 360 m/s, presentando valores para la formación Sábana entre 120 a 200 m/s hasta 60 m de profundidad, para la transición entre la formación Sábana y Subachoque entre 200 a 350 m/s hasta los 80 m de profundidad y para la formación Subachoque aumenta de 350 a 425 m/s hasta los 180 m, aunque hay unas capas de arcillas a los 160 m con velocidades de 220 m/s.

| No Capa | Material | DESCRIPCION GEOTECNICA | Tramo hasta (m) | wn (%) | Peso unitario KN/m$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CH-MH | Arcilla ligeramente limosa, gris. | 5 | 42.8 | 17.7 |
| 2 | CH | Arcilla, gris rosado palido. | 7 | 79 | 16.2 |
| 3 | CH | Arcilla, gris marrón. | 12 | 127 | 13.7 |
| 4 | CH | Arcilla, gris oliva. | 17 | 119.2 | 13.5 |
| 5 | CH | Arcilla, marrón. | 21 | 115.9 | 14.0 |
| 6 | PT | Turba. | 23 | 300.0 | 9.8 |
| 7 | CH | Arcilla, marrón amarillento oscuro. | 30 | 87.2 | 14.2 |
| 8 | CL | Arena arcillosa fina-media, marrón amarillo. | 38 | 28.3 | 19.1 |
| 9 | CH | Arcilla limosa, marrón amarillento oscuro. | 44.5 | 51.9 | 17.2 |
| 10 | CH | Arcilla, gris oliva, turba arcillosa negra. | 52.5 | 81.1 | 15.2 |
| 11 | PT | Turba | 58 | 120 | 13.1 |
| 12 | CH | Arcilla arenosa gris oliva | 67 | 37 | 18.6 |
| 13 | PT | Turba | 69 | 120 | 12.8 |
| 14 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 80 | 26 | 19.1 |
| 15 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 100 | 25 | 19.1 |
| 16 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 120 | 20 | 19.1 |
| 17 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 140 | 27 | 19.1 |
| 18 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 152 | 27 | 19.1 |
| 19 | CH | Arcilla gris y marrón | 157 | 29 | 17.7 |
| 20 | PT | Turba | 159 | 120 | 12.8 |
| 21 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 177 | 40 | 19.1 |

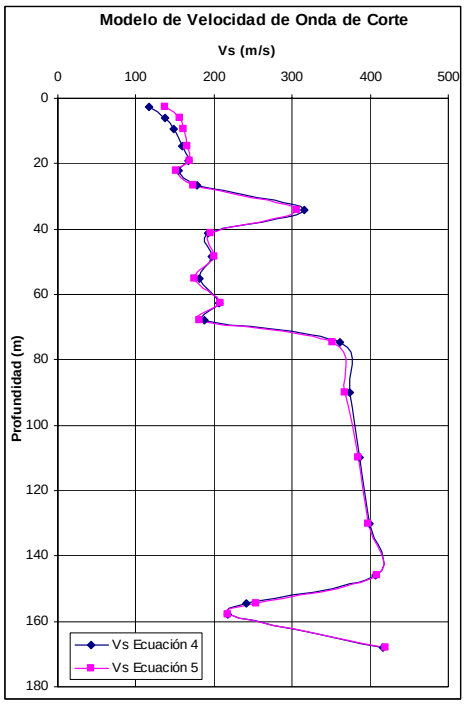



Figura 63. Modelo de perfil de velocidad de onda de corte estación CBOG1

### 5.1.2 Amortiguamiento viscoso o mínimo

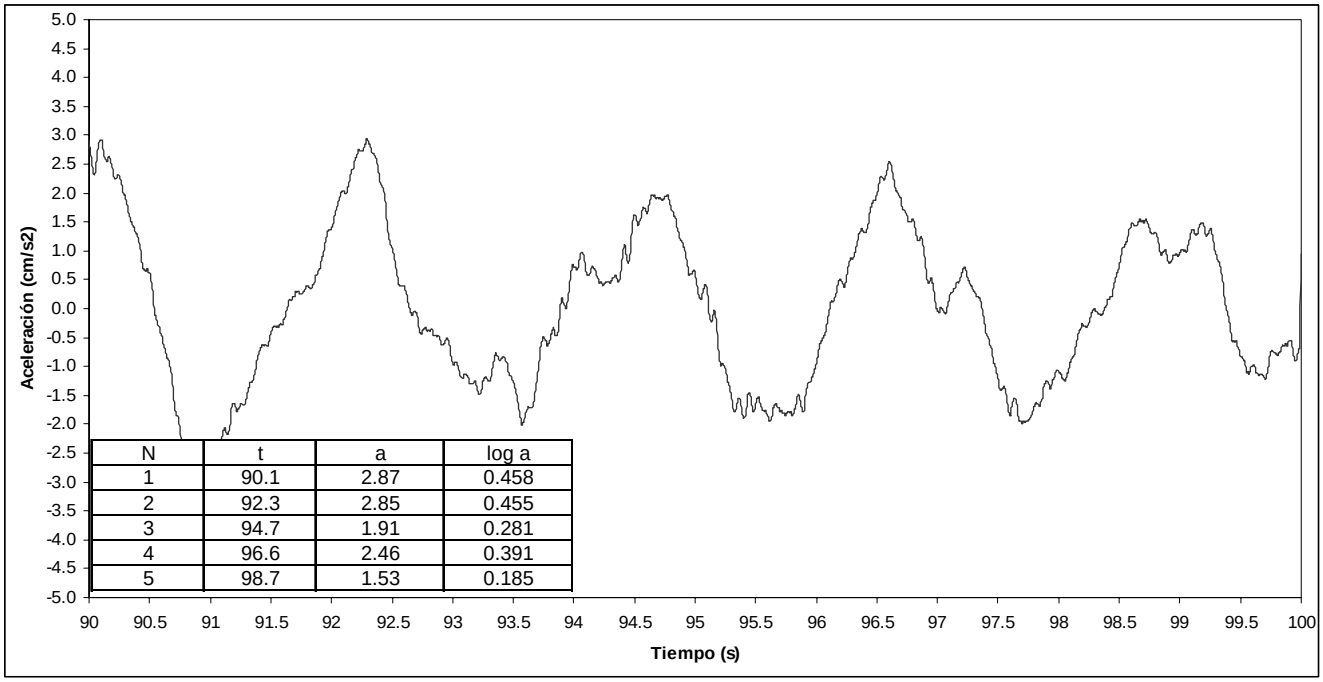
El amortiguamiento viscoso o mínimo se determina a niveles bajos de deformación, se puede estimar para señales de baja energía en la parte final del registro, donde se presume que el depósito está en vibración libre. El método consiste en seleccionar una ventana de tiempo donde se aprecie el decaimiento de la intensidad de la señal, en este intervalo se aplican las expresiones para calcular el amortiguamiento a partir del decaimiento logarítmico de los ciclos de carga en vibración libre (Ishihara, 1996).

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

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

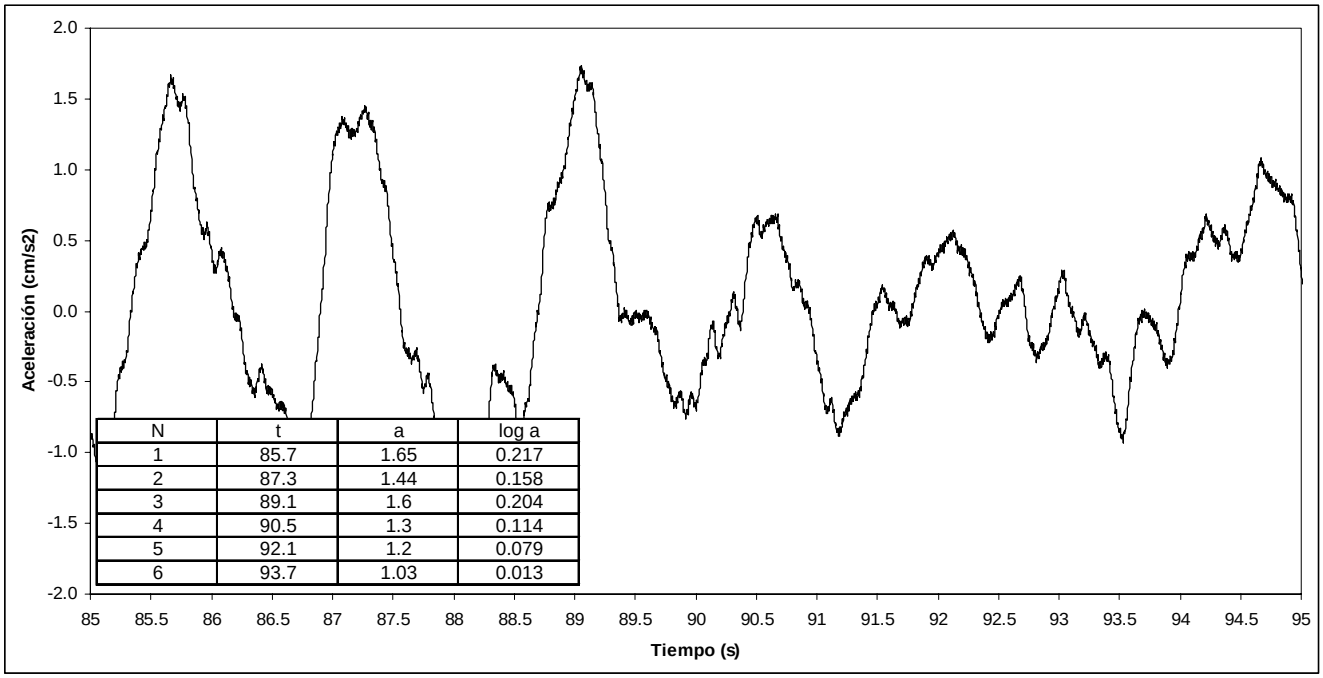
Donde $D$ es el amortiguamiento, $\Delta$ es la pendiente de la relación entre el logaritmo de la amplitud $a$ y el número del ciclo $N$.

Con base en los registros de las ondas de corte (SH) del sismo del municipio de Quetame en las estaciones con DH se escogieron las ventanas de tiempo del final de la señal para determinar la relación del logaritmo de la amplitud con el número de ciclos. Los acelerogramas de las estaciones de la Universidad Agraria – CUAGR, Escuela General Santander – CGRAL e INGEOMINAS – CBOG1 se presentan de la **Figura 64** a la **Figura 66** junto con los datos tenidos en cuenta para calcular el amortiguamiento.



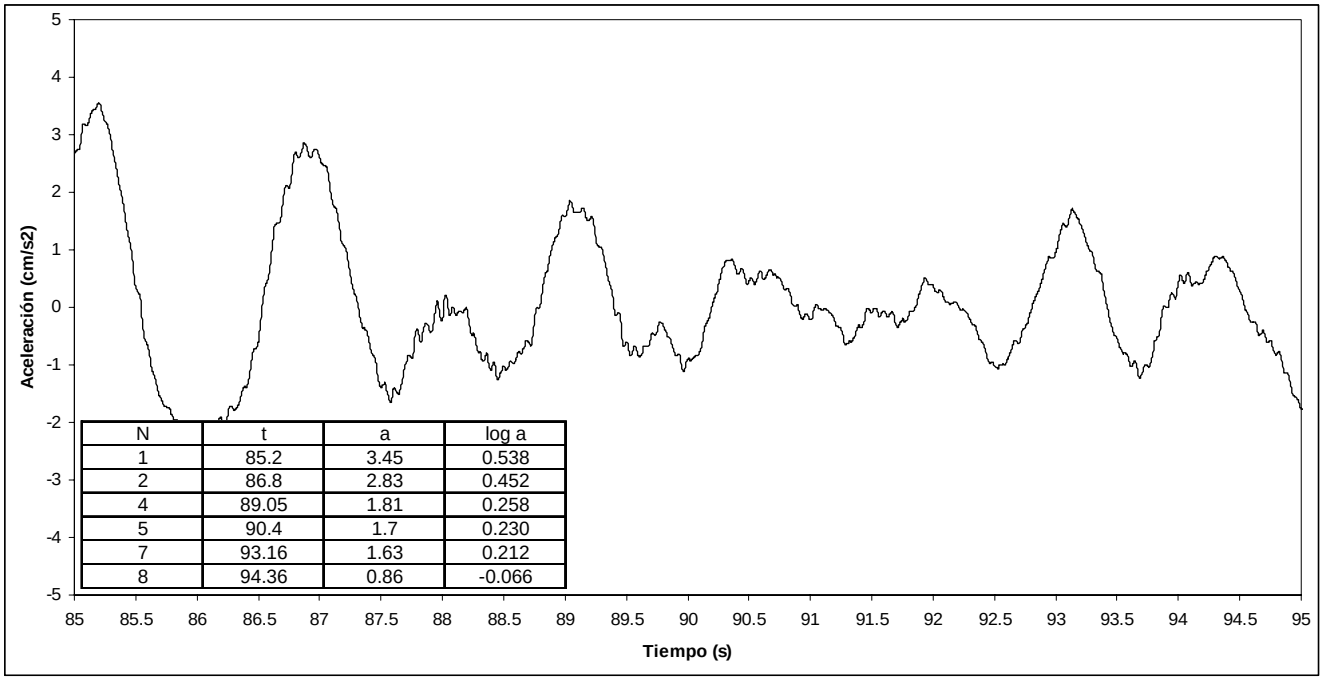

| N | t | a | log a |
|---|---|---|---|
| 1 | 90.1 | 2.87 | 0.458 |
| 2 | 92.3 | 2.85 | 0.455 |
| 3 | 94.7 | 1.91 | 0.281 |
| 4 | 96.6 | 2.46 | 0.391 |
| 5 | 98.7 | 1.53 | 0.185 |

Figura 64. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CUAGR




| N | t | a | log a |
|---|---|---|---|
| 1 | 85.7 | 1.65 | 0.217 |
| 2 | 87.3 | 1.44 | 0.158 |
| 3 | 89.1 | 1.6 | 0.204 |
| 4 | 90.5 | 1.3 | 0.114 |
| 5 | 92.1 | 1.2 | 0.079 |
| 6 | 93.7 | 1.03 | 0.013 |

Figura 65. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CGRAL




| N | t | a | log a |
|---|---|---|---|
| 1 | 85.2 | 3.45 | 0.538 |
| 2 | 86.8 | 2.83 | 0.452 |
| 4 | 89.05 | 1.81 | 0.258 |
| 5 | 90.4 | 1.7 | 0.230 |
| 7 | 93.16 | 1.63 | 0.212 |
| 8 | 94.36 | 0.86 | -0.066 |

Figura 66. Acelerograma en superficie para estimar amortiguamiento CBOG1

Es importante mencionar que los valores obtenidos por este método son aproximados, puesto que en superficie los diferentes tipos de ondas pueden superponerse y la determinación del decaimiento de la onda es difícil. Sin embargo, los resultados calculados indican valores cercanos al 1% para la zona lacustre y del 0.6% para la zona aluvial como se puede observar en la Tabla 15.

| Estación | $\Delta$ | Amortiguamiento D (%) |
|---|---|---|
| CUAGR | 0.061 | 0.97 |
| CGRAL | 0.039 | 0.61 |
| CBOG1 | 0.058 | 0.92 |

Tabla 15. Valores estimados de amortiguamiento mínimo

## 5.2 MODELOS DE DEGRADACIÓN DEL MODULO Y AMORTIGUAMIENTO RECOMENDADOS

Los modelos de degradación del módulo y amortiguamiento se emplean para evaluar el comportamiento no lineal del suelo, por lo cual son fundamentales en la evaluación de la respuesta sísmica del depósito cuando es sometido a un sismo de gran energía. Como hasta la fecha no se ha registrado en la RAB un evento con la energía suficiente para estudiar el comportamiento no lineal de los depósitos, se optó por emplear para los análisis de respuesta sísmica unidimensional dos modelos recientemente desarrollados. Los modelos seleccionados son compatibles con las mediciones realizadas a bajas deformaciones, por que tienen en cuenta el efecto del confinamiento en las propiedades dinámicas como se demostró en el numeral 5.1.1 para la velocidad de onda, e involucran la variación del amortiguamiento mínimo como se ilustró en el numeral 5.1.2. A continuación se resumen de manera general los trabajos de Zhang et al. (2005) y Díaz-Parra (2007).

5.2.1 Zhang et al. (2005)

El modelo no lineal propuesto por Zhang et al., (2005) consideró los datos de laboratorio de Columna Resonante y Corte Torsional, resultado de 78 muestras obtenidas de tres áreas en Carolina del Sur: Charleston, Savannah River Site y Richard B. Russell Dam. Además, los ensayos de Columna Resonante y Corte Torsional se obtuvieron de 44 muestras de Carolina del Norte y de Alabama. Empleó un modelo hiperbólico del siguiente tipo:

$$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{1}{1+\left(\gamma / \gamma_r\right)^{\alpha}} \qquad (8)$$

Donde $\gamma_r$ es la deformación de referencia y $\alpha$ el parámetro de curvatura. Los valores de $\alpha$ y de $\gamma_r$ que proporcionan valores apropiados al modelo están determinados por múltiples regresiones. Solo datos con $G/G_{máx}$ medidos hasta 0.75 o menores, son usados en los análisis de regresión para reducir errores en las extrapolaciones. Debido a que los valores de $\gamma_r$ pueden variar significativamente con $\sigma'_m$, las siguientes relaciones fueron asumidas:

$$\alpha = 0.0021PI + 0.834 \qquad (9)$$

$$\gamma_r = \gamma_{r1}\left(\sigma'_m / P_a\right)^k \qquad (10)$$

Donde $\gamma_{r1}$ es la deformación de referencia para un esfuerzo efectivo de confinamiento de 100 kPa; $P_a$ es el esfuerzo de referencia de 100 kPa; *PI* es el índice de plasticidad y k corresponde al exponente de corrección de esfuerzo. Para depósitos cuaternarios el autor recomienda las siguientes correlaciones para los anteriores parámetros:

$$k = 0.316e^{-0.0142\,PI} \qquad (11)$$

$$\gamma_{r1} = 0.0011PI + 0.0749 \qquad (12)$$

La ecuación general de amortiguamiento adoptada por el autor es:

$$D = f\left(G / G_{MAX}\right) + D_{MIN} \qquad (13)$$

Donde $f(G/G_{máx})$ es la función normalizada de módulos cortantes y $D_{mín}$ corresponde al amortiguamiento a bajas deformaciones, para determinar el $D_{mín}$ el autor solo empleó los datos de corte torsional porque la frecuencia de la carga cíclica (0.5Hz) y el número de ciclos de carga (10) usados en las pruebas son muy similares a los valores típicos de cargas sísmicas; mientras que para las pruebas de columna resonante son mucho más grandes y sobreestiman los amortiguamientos mínimos. Para depósitos cuaternarios el autor recomienda las siguientes correlaciones para los anteriores parámetros:

$$f(G/G_{máx}) = 10.6(G/G_{máx})^2 - 31.6(G/G_{máx}) + 21 \qquad (14)$$

$$D_{mín} = D_{mín1}(\sigma'_m / P_a)^{-k/2} \qquad (15)$$

$$D_{\min 1} = 0.008PI + 0.82 \qquad (16)$$

Se aprecia en el modelo anterior que los factores más importantes para modelar los resultados de los ensayos son el esfuerzo de confinamiento y el índice de plasticidad (PI). Comparaciones entre estas ecuaciones y las curvas publicadas por

otros autores demuestran según Zhang que "el efecto del esfuerzo de confinamiento es más significativo y que el efecto del Índice de plasticidad (PI) es menos significativo en el modelo del comportamiento dinámico del suelo".

### 5.2.2 Díaz-Parra (2007)

El modelo propuesto por Díaz-Parra se determinó a partir de una base de datos experimental de 35 pruebas triaxiales cíclicas realizadas sobre la arcilla blanda de la Ciudad Universitaria en Bogotá. Con base en las formulaciones de Stokoe (2004) y Matasovic (1993) se calcularon los coeficientes y simplificaron algunas de las ecuaciones para el caso de las arcillas de Bogotá. A continuación se presenta la formulación recomendada para la modelación dinámica de arcillas blandas.

La curva de degradación se adoptó a partir del modelo hiperbólico extendido modificado de Stokoe (2004) que está dado por la siguiente expresión:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (17)$$

Donde *s* es un parámetro de ajuste que define la ductilidad del material, $\gamma_r$ es la deformación cortante de referencia que según los análisis de esta investigación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_{ref} = (c \cdot e_0) \cdot \left(\frac{\sigma_0'}{Pa}\right)^m \quad (18)$$

Donde *c* es la deformación de referencia para $e_0$ igual a uno y a una presión atmosférica (Pa) y *m* es el número exponente.

El amortiguamiento fue uno de las parámetros con mayor dispersión en los ensayos, por ello se analizó cuál de los modelos se ajustaba mejor al comportamiento medido en las pruebas, destacándose que las ecuaciones de Stokoe (2004) son las más acertadas para el intervalo de medianas a altas deformaciones y combinado con las recomendaciones de Park et al., (2002) para bajas deformaciones que considera el comportamiento viscoso y simplifica el problema dejándolo independiente de la frecuencia; finalmente se recomiendan las siguientes expresiones:

$$D = F \cdot D_{Ma\sin g} + D_{\min} \quad (19)$$

$$F = \alpha\left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{\beta} \quad (20)$$

$$D_{Ma\sin g} \approx 33 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right) \quad \gamma < 1\% \quad (21)$$

$$D_{\min} = \delta \cdot \left(\frac{\sigma_0'}{Pa}\right)^{-\eta} \quad (22)$$

Donde $D_{Masing}$ es el amortiguamiento histeretico según Reyla Masing (1923) $\alpha$ es un parámetro de ajuste, $\beta$ es un exponente ajuste, $\delta$ es el amortiguamiento mínimo de referencia a una presión atmosférica, y $\eta$ es el número exponente del amortiguamiento mínimo.

Las constantes y parámetros de las expresiones del modelo planteado para las arcillas blandas de Bogotá se resumen en la Tabla 16.

| Parámetro | Signo | Unidad | Valor |
|---|---|---|---|
| Número exponente | m | - | 0.35 |
| Parámetro de ajuste que define la ductilidad del material | s | - | 0.919 |
| Deformación de referencia para $e_0$ = 1.0 y Pa | c | % | 0.0756 |
| Parámetro de ajuste del amortiguamiento | $\alpha$ | % | 0.62 |
| Exponente ajuste del amortiguamiento | $\beta$ | - | 0.1 |
| Amortiguamiento mínimo de referencia a Pa | $\delta$ | % | 1.0 |
| Número exponente amortiguamiento mínimo | $\eta$ | - | 0.3 |

Tabla 16. Resumen de parámetros recomendados para material lacustre

Los parámetros recomendados para las formaciones aluviales se obtuvieron a partir de los ensayos de laboratorio realizados por INGEOMINAS en el sector del Reactor Nuclear (INGEOMINAS, 2006) y en la Microzonificación Sísmica de Cali (Díaz-Parra et al., 2006), a continuación se resumen los parámetros recomendados en la Tabla 17.

| Parámetro | Signo | Unidad | Valor |
|---|---|---|---|
| Número exponente | m | - | 0.35 |
| Parámetro de ajuste que define la ductilidad del material | s | - | 0.85 |
| Deformación de referencia para $e_0$ = 1.0 y Pa | c | % | 0.0756 |
| Parámetro de ajuste del amortiguamiento | $\alpha$ | % | 0.62 |
| Exponente ajuste del amortiguamiento | $\beta$ | - | 0.1 |
| Amortiguamiento mínimo de referencia a Pa | $\delta$ | % | 0.5 |
| Número exponente amortiguamiento mínimo | $\eta$ | - | 0.3 |

Tabla 17. Resumen de parámetros recomendados para material aluvial

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 $\gamma_{ref}$ y Dmin mediante las expresiones recomendadas y calcular los valores de degradación del módulo (G/Go) y amortiguamiento (D) para los niveles de deformación cortante de interés.

## 5.3 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE RESPUESTA EN LOS SITIOS CON DOWN HOLE

El proceso de calibración de los perfiles geotécnicos de los sitios con Down Hole consistió en modificar gradualmente las velocidades de onda cortante de referencia acuerdo con su intervalo de variación estimado, 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.

A continuación se presentaran los resultados obtenidos a partir de retro-análisis realizados en los tres sitios con Down Hole, uno en el sector norte de la ciudad en la Universidad Agraria (CUAGR), donde predominan los materiales muy blandos, en el sector central de la ciudad en INGEOMINAS (CBOG1), con predominio de arcillas blandas con intercalaciones de suelos aluviales, y al sur de la ciudad en la Escuela General Santander (CGRAL), donde predominan los suelos aluviales con intercalaciones de capas orgánicas.

Es importante mencionar que en el caso de la estación CGRAL la señal del Down Hole presenta efectos de sitio importantes, es decir que no corresponde exactamente a la roca profundad, por lo que en este sitio se encontró que modelando la señal del Down Hole a los 55 m de profundidad se hallaban resultados satisfactorios.

### 5.3.1 Universidad Agraria – CUAGR

En la Tabla 18 se ilustra el perfil geotécnico analizado y en la Figura 67 la variación con la profundidad de las propiedades dinámicas.

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

Tabla 18. Perfil geotécnico analizado en CUAGR

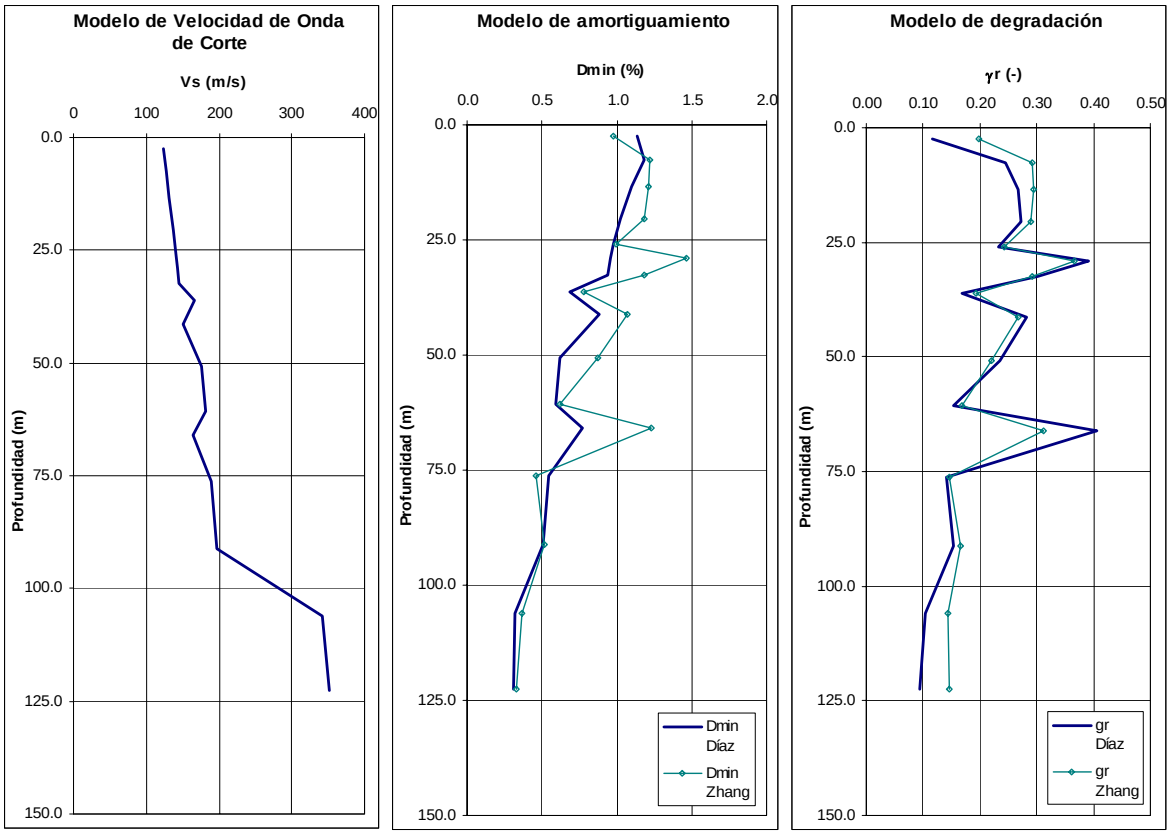
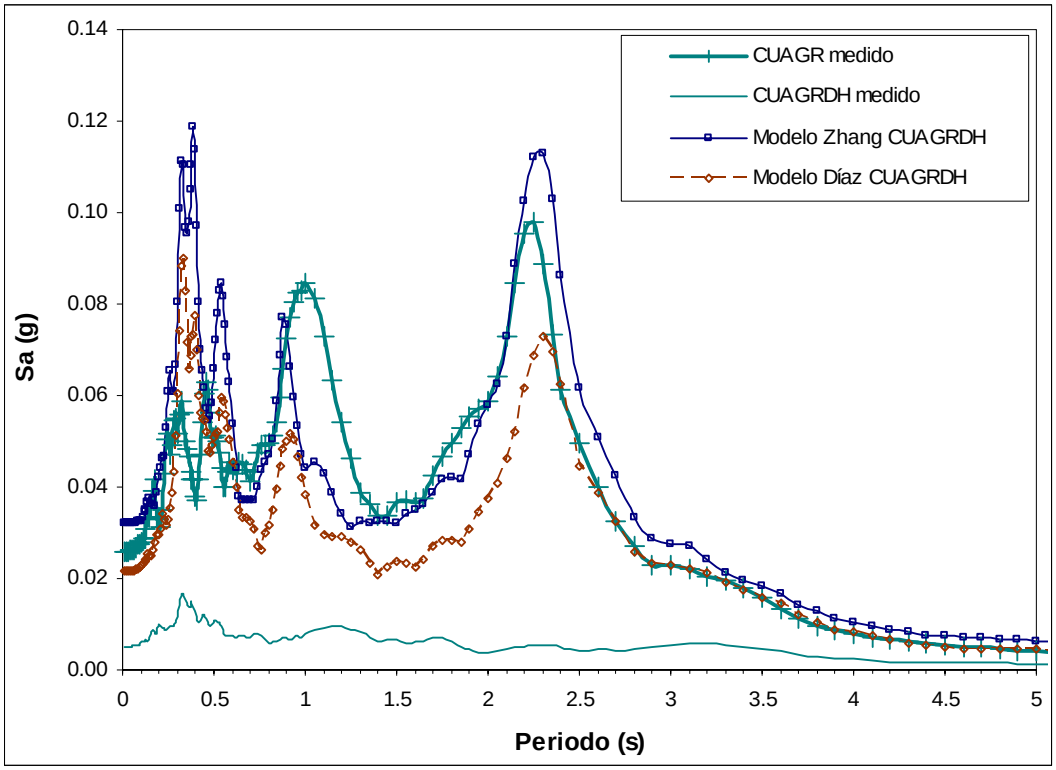



Figura 67. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CUAGR

En la Figura 68 se presenta los resultados obtenidos para el sismo de Quetame en términos de aceleración espectral y relación espectral.



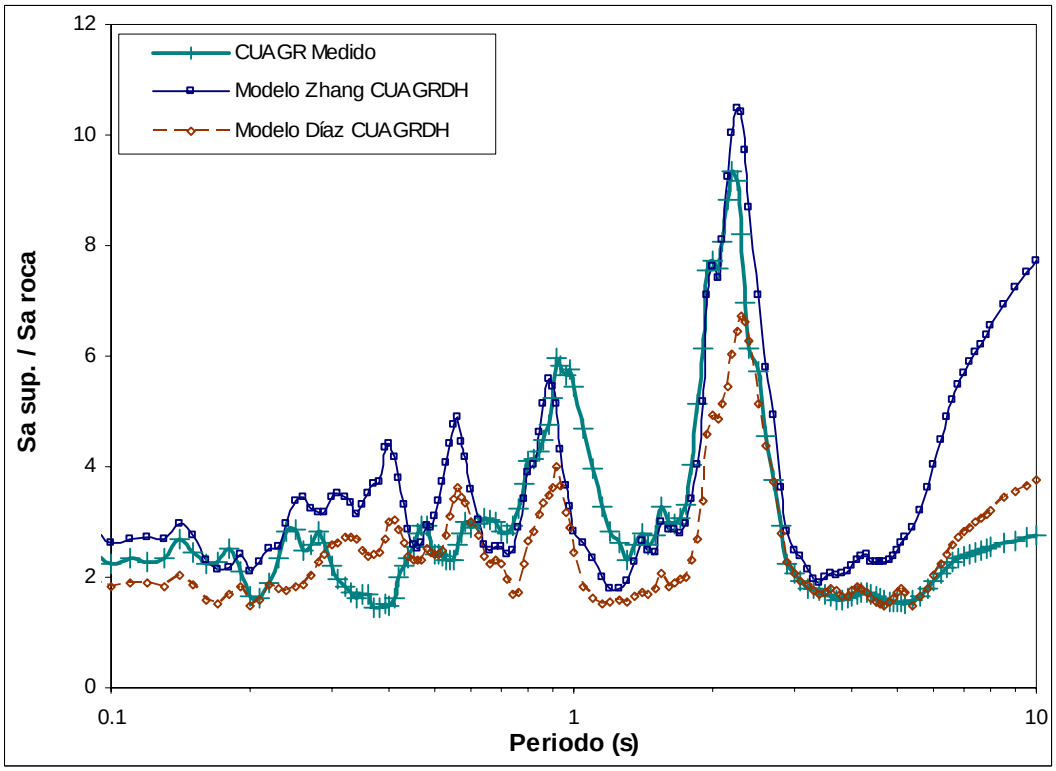




Figura 68. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CUAGR

### 5.3.2 INGEOMINAS – CBOG1

En la Tabla 19 se ilustra el perfil geotécnico analizado y en la Figura 69 la variación con la profundidad de las propiedades dinámicas.

| No Capa | Material | DESCRIPCION GEOTECNICA | Tramo desde (m) | Tramo hasta (m) | wn (%) | eo | IP | Peso unitario gr/cm$^3$ | Vref m/s | Vs modelado m/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CH-MH | Arcilla ligeramente limosa, gris. | 0 | 5 | 43 | 1.10 | 45 | 1.80 | 170 | 137 |
| 2 | CH | Arcilla, gris rosado palido. | 5 | 7 | 79 | 1.90 | 92 | 1.65 | 170 | 157 |
| 3 | CH | Arcilla, gris marrón. | 7 | 12 | 127 | 2.91 | 151 | 1.40 | 170 | 161 |
| 4 | CH | Arcilla, gris oliva. | 12 | 17 | 119 | 2.88 | 149 | 1.38 | 170 | 166 |
| 5 | CH | Arcilla, marrón. | 17 | 21 | 116 | 2.78 | 143 | 1.43 | 170 | 169 |
| 6 | PT | Turba. | 21 | 23 | 300 | 5.50 | 270 | 1.00 | 150 | 151 |
| 7 | CH | Arcilla, marrón amarillento oscuro. | 23 | 30 | 87 | 2.70 | 122 | 1.45 | 170 | 174 |
| 8 | CL | Arena arcillosa fina-media, marrón amarillo. | 30 | 38 | 28 | 0.96 | 17 | 1.95 | 285 | 305 |
| 9 | CH | Arcilla limosa, marrón amarillento oscuro. | 38 | 44.5 | 52 | 1.32 | 46 | 1.75 | 175 | 196 |
| 10 | CH | Arcilla, gris oliva, turba arcillosa negra. | 44.5 | 52.5 | 81 | 2.10 | 104 | 1.55 | 175 | 201 |
| 11 | PT | Turba | 52.5 | 58 | 120 | 2.95 | 155 | 1.34 | 150 | 175 |
| 12 | CH | Arcilla arenosa gris oliva | 58 | 67 | 37 | 1.00 | 38 | 1.90 | 175 | 208 |
| 13 | PT | Turba | 67 | 69 | 120 | 2.95 | 155 | 1.30 | 150 | 182 |
| 14 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 69 | 80 | 26 | 1.05 | 23 | 1.95 | 285 | 352 |
| 15 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 80 | 100 | 25 | 1.05 | 22 | 1.95 | 285 | 368 |
| 16 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 100 | 120 | 20 | 0.95 | 14 | 1.95 | 285 | 384 |
| 17 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 120 | 140 | 27 | 1.05 | 24 | 1.95 | 285 | 398 |
| 18 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 140 | 152 | 27 | 1.05 | 0 | 1.95 | 285 | 408 |
| 19 | CH | Arcilla gris y marrón | 152 | 157 | 29 | 0.90 | 27 | 1.80 | 175 | 253 |
| 20 | PT | Turba | 157 | 159 | 120 | 2.00 | 155 | 1.30 | 150 | 218 |
| 21 | CL | Intercalaciones de arena y arcilla | 159 | 180 | 40 | 1.15 | 42 | 1.95 | 285 | 419 |

Tabla 19. Perfil geotécnico analizado en CBOG1

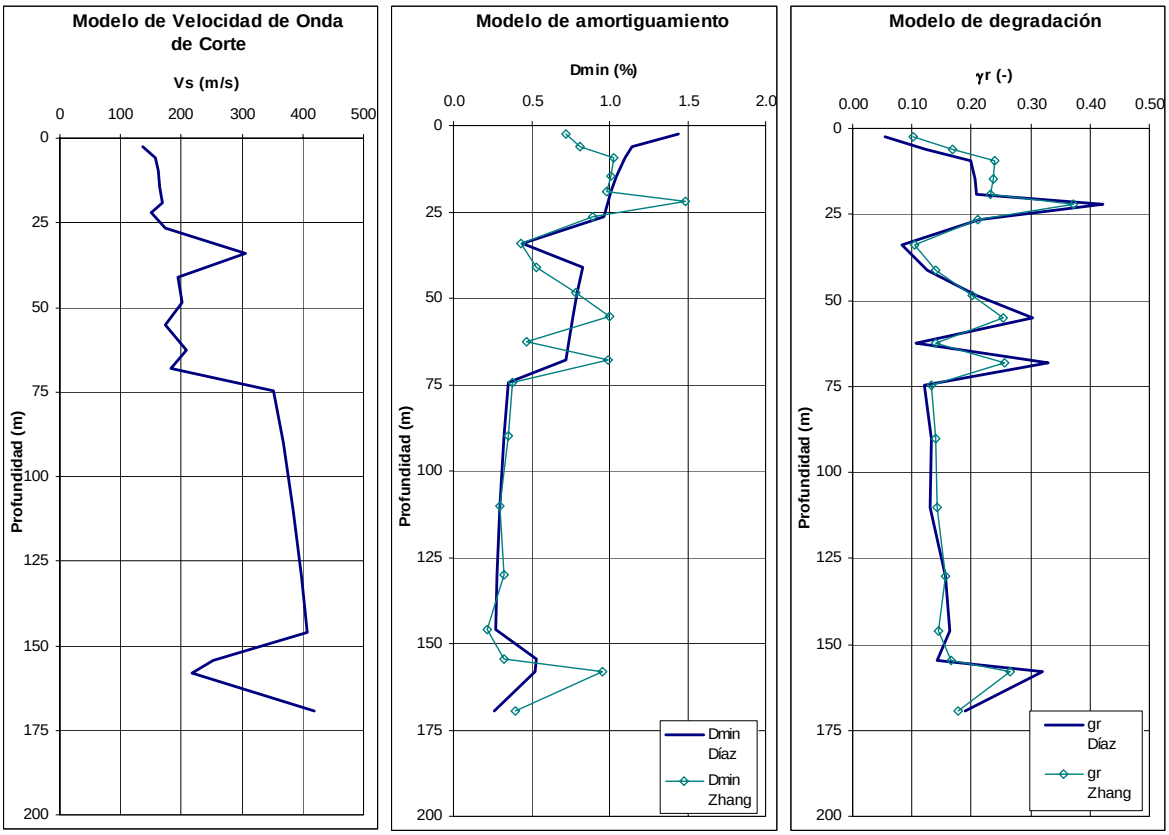



Figura 69. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CBOG1

En la Figura 70 se presenta los resultados obtenidos para el sismo de Quetame en términos de aceleración espectral y relación espectral.

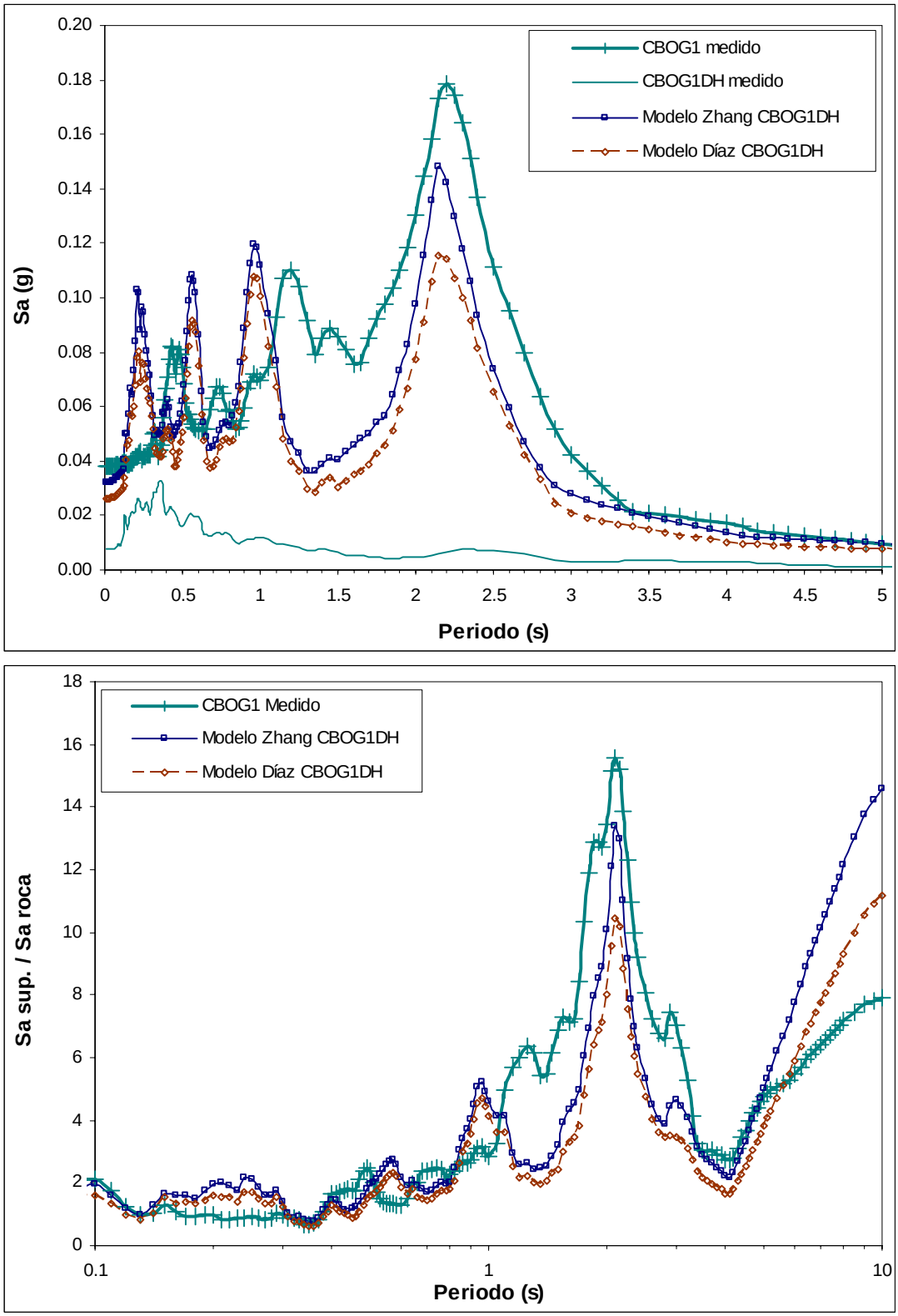



Figura 70. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CBOG1

### 5.3.3 Escuela General Santander – CGRAL

En la Tabla 20 se ilustra el perfil geotécnico analizado y en la Figura 71 la variación con la profundidad de las propiedades dinámicas.

| No Capa | Material | DESCRIPCION GEOTECNICA | Tramo desde (m) | Tramo hasta (m) | wn (%) | eo | IP | Peso unitario gr/cm$^3$ | Vref m/s | Vs modelado m/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SC | Arena arcillosa | 0 | 4 | 25 | 0.694 | 10 | 1.75 | 285 | 190 |
| 2 | SC | Arena arcillosa | 4 | 9 | 25 | 0.694 | 10 | 1.75 | 285 | 233 |
| 3 | SC | Arena arcillosa | 9 | 14 | 25 | 0.694 | 10 | 1.75 | 285 | 257 |
| 4 | CH | Arcilla | 14 | 16 | 100 | 2.494 | 120 | 1.40 | 158 | 149 |
| 5 | CL | Arcilla arenosa | 16 | 21 | 40 | 1.054 | 20 | 1.70 | 265 | 257 |
| 6 | CL | Arcilla arenosa | 21 | 25.5 | 40 | 1.054 | 20 | 1.70 | 265 | 268 |
| 7 | OH | Arcilla orgánica | 25.5 | 30 | 200 | 4.894 | 250 | 1.10 | 140 | 144 |
| 8 | CL | Arcilla arenosa | 30 | 35 | 40 | 1.054 | 20 | 1.80 | 265 | 278 |
| 9 | CL | Arcilla arenosa | 35 | 40 | 40 | 1.054 | 20 | 1.80 | 265 | 287 |
| 10 | SP | Arena | 40 | 45 | 20 | 0.574 | 0 | 1.85 | 285 | 317 |
| 11 | SP | Arena | 45 | 50 | 20 | 0.574 | 0 | 1.85 | 285 | 325 |
| 12 | CL | Arcilla arenosa | 50 | 53 | 20 | 0.574 | 20 | 1.85 | 265 | 308 |
| 13 | CH | Arcilla | 53 | 55 | 80 | 2.014 | 120 | 1.20 | 158 | 185 |
| 14 | CL | Arcilla arenosa | 55 | 100 | 20 | 0.574 | 20 | 1.85 | 285 | 358 |

Tabla 20. Perfil geotécnico analizado en CGRAL

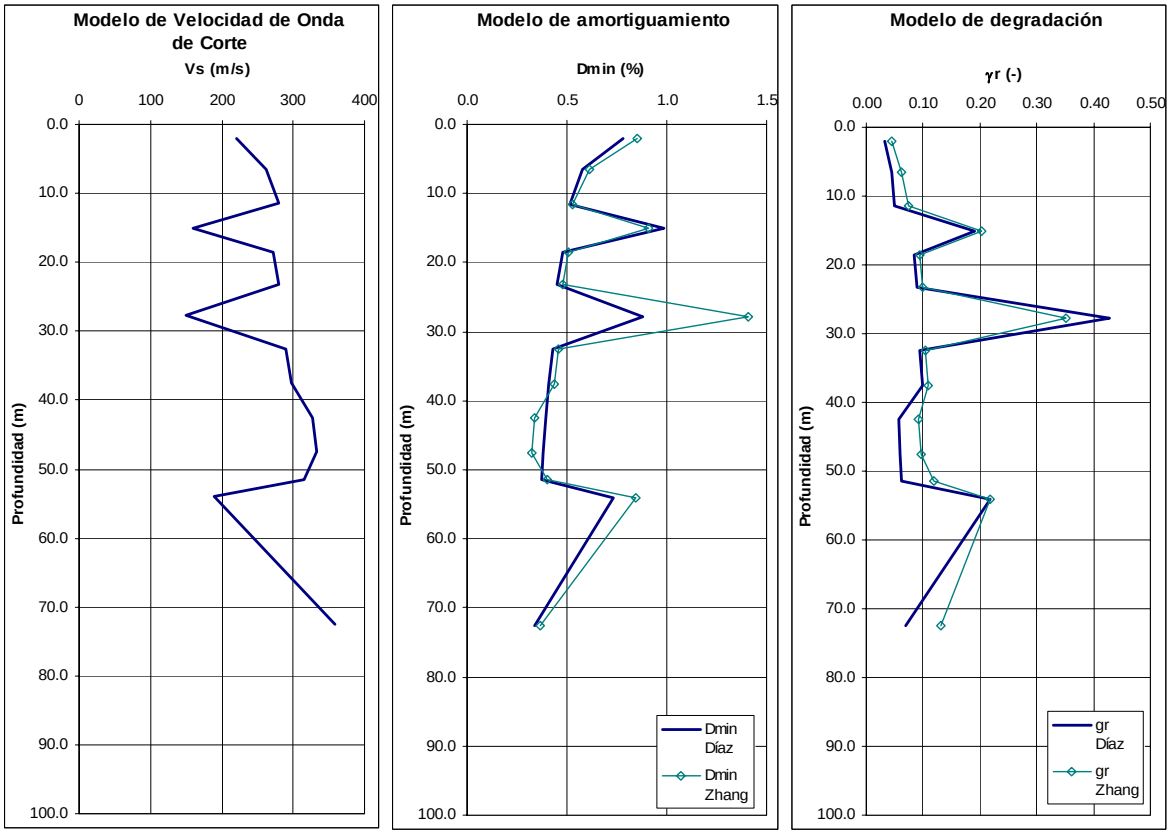



Figura 71. Variación de las propiedades dinámicas adoptadas en CGRAL

En la Figura 72 se presenta los resultados obtenidos para el sismo de Quetame en términos de aceleración espectral y relación espectral.

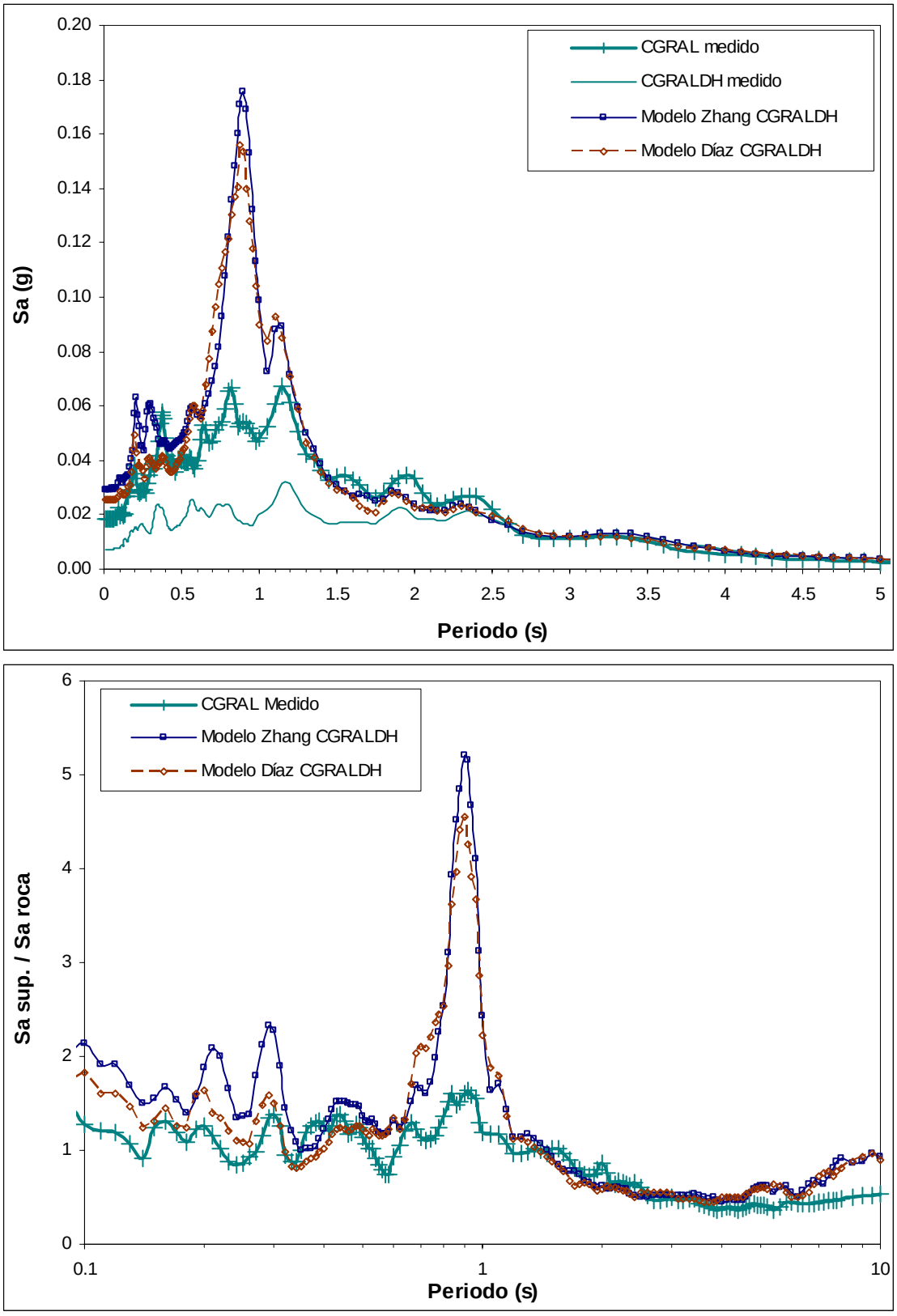



Figura 72. Espectro de respuesta y relaciones espectrales medidas y modeladas en CGRAL

### 5.3.4 Síntesis de resultados

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

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

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

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

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

## 5.4 ESPECTROS DE RESPUESTA DE LAS SEÑALES DE DISEÑO EN LOS SITIOS CALIBRADOS

Una vez realizada la calibración de los sitios con Down Hole se procedió a modelar la respuesta sísmica a los niveles de amenaza sísmica recomendados en el proyecto de actualización de la microzonificación sísmica con cuatro de las señales recomendadas para definir el espectro de diseño, de este manera se empleó para la fuente cercana la señal “Coalinga a 0.19g”, para la fuente regional “Deer Canyon a 0.16g” y para la fuente lejana las señales de “Xantinguis a 0.038g” y “México a 0.038g”, los espectros de respuesta de las señales empleadas se ilustran en la Figura 73.

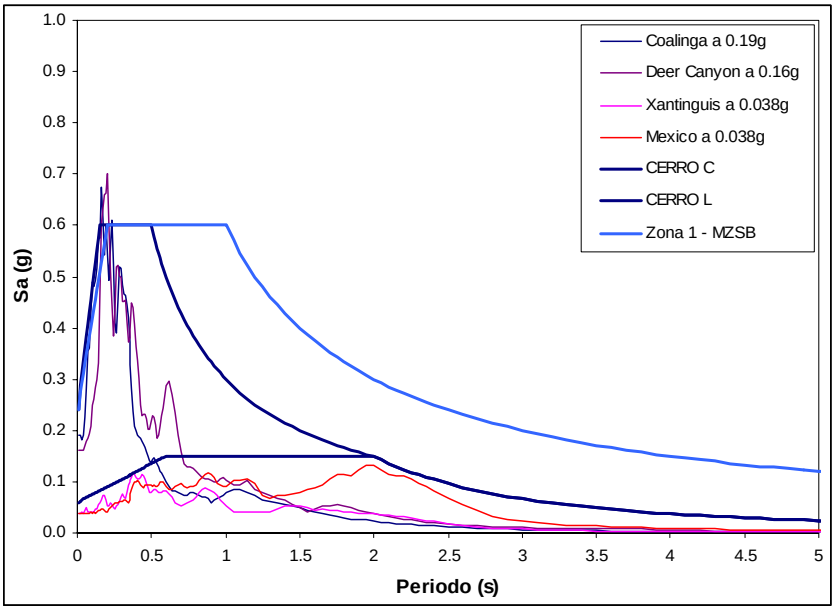



Figura 73. Espectro de respuesta de señales de diseño modeladas

De la Figura 74 a la Figura 76 se presentan los espectros de respuesta y relaciones espectrales de las señales de diseño empleadas en los análisis para los 3 sitios calibrados y se comparan con los espectros de diseño del sitio de la Microzonificación Sísmica de Bogotá (1997) y con la propuesta preliminar de actualización de la Microzonificación (2008).

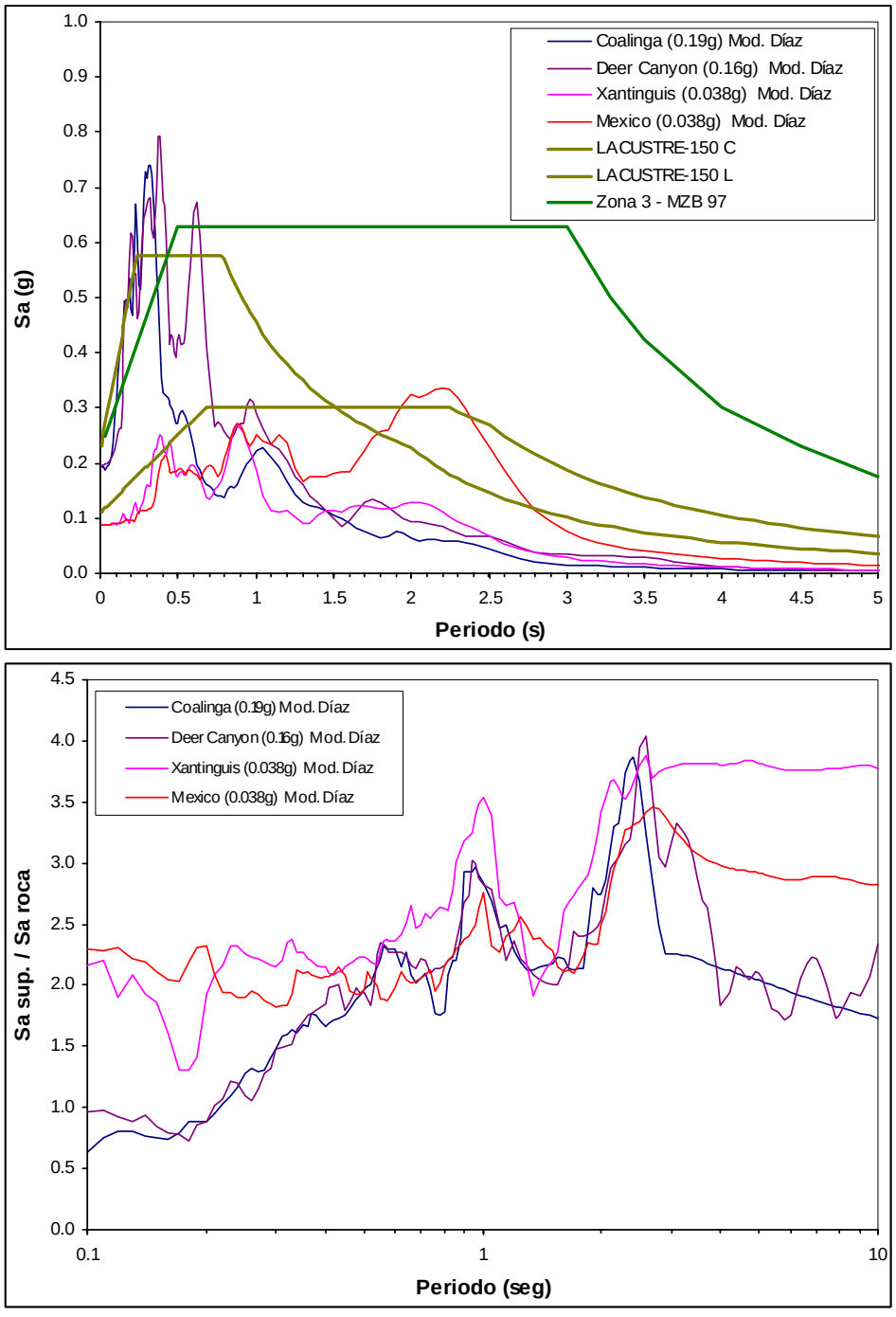
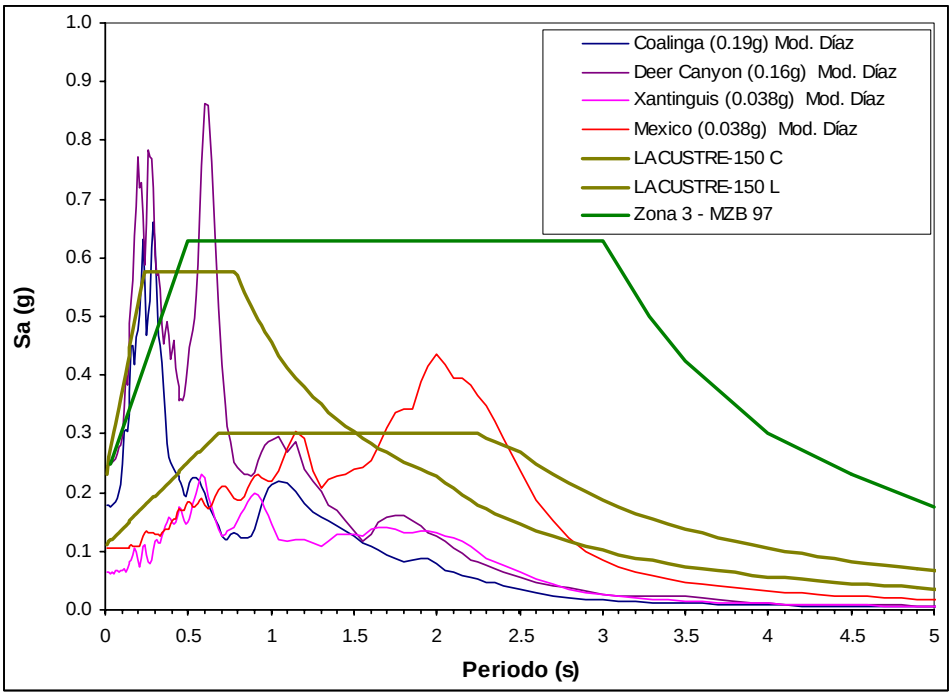



Figura 74. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CUAGR



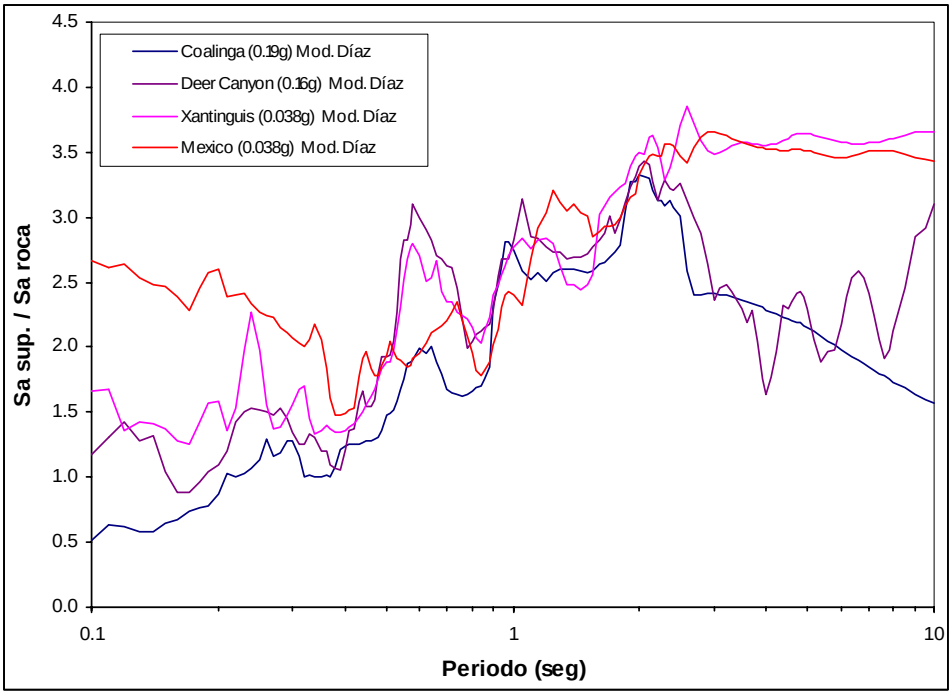




Figura 75. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CBOG1

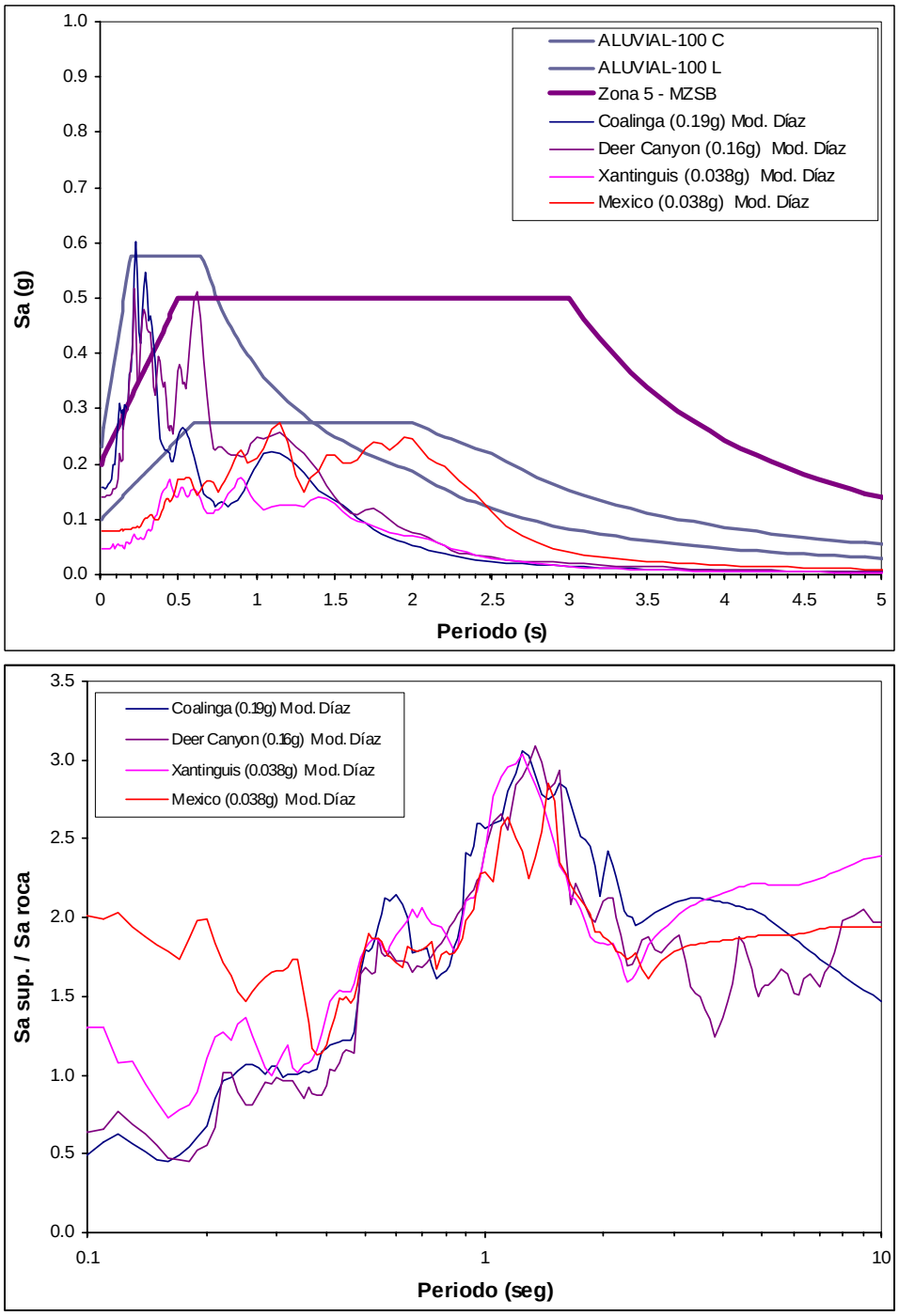



Figura 76. Espectro de respuesta y relaciones espectrales de señales de diseño en CGRAL

A partir de los resultados de las modelaciones de las señales de diseño se destacan los siguientes aspectos:

- Los espectros de respuesta de las señales de diseño empleadas en los presentes análisis tienen un contenido frecuencial dominante para las señales de la fuente cercana y regional en los periodos bajos y las señales de la fuente lejana en periodo alto. La señal del México tiene un contenido frecuencial al parecer demasiado alto para los 2 segundos de periodo, lo cual fue revisado por la SCG (2007) concluyendo que esta señal es particular de la zona de subducción de México y no debe emplearse para modelar la zona de subducción del Pacifico Colombiano, sin embargo

se presentan los resultados obtenidos con esta señal para poder ver la situación más critica y poder comparar los resultados con la microzonificación vigente donde emplearon esta señal.

- La respuesta espectral obtenida en cada uno de los sitios modelados demuestra que los espectros de diseño vigentes de la microzonificación sísmica no representan adecuadamente la respuesta espectral de estos sitios, la prolongada meseta de los espectros vigentes no corresponde a la respuesta espectral de estos depósitos, a pesar de emplearse la misma señal del sismo México a la cual se atribuyó tal efecto. Lo anterior ratifica que los aspectos más importantes en los análisis de respuesta de sitio son las propiedades y modelos de comportamiento dinámicos que se empleen, los cuales se obtienen con mayor confiabilidad a partir de la instrumentación sísmica.

- Los resultados obtenidos se ajustan bastante bien a los espectros de diseño de la propuesta de actualización que se dividen en fuente cercana “C” y fuente lejana “L”. Sin embargo se observa que se deben realizar algunos ajustes menores como por ejemplo en la zona lacustre puede ser ligeramente mayor la amplificación en los periodos altos y en la zona aluvial puede ser menor la amplificación en los periodos cortos.

- En cuanto a las relaciones espectrales de las señales de diseño se observa en general amplificaciones en la zona lacustre hasta de 4 veces y para la zona aluvial de 3 veces. Es importante tener en cuenta que los niveles de amplificación son bajos en comparación con los medidos por la RAB porque los niveles de aceleración de diseño son muy superiores a los registrados en la RAB lo que ocasiona mayor degradación y amortiguamiento, por ende menores amplificaciones cuanto mayor sea la intensidad de la señal.

- Los resultados de los tres sitios calibrados con los registros del sismo Quetame son representativos del comportamiento dinámico de estos depósitos, puesto que se tuvo en cuenta en cada modelo las propiedades dinámicas estimadas a partir de los registros obtenidos, que son compatibles con las propiedades medidas in situ y reportadas en estudios recientes, y modelos de comportamiento dinámico recientemente desarrollados que tienen en cuenta el confinamiento, aspecto fundamental en la evaluación de la respuesta sísmica de depósitos profundos.

CAPITULO 6

# 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 CONCLUSIONES

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

A partir de la información procesada se compiló por cada año el catálogo de eventos registrados con 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 manera complementaria al catálogo de eventos, se diseñaron e implementaron fichas de registro histórico de eventos medidos en cada una de las estaciones de la RAB, con el fin de poder comparar de manera rápida todos los eventos registrados en un sitio determinado en términos de espectros de respuesta y espectros de respuesta normalizados por la aceleración máxima de la señal.

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

A la fecha se ha registrado 33 eventos sísmicos en la RAB, con valores de aceleración máxima registrada en superficie para la mayoría de eventos inferiores a 5 Gales, algunos casos con aceleraciones entre 5 y 10 Gales y en el evento del 24 de mayo de 2008 en el municipio de Quetame Cundinamarca, presentó una aceleración máxima del orden de 50 Gales (incluyendo efectos de sitio).

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

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

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

El realizar el monitoreo sísmico de la ciudad mediante una red de acelerógrafos brinda información muy valiosa, la cual es fundamental para mejorar el conocimiento del comportamiento de los suelos de la ciudad ante la ocurrencia de sismos fuertes, de no contar con la instrumentación sísmica nos sería muy difícil acércanos al conocimiento real de los depósitos y por ende de la amenaza sísmica.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Con base en los análisis y resultados presentados en el presente estudio se resumen a continuación las recomendaciones para el proyecto de actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá.

### 6.2.1 Generales

Realizar modelaciones de respuesta en cada una de las zonas de respuesta sísmica homogénea propuestas en la actualización de la microzonificación sísmica, aplicando las propiedades dinámicas y modelos de comportamientos empleados en la calibración de los sitios con Down Hole.

Realizar algunas modelaciones bidimensionales aplicado 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.

De acuerdo con los resultados presentados se recomienda ajustar el mapa de iso-periodos fundamentales y las zonas de respuesta sísmica homogénea propuestas en la actualización de la microzonificación sísmica, para tener en cuenta los diferentes tipos de respuestas presentadas en los piedemontes y la existencia de una zona de transición entre la zona lacustre y aluvial.

Fortalecer la instrumentación sísmica en la ciudad, principalmente en las zonas de piedemonte y cerros con estaciones de acelerógrafos con sensores Down hole en contacto con el basamento rocoso, en el sector de la autopista norte entre las calles 100 y 127, en medio de los cerros de suba y orientales, puesto que una estación en este sitio facilitaría la determinación de los mapas de iso-aceleraciones e iso-periodos y en los sectores de transición entre la zona aluvial y lacustre.

### 6.2.2 Señales de diseño y espectros de diseño

Al comparar las señales corregidas por confinamiento registradas en los Down Hole de CUAGR y CBOG1 con los registros en campo libre obtenidos en las estaciones en roca se observó que siempre se presentan efectos de sitio asociados a la topografía del terreno, ocasionando en los registros en roca superficial la amplificación en los periodos bajos y de-amplificación en los periodos altos. Este efecto observado en las señales en roca superficial se debe revisar cuidadosamente y tener en cuenta cuando se emplean señales de diseño que correspondan a registro de roca superficial, puesto que se puede incurrir en sobrevalorar la respuesta en los periodos bajos en las zonas de piedemonte y suelos duros de poco espesor y subvalorarla en los periodos altos en las zonas de suelos blandos o duros de gran espesor.

Se recomienda como método alterno para obtener la respuesta de sitio en superficie trabajar con espectros uniformes de amenaza y señales compatibles con la amenaza sísmica de cada fuente sísmica, de manera tal que se determine para cada perfil analizado su respuesta en términos de relaciones espectrales promedio, finalmente la respuesta de sitio se obtendrá al multiplicar espectralmente el espectro uniforme de amenaza de cada fuente por la relación espectral del perfil de suelo, de esta manera se pretende “limpiar” el efecto de las señales de diseño y lograr así mejores resultados.

### 6.2.3 Zona de Cerros

En la zona de cerros se presenta una amplificación importante en los periodos bajos y de-amplificaciones de los periodos altos por efecto de la topografía del terreno, estos aspectos deben ser claramente diferenciados en la definición de espectros

de diseño, ya que suele confundirse esta zona con los espectros de roca en campo libre o el espectro uniforme de amenaza, los cuales no tienen en cuenta el efecto topográfico.

### 6.2.4 Zona de Piedemonte

Los registros de la RAB muestran la presencia de tres zonas de piedemonte con comportamientos diferentes, se recomienda subdividir el piedemonte en: zona norte que limita con la zona lacustre, zona central que domina suelos duros aluviales, y zona sur que comprende la parte apical del complejo de conos del Río Tunjuelo.

### 6.2.5 Zona Lacustre

En la zona lacustre se recomienda tener en cuenta que los modelos de respuesta unidimensionales sobreestiman la respuesta en los periodos bajos y subestiman en los periodos altos, por lo cual se recomienda realizar modelos bidimensionales o de manera cualitativa corregir los resultados por el efecto de la forma del basamento rocoso y las ondas superficiales que se generan.

### 6.2.6 Zonas Aluviales

En la zona aluvial se recomienda tener en cuenta que los modelos de respuesta unidimensionales pueden llegar sobreestimar la respuesta en los periodos bajos y en el primer modo de vibración, por lo cual se recomienda de manera cualitativa corregir los resultados.

# 7 BIBLIOGRAFÍA

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

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

Bardet et al (2000). EERA Equivalent – Linear Earthquake site response Analysis of Layered Soil Deposits.

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

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

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

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

DPAE Dirección de Prevención y atención de Emergencias (2008). Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá. Informe interno Subdirección de Investigación y Desarrollo.

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

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

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

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

INGEOMINAS & UNIANDES, (1997). Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Publicaciones especiales INGEOMINAS. Bogotá.

INGEOMINAS, (2008). Sismo de Quetame del 24 de Mayo de 2008. Aspectos sismológicos y evaluación preliminar de Daños. Informe preliminar No 2.

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

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

Matasovic N., Vucetic M., (1995). Seismic response of soil deposits composed of fully-saturated clay and sand layers. Earthquake geotechnical engineering. Ishihara. Rotterdam. pp 611-616.

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

Park D., Hashash Y., (2004). Evaluation of seismic site effects in the Mississipi embayment. I Estimation of dynamic properties. Soil dynamic and earthquake engineering, pp 133-144.

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

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

UNIANDES Universidad de los Andes, (2002). Procesamiento e interpretación de la información sísmica de Bogotá.

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

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