

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS DEL CAMPUS DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER SEDE BUCARAMANGA –
COLOMBIA

FAUSTO RAMÓN GÓMEZ CAMARGO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2007

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS DEL CAMPUS DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER SEDE BUCARAMANGA –
COLOMBIA

FAUSTO RAMÓN GÓMEZ CAMARGO

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Directora

ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Ingeniera Civil, MSc

Profesora Adscrita a la Escuela de Ingeniería Civil-UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2007

A mis padres que con su esfuerzo, apoyo y amor constante, me han permitido salir adelante. A dios por ser el guía de mi vida.

Fausto Gómez Camargo

AGRADECIMIENTOS

Al la profesora Esperanza Maldonado por ser la guía de este trabajo y darme la oportunidad de participar en él.

A mis padres y hermanos que de una forma u otra siempre estuvieron apoyándome en los momentos más difíciles.

A Edith Acero por su compañía y motivación para ser una excelente persona.

Al personal del grupo de investigación INME y auxiliares por su colaboración.

A todas las personas que una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.

A todos ellos gracias.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

| | |
|--|----|
| 0. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1. METODOLOGÍA Y MARCO GENERAL..... | 2 |
| 1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO..... | 2 |
| 1.1.1 Influencia de la Fuente..... | 2 |
| 1.1.2 Influencia de la Trayectoria..... | 3 |
| 1.1.3 Influencia del Suelo..... | 5 |
| 1.2 MÉTODOS PARA EVALUAR CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO..... | 8 |
| 1.2.1 Métodos Activos..... | 9 |
| 1.2.2 Métodos Pasivos..... | 12 |
| 1.3 SELECCIÓN Y PLANTEO DEL MÉTODO A EJECUTAR..... | 24 |
| 1.3.1 Técnica de Nakamura..... | 25 |
| 1.3.2 Resultados de Nakamura..... | 33 |
| 1.4 TRABAJO DE CAMPO Y ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 34 |
| 1.5 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... | 35 |
| 1.6 VALIDACIÓN DE RESULTADOS..... | 35 |
| 2. EQUIPO..... | 37 |
| 2.1 GENERALIDADES..... | 37 |
| 2.2 SENSORES..... | 39 |
| 2.2.1 Principio Básico de Funcionamiento..... | 40 |
| 2.2.2 Características Predominantes..... | 42 |
| 2.2.2.1 El Rango de Frecuencias de Operación (Ancho De Banda)..... | 42 |
| 2.2.2.2 La Sensibilidad..... | 43 |
| 2.2.2.3 El Rango Dinámico..... | 43 |
| 2.2.3 Sismómetros y Acelerómetros..... | 44 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.3 | AMPLIFICADORES..... | 46 |
| 2.4 | SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 47 |
| 2.4.1 | Sistema Convertidor Analógico – Digital..... | 48 |
| 2.5 | EQUIPO EMPLEADO..... | 52 |
| 2.5.1 | Modos de Operación del Equipo UIS..... | 54 |
| 3 | SEÑAL..... | 56 |
| 3.1 | DOMINIO DE LA SEÑAL..... | 57 |
| 3.2 | TIPOS DE SEÑALES..... | 58 |
| 3.2.1 | Señales Analógicas..... | 58 |
| 3.2.2 | Señales Digitales..... | 59 |
| 3.3 | SISTEMAS DE SEÑALES..... | 60 |
| 3.4 | FILTRADO DE LA SEÑAL..... | 61 |
| 3.4.1 | Tipos de Filtros..... | 61 |
| 3.4.1.1 | Pasa Bajas..... | 62 |
| 3.4.1.2 | Pasa Altas..... | 62 |
| 3.4.1.3 | Pasa Banda..... | 64 |
| 3.5 | CONVERSIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS A SEÑALES DIGITALES..... | 65 |
| 3.5.1 | Muestreo de Señales..... | 66 |
| 3.5.1.1 | Elección de la Frecuencia de Muestreo..... | 67 |
| 3.5.2 | Filtro Anti-Aliasing..... | 68 |
| 3.5.3 | Rangos de Frecuencia..... | 68 |
| 3.6 | CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE..... | 69 |
| 3.7 | USO DE VENTANAS: TAPERING..... | 70 |
| 3.8 | SUAVIZADO DEL ESPECTRO..... | 72 |
| 4 | MEDICIÓN..... | 73 |
| 4.1 | PARÁMETROS DE INSTALACIÓN Y ADQUISICIÓN..... | 73 |
| 4.1.1 | Instalación del Sensor..... | 75 |
| 4.1.2 | Consideración de Señal..... | 77 |
| 4.2 | SELECCIÓN DE SITIOS..... | 78 |
| 4.3 | DURACIÓN Y CANTIDAD DE LAS MUESTRAS..... | 82 |
| 4.4 | CONDICIONES AMBIENTALES Y PERIODO DEL DÍA..... | 85 |
| 4.5 | PARÁMETROS CONSIDERADOS..... | 87 |
| 4.5.1 | Sitios de Medición..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| 5 PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS..... | 92 |
| 5.1 GENERALIDADES..... | 92 |
| 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS..... | 95 |
| 5.2.1 Exploración Preliminar..... | 97 |
| 5.2.1.1 Sitio N° 1 Canchas Micro football..... | 97 |
| 5.2.1.2 Sitio N° 2 Diamante..... | 98 |
| 5.2.1.3 Sitio N° 3 Cancha de Football..... | 99 |
| 5.2.1.4 Sitio N° 6 Gallera..... | 100 |
| 5.2.2 Exploración con Acelerómetro y K2..... | 101 |
| 5.2.2.1 Registro A..... | 101 |
| 5.2.2.2 Registro B..... | 102 |
| 6 VALIDACIÓN..... | 104 |
| 6.1 COLUMNA LITOLÓGICA..... | 105 |
| 6.2 DIAGRAMAS DE MÓDULO CORTANTE Y AMORTIGUAMIENTO..... | 106 |
| 6.3 SISMO DE ENTRADA..... | 112 |
| 6.4 VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE..... | 113 |
| 6.5 RESULTADOS..... | 113 |
| 7 CONCLUSIONES..... | 116 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 118 |
| ANEXO A..... | 125 |
| ANEXO B..... | 143 |
| ANEXO C..... | 154 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Comparación de resultados de frecuencia obtenidos por refracción y HVSR..... | 33 |
| Tabla 2. Características del equipo UIS..... | 53 |
| Tabla 3. Duración recomendada de grabación..... | 85 |
| Tabla 4. Parámetros generales para procesado de muestras con Jsesame..... | 95 |
| Tabla 5. Perfil del Subsuelo en el sector Parque de los Niños..... | 106 |
| Tabla 6. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro órganos..... | 107 |
| Tabla 7. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro Gravoso..... | 108 |
| Tabla 8. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro Limos Rojos..... | 108 |
| Tabla 9. Velocidades de corte de los estratos presentes en el subsuelo..... | 113 |
| Tabla 10. Resultados..... | 115 |
| Tabla 11. Parámetros de selección de ventanas..... | 137 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Diagrama de las ondas generadas por el movimiento vibratorio del terreno registrado en un punto..... | 3 |
| Figura 2. Ondas sísmicas. Esquema de la propagación de la Onda P y onda S.... | 7 |
| Figura 3. Ondas sísmicas. Esquema de la propagación de la onda Rayleigh y la onda Love..... | 8 |
| Figura 4. Técnica tradicional para determinar los efectos de sitio por la función De transferencia..... | 28 |
| Figura 5. Técnica que utiliza el ruido ambiental para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia..... | 29 |
| Figura 6. Espectro sísmico..... | 38 |
| Figura 7. Sistema de adquisición de datos basado en PC..... | 39 |
| Figura 8. Esquema de funcionamiento de un sismómetro..... | 40 |
| Figura 9. Esquema de funcionamiento de un sensor electromagnético..... | 42 |
| Figura 10. Sismómetros..... | 45 |
| Figura 11. Acelerómetros..... | 46 |
| Figura 12. Representación grafica de una señal..... | 58 |
| Figura 13. Representación esquemática de sistema de señales..... | 60 |
| Figura 14. Esquema del circuito para filtro pasa bajas..... | 62 |
| Figura 15. Esquema de filtro pasa bajas..... | 63 |
| Figura 16. Esquema del filtro pasa altas..... | 63 |
| Figura 17. Esquema del circuito para filtro pasa banda..... | 64 |
| Figura 18. Esquema de filtro pasa bandas..... | 65 |
| Figura 19. Muestreo de señales Incorrecto..... | 67 |
| Figura 20. Representación gráfica del proceso de corrección de línea base..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| Figura 21. Tipos de ventanas para aplicar el tapering..... | 72 |
| Figura 22. Ubicación de los sitios de medición de la exploración preliminar..... | 89 |
| Figura 23. Ubicación de los sitios de medición de la exploración con Acelerómetro y K2..... | 90 |
| Figura 24. Panorámica de la meseta de la ciudad de Bucaramanga en dirección Norte-Sur..... | 91 |
| Figura 25. Plano de ubicación de los sitios en los que se presentan resultados preliminares..... | 97 |
| Figura 26. Razón espectral del sitio 1, Canchas de Micro Football..... | 98 |
| Figura 27. Razón espectral del sitio 2, Diamante..... | 99 |
| Figura 28. Razón espectral del sitio 4, Cancha de Football..... | 100 |
| Figura 29. Razón espectral del sitio 6, Gallera..... | 101 |
| Figura 30. Razón espectral del registro A..... | 102 |
| Figura 31. Razón espectral del registro B..... | 103 |
| Figura 32. Perfil litográfico general de la ciudad de Bucaramanga..... | 105 |
| Figura 33. Perfil Litológico del subsuelo de la Universidad Industrial de Santander..... | 107 |
| Figura 34. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Órganos (Formación Bucaramanga)..... | 109 |
| Figura 35. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Gravoso (Formación Bucaramanga)..... | 110 |
| Figura 36. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Limos Rojos (Formación Bucaramanga)..... | 111 |
| Figura 37. Acelerogramas compatibles con fallas en Bucaramanga..... | 112 |
| Figura 38. Amplificación del depósito de suelo en el campus de la Universidad Industrial de Santander..... | 114 |
| Figura 39. Menú config..... | 132 |
| Figura 40. Panel para la configuración manual de la ventana..... | 132 |
| Figura 41. Panel para la configuración de la selección automática de la Ventana..... | 133 |
| Figura 42. Modulo que procesa la razón espectral H/V..... | 133 |

| | |
|---|-----|
| Figura 43. Configuración de los filtros a usar antes de aplicar la FFT..... | 134 |
| Figura 44. Configuración de parámetros generales..... | 134 |
| Figura 45. Panel Principal y estructura de los archivos en forma de árbol..... | 135 |
| Figura 46. Señal procesada con o sin la selección automática de la ventana..... | 138 |
| Figura 47. Panel principal y señales graficadas..... | 141 |
| Figura 48. Ubicación de la caja de comprobación “Manual Windows Selection”. | 141 |
| Figura 49. Opciones para la selección automática de ventanas..... | 142 |
| Figura 50. Configuración de parámetros para el cálculo de la razón espectral H/V..... | 142 |
| Figura 51. Terminología usada en el análisis de respuesta de sitio..... | 143 |
| Figura 52. Menú de complementos de EXCEL..... | 144 |
| Figura 53. Menú desplegable de EERA. Después de la instalación satisfactoria de EERA, su menú aparece en los menús desplegables..... | 145 |
| Figura 54. Diferencia relativa de la aceleración calculada por EERA y SHAKE91..... | 152 |
| Figura 55. Diferencia relativa del esfuerzo cortante máximo y la máxima aceleración entre SHAKE91 y EERA..... | 153 |

RESUMEN

TITULO:

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER SEDE BUCARAMANGA – COLOMBIA *

AUTOR:

Fausto Ramón Gómez Camargo **

PALABRAS CLAVES:

Caracterización dinámica, HVSR, microtremor, Nakamura, ondas superficiales, razón espectral, SESAME, SHAKE91.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se realiza la caracterización dinámica del campus de la universidad industrial de Santander con un área aproximada de 337.000 m², ubicada en la ciudad de Bucaramanga del departamento de Santander. La caracterización dinámica se lleva a cabo usando la técnica de Nakamura propuesta en el año 1989. La técnica se fundamenta en la evaluación de la función de transferencia de depósitos de suelo blando a partir de mediciones en superficie de ondas de bajo contenido frecuencial denominadas microtremors. La caracterización dinámica de un suelo asiste para la construcción de edificaciones más seguras, ante la acción de un sismo ya que define la amplificación de la magnitud de un sismo generada por depósitos de suelos blandos.

En el estudio se realizaron mediciones de microtremors en varios sitios del campus con el uso de un sismómetro y un acelerómetro triaxiales. En el documento se presenta la metodología a seguir para obtener señales de microtremors optimas, esta incluyen condiciones del terreno, clima y configuración del equipo. Las señales obtenidas se procesaron con software especializado, el cual proporcionó los resultados que fueron comparados con el modelo lineal equivalente para su validación. El modelo lineal fue generado con el programa SHAKE91, para esto fue necesario conocer el perfil litológico del deposito de suelo.

Se comprobó que la técnica de Nakamura es una herramienta práctica para evaluar periodos fundamentales y factor de amplificación de depósitos de suelo blando, pero esta condicionada a la metodología empleada para registrar las señales. Los resultados muestran que tanto acelerómetros como sismómetros son aplicables a esta práctica. Se obtuvieron periodos del orden de los 0.3 segundos y factores de amplificación de la superficie con respecto al basamiento rocoso de 1.6 veces.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Director:
MALDONADO RONDÓN, Esperanza

ABSTRACT

TITLE:

DYNAMIC CHARACTERIZATION OF GROUNDS OF THE CAMPUS OF THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF HOST SANTANDER BUCARAMANGA - COLOMBIA *

AUTHOR:

Fausto Ramón Gómez Camargo **

KEY WORDS:

Dynamics characteristic, HVSR, microtremor, Nakamura, SESAME, SHAKE91, spectral ratio, superficial waves.

DESCRIPTION:

In the present work make the dynamic characterization of the campus of the industrial university of Santander with an approximated area of 337,000 m², located in the city of Bucaramanga of the department of Santander. The dynamic characterization is carried out using the technique of propose Nakamura in 1989. The technique is based on the evaluation of the function of transference of soft ground deposits to start off of measurements in surface of waves of low frecuencial content denominated microtremors. The dynamic characterization of a ground attends for the construction of safer constructions, before the action of an earthquake since it defines the amplification of the magnitude of an earthquake generated by soft ground deposits.

In the study measurements of microtremors in several sites of the campus with the three-dimensional use of seismometer were made and an accelerometer. In the document the methodology appears to follow to obtain signals of optimal microtremors, this includes terrain conditions, climate and configuration of the equipment. The obtained signals were processed with specialized software, which provided the results that were compared with the equivalent linear model for their validation. The linear model was generated with program SHAKE91, for this was necessary to know the profile litologic I deposit of ground.

It was verified that the technique of Nakamura is a tool practical to evaluate fundamental periods and factor of amplification of soft ground deposits, but this conditional one to the used methodology to register the signals. The results show that as much accelerometers as seismometers they are applicable to this practice. The 0,3 seconds and factors of amplification of the surface with respect to the rocky basamiento of 1,6 times were obtained periods of the order of.

* Degree Project.

** Faculty of physical-Mechanical Engineerries, Civil Engineering, MALDONADO RONDÓN, Esperanza

INTRODUCCIÓN

Las condiciones geotécnicas y geológicas locales del terreno desempeñan un papel importante en las características dinámicas del movimiento sísmico resultante en superficie. La amplificación de la magnitud sísmica en depósitos de suelo sedimentario también denominada *efecto local*, es una característica dinámica y depende básicamente de la naturaleza de los estratos del suelo.

La necesidad de evitar desastres obliga a construir edificaciones resistentes a los efectos sísmicos amplificados, pero evaluar estas amplificaciones de forma ideal requiere registrar movimientos sísmicos fuertes es mediante el uso de acelerómetros ubicados en superficie en el sitio de interés y uno más en el basamento rocoso al momento de producirse un sismo, lo cual es costoso y poco probable. Estos inconvenientes se solucionaron con la metodología propuesta por Nakamura en 1989, la cual propone medir vibraciones ambientales solo en superficie y en cualquier momento, y a partir de estas mediciones determinar la amplificación del suelo.

Este proyecto trata del estudio de la modificación de la señal sísmica, desde el basamento rocoso hasta la superficie, en el campus de la Universidad Industrial de Santander, para esto se define la función de transferencia de los suelos del campus, cuantificando la amplificación y la banda de frecuencias asociada a dicha amplificación a partir del registro de señales de vibración ambiental y aplicando la técnica de Nakamura.

En el primer capítulo se realiza una revisión teórica de los métodos más importantes disponibles para este fin. En el capítulo 2 y 3 se presentan las principales características de los equipos y señales usadas. En el capítulo 4 se encuentran los parámetros empleados para la medición y las mediciones realizadas. En el capítulo 5 se enseñan los resultados obtenidos y los procesos realizados sobre las señales. En el capítulo 6 los resultados son comparados con datos obtenidos por modelamiento lineal equivalente unidimensional, generados con el programa SHAKE91 acoplado en una hoja de cálculo que hace de interfase.

1. METODOLOGÍA Y MARCO GENERAL

1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO

El movimiento del suelo registrado en un punto es el resultado de la combinación de tres factores: proceso de excitación de la fuente, propagación de las ondas a través del medio y efecto del suelo en el emplazamiento.

1.1.1 Influencia de la fuente

Los terremotos son producidos por el movimiento relativo de dos partes de una fractura de la corteza terrestre, causado por una acumulación de esfuerzos en la misma. Los fenómenos sísmicos se presentan entonces asociados a las fallas geológicas, idea que es comúnmente aceptada en la actualidad, no sólo porque permite explicar satisfactoriamente el origen de la radiación generada por un terremoto, sino por la evidencia de correlación entre epicentros y fallas observadas en muchas regiones de la superficie terrestre. Partiendo de esta idea, se han propuesto en las últimas décadas diversos modelos físico-matemáticos con el fin de explicar el origen de la radiación. El primero de ellos es conocido como teoría del rebote elástico. Según ella un terremoto tectónico tiene lugar al acumularse esfuerzos de cizalla en un punto de la corteza terrestre, iniciándose la fractura cuando la tensión sobrepasa el límite de resistencia del material. Esta se propaga sobre toda la superficie de la fractura con velocidad menor a la de las ondas de cizalla del medio. Los que se relacionan finalmente con el movimiento relativo de las placas tectónicas.

Posteriormente se han ido desarrollando otros modelos para explicar el origen de la radiación, cuya aplicabilidad depende de que las observaciones se realicen en campo próximo o lejano y de la configuración fuente-medio-estación para cada caso particular.

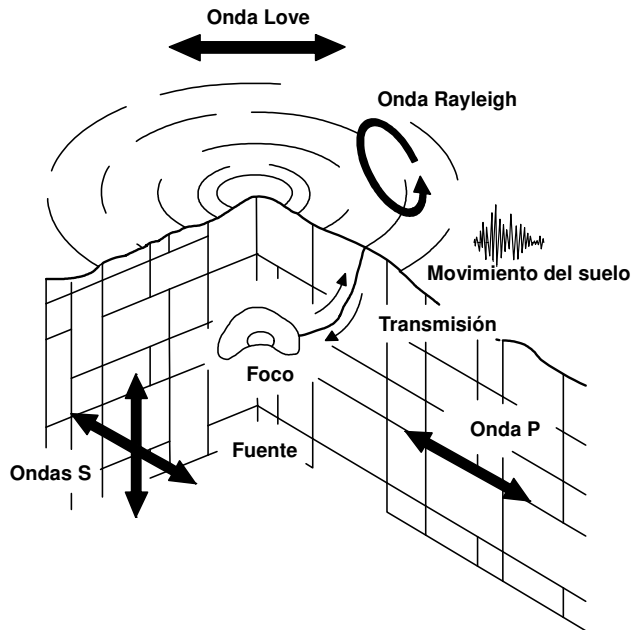


Figura 1. Diagrama de las ondas generadas por el movimiento vibratorio del terreno registrado en un punto (fuente-medio-estación).

1.1.2 Influencia de la trayectoria

En la interpretación de registros del movimiento del suelo y predicción del mismo, hay que considerar la propagación de las ondas a través del medio situado entre la fuente y el punto de observación.

Desde su origen en el foco hasta su recepción en el emplazamiento, la radiación sufre una atenuación con la distancia que depende, fundamentalmente, de las características geométricas del frente de ondas y de las propiedades físicas del terreno a través del cual se propaga. (Figura 2)

Estos factores tienen influencia no sólo en las amplitudes pico del movimiento, sino también en su composición espectral y en la duración del movimiento.

Dependiendo de que la observación se realice en campo cercano o lejano, las ondas recorrerán distintas trayectorias y los fenómenos que intervienen en la propagación serán también diferentes.

Por una parte, este efecto influye decisivamente en el orden de frecuencias dominantes de la agitación. A cortas distancias, las ondas se propagan a través de

la corteza, que es menos disipativa que el manto superior para las altas frecuencias, mayores de 1 Hz. En contraposición, en campo lejano el espectro aflora desplazado hacia las bajas frecuencias, debido a que para este tipo de observaciones las ondas se propagan fundamentalmente a través del manto, que actúa como filtro de las altas frecuencias. La frecuencia de corte, f_{max} , se sitúa entonces cerca de 1 Hz para las ondas P y de 0.25 Hz para las ondas S. Es, por tanto, bastante clara la influencia de la trayectoria en lo referente al contenido frecuencial del movimiento.

Por otra parte, la energía es disipada en su recorrido, produciéndose una atenuación de la amplitud con la distancia, debido básicamente a tres factores:

- Expansión geométrica del frente de ondas.
- Absorción inelástica del medio que separa la fuente del lugar de registro.
- Dispersión y difusión de las ondas por pequeñas heterogeneidades del terreno.

En un medio homogéneo se pueden considerar los efectos de expansión geométrica y de atenuación inelástica.

La expansión geométrica depende fundamentalmente de la profundidad del foco y de la distancia epicentral, que determinan las características del frente de ondas. Si el medio se considera homogéneo e isotrópico y elástico, la energía debe conservarse en los diferentes frentes de ondas. Estos avanzan aumentando su superficie, por lo que la amplitud correspondiente a cada punto disminuye a medida que nos alejamos del foco. La atenuación inelástica es debida a las imperfecciones de la elasticidad del medio en el que se propagan las ondas así como a las heterogeneidades contenidas.

Con todo ello, la estimación directa de la atenuación inelástica que experimentan las ondas requiere, en principio, conocer de forma detallada la estructura atravesada por las mismas. En un planteamiento determinista del problema, si el

medio no puede considerarse homogéneo e isótropo, sería necesario conocer un gran número de parámetros para evaluar su capacidad de absorción y dispersión; parámetros tales como contraste de velocidades y espesores, tamaño de las heterogeneidades, estructuras de fallas, etc., que influyen en la amplitud de las ondas dependiendo de su frecuencia.

La multitud de caminos que recorren las ondas a través de una litosfera heterogénea puede contribuir a un aumento de la duración del movimiento registrado en un punto, respecto al generado en la fuente. Este hecho puede tener una importante repercusión en los efectos del terreno, ya que como se indicó anteriormente, la duración es un factor determinante en el daño causado a las estructuras.

Concluyendo, la comprensión de los procesos de generación y propagación de ondas sísmicas en cada región es recomendable a la hora de predecir las características del movimiento esperado en la misma.

1.1.3 Influencia del suelo

El tercer factor que influye en el movimiento registrado en un punto es el tipo de suelo bajo la estación de registro, factor que, junto con la topografía, pueden causar efectos de atenuación o amplificación de las ondas incidentes sobre la base rocosa. Esto está demostrado en un gran número de estudios dedicados a evaluar la función de transferencia del suelo como Alfaro, 1999; Bodin et al, 2000; Fernández et al, 2000; entre otros. Este efecto es de gran importancia en los daños de las obras civiles, ya que la amplificación por resonancia que aparece en medios estratificados con rigidez creciente con la profundidad y resulta de la superposición de múltiples reflexiones dentro de los estratos de baja velocidad próximos a la superficie puede ser elevada y generar grandes desastres. Su efecto depende fundamentalmente de la frecuencia. El segundo tipo de amplificación no requiere de las discontinuidades bruscas donde tienen lugar fenómenos de

reflexión; se trata de un efecto conocido como contraste de impedancia, este debido a la baja impedancia de los materiales próximos a la superficie y la alta impedancia en los estratos rocosos.

La característica completa del efecto del emplazamiento requiere considerar tres aspectos fundamentales:

- Composición y espesor de los estratos situados sobre la base rocosa, bajo el lugar de estudio, que configuran las condiciones locales del suelo.
- Variaciones laterales de la estructura geológica donde se asienta el emplazamiento, lo que constituye su topografía.
- Características de la radiación incidente, que depende del modelo de fuente y de su situación relativa respecto al punto cuyo movimiento se evalúa.

Estos tres factores son determinantes en la respuesta del emplazamiento ante un cierto movimiento en su base, si bien en ocasiones, la geometría del problema permite asumir simplificaciones que llevan a prescindir de algunos de ellos.

Ondas sísmicas.

Pueden ser de cuerpo (interiores) como las P y las S, y superficiales como las de R y L.

- *Ondas de cuerpo.* Las ondas P son compresionales; las partículas se desplazan en la dirección del movimiento, son las primeras en aparecer en el registro por ser las más rápidas. Las S o de cortante, más lentas, llegan de segundas, las partículas se mueven en dirección transversal al movimiento; hacen más daños por tener mayor amplitud, y por ser ondas de cortante no cruzan líquidos.

Las ondas sísmicas son la transformación de la energía potencial en energía

cinética. Las ondas P son debidas a la elasticidad de volumen del material, mientras las ondas S, son debidas a la elasticidad de la forma del medio de transmisión.

La velocidad media aparente de propagación de las ondas P oscila entre 8 y 13 Km/seg y para las ondas S entre 4.5 y 8.5 Km/seg.

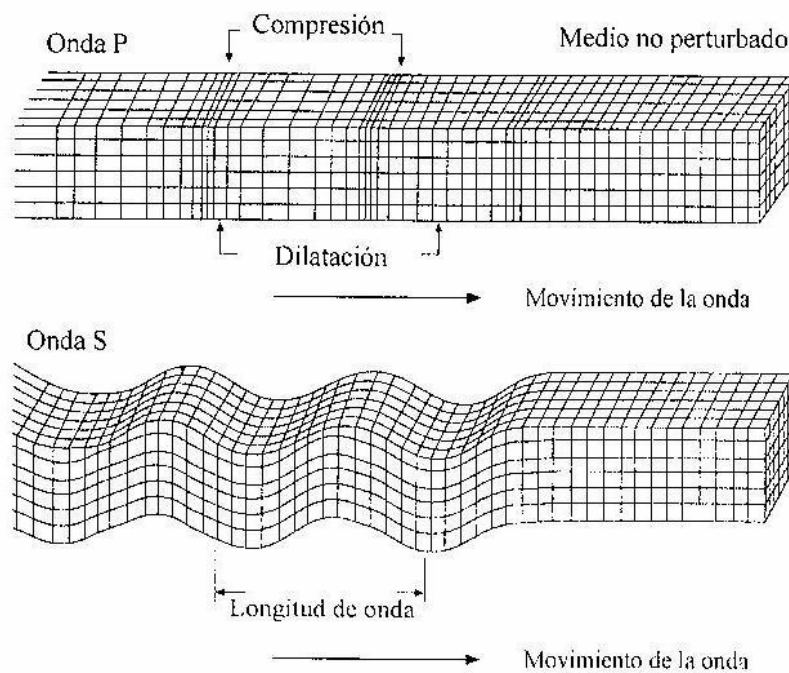


Figura 2. Ondas sísmicas. Esquema de la propagación de la Onda P y onda S (Sarria, 1995).

- *Ondas superficiales.* Después de las anteriores llegan las ondas R y las L (Rayleigh y Love), en las ondas R las partículas se mueven describiendo elipses sobre un plano vertical en la dirección del movimiento. Si el medio es sólido la partícula retrograda arriba y avanza abajo; si es líquido lo contrario. En la onda L, la elipse descrita por la partícula está en un plano horizontal transversal a la dirección del movimiento.

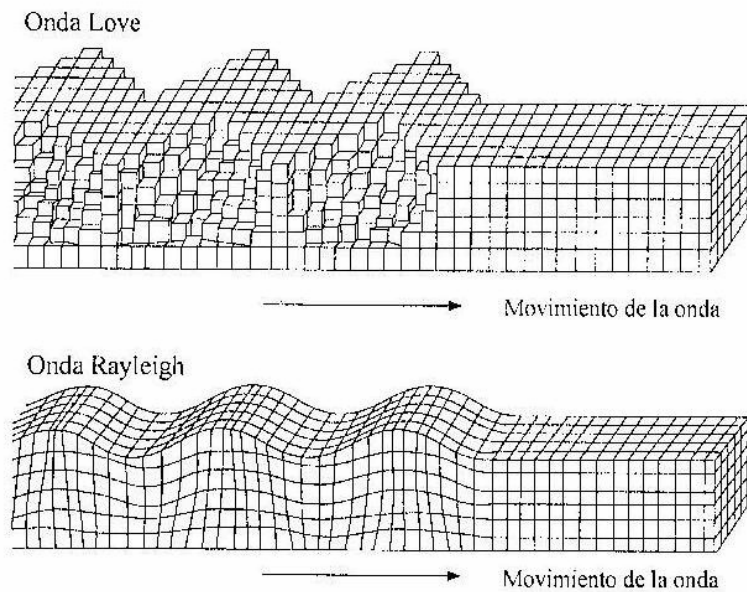


Figura 3. Ondas sísmicas. Esquema de la propagación de la onda Rayleigh y la onda Love.
(Sarria, 1995)

Las ondas superficiales se forman a partir de las interiores; son ondas largas porque tienen mayor amplitud y su propagación es lenta (3 a 4 Km/seg). Por los efectos desastrosos que producen se llaman sacudidas del "terremoto". Cualquiera que sea su intensidad, las sacudidas pueden ser bruscas u ondulatorias; las primeras se caracterizan por empujes casi verticales y las segundas por empujes que se comunican oblicuamente. La velocidad de las ondas en el caso de los maremotos varía con la profundidad del mar, llegando a valores sobre 700 km/h en mar abierto y reduciéndose ya en la vecindad de las costas

1.2 MÉTODOS PARA EVALUAR CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO

Existen diferentes métodos para la evaluación de las características dinámicas del suelo, que van desde los empíricos a los numéricos. Los métodos numéricos son usados con mayor frecuencia como una base teórica para corroborar la exactitud y dar soporte a los resultados obtenidos por los métodos empíricos. Aunque, los métodos numéricos sean basados en suposiciones acerca del comportamiento del

depósito de suelo, como por ejemplo: admitir un modelado lineal y de parámetros definidos. (Verdugo et al, 2005; Goula et al, 1998; Giraldo et al, 1999; entre otros). Además es necesario un conocimiento previo de varias características como: la cantidad de estratos presentes, espesores de los estratos, velocidades de propagación de ondas, densidades, etc. Estas características son conocidas gracias a exploración física del depósito, la cual tiene elevados costos económicos e impactos sociales cuando se procede en presencia de asentamientos urbanos. Por esta razón muchos métodos empíricos para evaluación de características y efectos sísmicos siguen siendo evaluados y estudiados para su perfeccionamiento.

Los métodos empíricos a menudo son clasificados como activos y pasivos, dentro de los que cabe resaltar:

1.2.1 Métodos Activos

Estos métodos tienen la particularidad de que necesitan una fuente artificial para generar ondas sísmicas las cuales varían dependiendo del método, de la extensión del área a estudiar y de las propiedades mecánicas del subsuelo. La fuente artificial puede ir desde golpes con un martillo a una placa, hasta varios kilogramos de explosivos como la dinamita, de allí que reciban el nombre de activos. Estos métodos hacen parte de los métodos geofísicos, a los que se les ha encontrado aplicación en el área de la Ingeniería Civil y de la construcción.

Originalmente estos métodos fueron empleados para la prospección del petróleo y otros depósitos minerales; en 1970 se empezó a utilizar para caracterizar suelos blandos especialmente en áreas aluviales y depósitos sedimentarios; actualmente se usan para determinar la estructura y las características dinámicas del subsuelo; (Sarria, 1996). El fenómeno físico observado para el desarrollo de estos métodos son las ondas elásticas, y la propiedad física obtenida es la velocidad de las ondas

elásticas; a continuación se describen algunos de dichos métodos y se compara las ventajas y limitaciones de su uso.

Uno de los métodos más importantes es el llamado Refracción Sísmica. A partir de este método sísmico, se puede obtener información como: el tipo de estructura presente en los depósitos, las características dinámicas del subsuelo, historia geológica, ambiente de depositación y litología; con base en las propiedades de las ondas que se propagan en el subsuelo y se reflejan en las interfaces; las cantidades observadas son los tiempos de viaje y la amplitud de las ondas.

Las características de los datos dependen de su adquisición y de su procesamiento, así que es necesario separar la señal del ruido; para poder tener una idea más clara de lo que se quiera analizar.

En el método de reflexión sísmica se utiliza la técnica de trazamiento de rayo para elaborar un modelo inicial y a partir de este, en forma iterativa acercarse a la información desconocida. Usando estos conceptos se pueden establecer relaciones para determinar la velocidad de propagación de las ondas en las capas de suelo y el espesor de las capas, en función de los tiempos de arribo de las ondas detectadas por los geófonos instalados en línea los cuales se pueden extender a varios cientos de metros.

La ventaja mas importante es que no esta condicionado a suelos donde la velocidad de propagación de la onda sísmica varia con la profundidad; toda la información obtenida es aprovechada y requiere el tendido de menos longitudes de cable sísmico.

La refracción sísmica es un método que tiene muchos años de desarrollo; esta fue la primera técnica sísmica utilizada para la prospección de petróleo, en 1923 fue introducida y ampliamente difundida en México. Estos principios ya habían sido utilizados para determinar la estructura del interior de la tierra a partir de datos

sísmicos; en 1912 Gutenberg usó esta técnica para calcular la profundidad al centro de la tierra, alrededor de los 3000 Km. (Aki and Richards, 1980.)

Este método registra los tiempos de llegada de los movimientos iniciales del suelo en varios lugares; tales movimientos son generados por un sismo. La información registrada consiste en series de tiempo y distancias; esta información hace posible conocer como es la variación de la velocidad de las ondas sísmicas en función de la profundidad; de esta manera se puede tener una idea de la constitución interna de la tierra y de las velocidades de propagación de las ondas P en cada capa; dichas velocidades son función de parámetros elásticos característicos de un material.

En el método de refracción al igual que en el método de reflexión se hace necesario instalar una serie de sensores sobre la superficie, generalmente estos se disponen en línea recta. Estos sensores son también llamados geófonos.

En ingeniería Civil se han encontrado grandes ventajas de su uso y ha sido utilizado para determinar la profundidad hasta el basamento, el estado de meteorización de la roca, el perfil de velocidades de ondas P y S; también suministra información sobre la presencia de cuerpos de alta velocidad, profundidad al tope de cuerpos de alta velocidad y gradientes de velocidad; además midiendo el tiempo de llegada de las primeras ondas se pueden calcular varios módulos dinámicos, entre ellos la relación de Poisson, E y G en mecánica de rocas, y utilizando el ruido sísmico se puede encontrar el modulo dinámico G, también se puede hacer una evaluación del amortiguamiento, entre otras aplicaciones (Sarria 1996).

Una de las ventajas del método de refracción consiste en que su uso es más económico; pues requiere menor volumen de equipo; debido a que se necesitan menos geófonos y menos fuentes generadoras de energía, comparándolo con la

reflexión; además el procesamiento de los datos obtenidos es más rápido, se trata de escoger los filtros adecuados según lo que se quiere estudiar

El ensayo "down-hole" es otro método y está enfocado fundamentalmente a detectar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales SH (vibración de las partículas en la dirección horizontal) en su trayectoria vertical a través de una masa de suelo. El ensayo consiste en generar ondas tangenciales mediante una fuente de energía reversible que produzca un efecto de cizalla horizontal en la superficie del terreno, y en registrar la llegada del impacto a lo largo de un sondeo situado a una distancia comprendida entre 2 y 5 m del foco emisor. Al estar la fuente de energía cerca del sondeo receptor, las ondas que interesa detectar se propagarán en una dirección muy próxima a la vertical por lo que es lícito suponer una trayectoria directa desde el foco emisor a los receptores para calcular la velocidad de propagación de las ondas. Frente al ensayo "cross-hole" (que tiene como objeto detectar los tiempos de transmisión de las ondas tangenciales a través de trayectorias horizontales directas entre un punto emisor situado en el interior del terreno y uno o más receptores situados a su misma cota a una cierta distancia.) presenta la ventaja de que tan sólo exige la perforación de un sondeo para llevar a cabo los ensayos, y el inconveniente de que la energía sísmica que se puede generar mediante el golpe de una masa o martillo se amortigua rápidamente en el terreno alcanzando una profundidad máxima de 15 a 20 m.

1.2.2 Métodos Pasivos

Los métodos pasivos registran vibraciones a las que el suelo está sometido; dichas vibraciones pueden ser provenientes de sismos de diversa magnitud, o simplemente vibraciones antrópicas que tienen la ventaja de estar presentes continuamente.

El uso de registros de movimientos sísmicos fuertes es una de las valoraciones más completas de los efectos sísmicos locales, ya que su principal ventaja es

contener algunos tipos de efectos no lineales, que al no ser considerados en otras metodologías pueden conducir a interpretaciones erróneas; además son importantes porque contienen amplios contenidos frecuenciales, del orden de más de 30 Hz. Sería ideal poder determinar los efectos de sitio usando estos datos, pero su uso está limitado debido a que se requiere que exista en la zona de estudio gran actividad sísmica de este tipo y un número considerable de instrumentos de registro instalados. (Alfaro, 2006)

En Colombia se ha contado con el Observatorio Sismológico del Sur Occidente Colombiano que registraron movimientos sísmicos hasta el segundo periodo del 2004, a partir de esta fecha el Ingeominas ha venido registrando acelerogramas; además el Instituto Geofísico de la universidad Javeriana cuenta con registros de aceleración y velocidad desde 1941.

En Bucaramanga existe una red sismológica; esta fue instalada por RNAC (Red Nacional de Acelerómetros de Colombia); y ha sido cambiada varias veces durante su existencia; el primer instrumento empezó a funcionar el primer semestre de 1995; y fue ubicado en la hacienda “La esperanza” de la CDMB; después en 1996, se instalo un equipo en la Universidad Industrial de Santander y otro en la unidad operativa regional del Ingeominas, este último fue retirado en 1997; y se instalaron 4 mas, en el área metropolitana. La red de acelerómetros conformado por estos 6 instrumentos funcionó hasta el año 2001, año en el que se retiraron 3 de estos equipos; así que en la actualidad solo funcionan 3 equipos: uno ubicado en la UIS, otro en Floridablanca y uno en Piedecuesta.

El uso de registros de movimientos débiles o moderados complementa la información obtenida por redes sismológicas cuyo objetivo es la caracterización de sitio. Los métodos de relación espectral usando datos de movimientos débiles han sido aceptados ampliamente para estudios de efecto de sitio, porque, los efectos de fuente y de trayectoria son compensados si la distancia de dos estaciones es suficientemente más corta que la distancia entre la fuente y el receptor, y la

relación espectral presentará la función de transferencia si el sitio referencia no tiene factor de amplificación.

Una de las limitaciones de este método es que el comportamiento no lineal de los suelos afecta la estabilidad de las relaciones espectrales. (Alfaro, 2006)

Otra metodología muy importante en los últimos tiempos es la que emplea los microtemblores o ruido ambiental. Alrededor del año 1950 japoneses como Kanai, Aki, Nakamura y otros, emprendieron la formulación de metodologías que usaban microtemblores para la caracterización dinámica de un suelo. Las microtrepidaciones fueron definidas por Kanai Y Tanaka en 1967 como vibraciones del terreno de amplitud baja, generalmente de 0.1 a 1 micrón; y de periodos que varían de 0.05 a 2 segundos, generadas por fuentes antrópicas. Lermo y Chávez-García en 1994 las definieron como ambientes sísmicos ruidosos; estas vibraciones inicialmente y básicamente se pueden clasificar así:

De periodo largo: Periodos mayores a 1 segundo. Producidos por: fuentes naturales (condiciones volcánicas, condiciones atmosféricas, viento, tormentas, olas de mar, variaciones de la presión de aire).

De periodo corto: Periodos menores a 1 segundo. Producidas por: fuentes antrópicas (tráfico, máquinas industriales). (Alfaro, 2006)

Estas vibraciones también fueron llamadas respectivamente como microsismos y microtemblores o microtemblores en ingles, hoy en día para fines prácticos esta denominación es innecesaria y se usan con el mismo significado las palabras microtemblores, microtemblores, microtemblores, microvibraciones, microtrepidaciones, vibración ambiental y ruido cultural. En general a toda vibración no producida por un evento sísmico con alto contenido frecuencial.

Los estudios e investigaciones que se han efectuado en diferentes territorios de Japón (bahía de Tokio, área de Kobe, área de Fukui), concernientes a este contenido, han permitido determinar las características de los microtemblores y los

resultados son consistentes. Las conclusiones de estas observaciones se resumen de la siguiente manera:

- En periodos largos (por debajo de 0,3 a 0,5 Hz), los microtremores son originados por ondas oceánicas a grandes distancias. La amplitud espectral correspondiente es generalmente constante por unas pocas horas y muy bien correlacionadas a gran escala con las condiciones meteorológicas del océano.
- En periodos intermedios (entre 0,3-0,5 Hz y 1 Hz, aproximadamente), son producidos principalmente tanto por ondas del mar próximas a la costa como por el viento; este último posee una estabilidad poco menor.
- En periodos superiores a 1 Hz, son afines a la actividad humana.

Esta distinción entre ruidos de periodo largo ($T > 1$ seg.) y periodo corto ($T < 1$ seg.) comprende a la popular distinción entre microtremores con un origen artificial y microsismos con un origen natural. (Hortencia et al, 2003)

El límite entre estos dos tipos de ruido (los microseisms y los microtremors) está cerca de 1 hertzio, pero puede variar de sitio a sitio dependiendo de la estructura del suelo y, puede estar, en las características de la actividad humana. Investigaciones más avanzadas tienen que ser realizadas para identificar exacto un límite sitio-específico de la frecuencia entre los microseisms y los microtremors. (Bonney-Claudet, 2006)

H. Flores, C. Lomnitz y S. Yussim en el 2004, realizaron un estudio que utiliza los microtremores con el método SPAC y los autores definen este tipo de onda como: a) vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía; b) una superposición de ondas superficiales, que constituyen un campo estacionario y homogéneo; y, c)

el ruido ambiental generado por fuentes naturales y culturales, como el tráfico vehicular o la actividad humana. (Flores, 2004)

Los microtemores ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz; sin embargo, en la exploración geofísica sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz, ya que en esta banda parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre, hasta profundidades de 20 km. (Flores, 2004)

De las metodologías propuestas por Kanai en 1964, Aki 1967, Kagami 1982, Nakamura 1982 y Konno 1996; la de Nakamura es la que ha contado con mayor aceptación y a la que se le ha dado una aplicación superior a través de los años, sobre todo en estudios de microzonificación sísmica. Esto se debe principalmente a que la aplicación de este método resulta económica, pues solo requiere una estación ya sea con un sismómetro o un acelerómetro y además como ya se mencionó; utiliza vibraciones naturales del suelo. (Alfaro, 2006)

Durante los años de desarrollo de las microtempidaciones, se ha considerado que estas están compuestas por ondas internas y superficiales; o por ondas de superficie dispersas, o por ondas Rayleigh; pero no existe un acuerdo acerca de este asunto.

Nagaoka en 1906 definió los microtemores como temblores superficiales estacionarios integrados por ondas Rayleigh, debidos a la superposición de dos vibraciones con amplitudes y periodos similares. Honda, a pesar de estar de acuerdo con Nagaoka, no descartó que por lo menos una mínima parte de las pulsaciones fueran de tipo Love con componente vertical igual a cero. (Moreno et al, 2000)

Kanai et al en 1954, fueron los primeros en usar el ruido ambiental con el objetivo de estudiar los efectos de sitio. Sin embargo Kanai y sus coautores pensaron que la fuente de los microtremors era ruido blanco y que ello era el cuerpo de las ondas. Bard en 1998, concluyó que los microtremores están compuestos en un 70% por ondas superficiales. (Hortencia et al, 2003)

Nakamura en sus documentos demanda que el cociente espectral horizontal a vertical refleja principalmente resonancia de la onda S en la capa superficial suave (que quita efectos de las ondas superficiales), y por lo tanto la curva HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio) proporciona una estimación constante de la función de la amplificación del sitio. Esta "interpretación de la onda del cuerpo" se ha contradicho en varios papers que destacaban la relación entre el HVSR y la elipticidad del modo fundamental de la onda Rayleigh (Lachet et al, 1994; Kudo, 1995; Bard, 1998), y así seriamente indagando la existencia de cualquier correlación directa simple entre el valor máximo de HVSR y el factor real de la amplificación del sitio (el pico de HVSR entonces sería asociado a la desaparición del componente vertical de las ondas de Rayleigh, en vez de la amplificación de la onda S en componentes horizontales). (Bonney-Claudet et al, 2006)

En Nakamura (2000) Se prueba que el pico del cociente de H/V (o QTS, Quasi-Transfer Spectra o HVSR), para cualquiera de los dos casos el registro de microtremors o terremotos no se puede explicar con las ondas de Rayleigh, puesto que la energía de la onda de Rayleigh es muy pequeña para la frecuencia máxima, pero alta en el canal del cociente de H/V y esto prueba que la explicación de Nakamura en Nakamura (1989) es correcta para exponer este pico con las ondas SH.

Los resultados para las fuentes superficiales dependen de la distancia del receptor: si son distantes (es decir, más de veinte veces el grosor de la capa sedimentaria), el efecto vertical del ruido es constituido por una mezcla de onda Rayleigh y ondas de cuerpo (la cabeza de onda se propaga a lo largo de la

interfaz sedimentario/roca en el fondo); si las fuentes están cercanas, el efecto vertical del ruido consiste principalmente en el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Finalmente, si entonces, todas las fuentes se consideran cercanas entre ellas, las fuentes superficiales son dominantes y el efecto vertical del ruido es constituido principalmente por el modo fundamental de la onda Rayleigh. (Bonney-Claudet et al, 2006)

Bonney-Claudet en el 2004 compara la curva de HVSR a la curva de la elipticidad del modo fundamental de las ondas de Rayleigh, su conclusión principal basada en el análisis de la curva de HVSR es que la naturaleza del ruido es dominado por las ondas superficiales solamente en el caso de contraste alto de impedancia (es decir, para un contraste de la velocidad entre la superficie y la roca de fondo subyacente sobre 3-4), mientras que para un contraste más pequeño de la velocidad (debajo de 3), la onda percibida también incluye las ondas del cuerpo generadas por fuentes superficiales cercanas.

(Bonney-Claudet et al, 2006) en su estudio también demuestran que la proporción relativa de ondas Love contenidas en el ruido sísmico es significativa (por lo menos el 40%, probablemente más arriba el de 50% en la mayoría de los casos). Los autores escriben: si se asume que el campo de onda sísmico esta compuesto por ondas superficiales, se genera la pregunta, ¿que tipo de onda? Rayleigh o Love, y sobre el modo de propagación; ¿en el modo fundamental o en modos más altos?

Relación entre H/V y ondas Rayleigh

Las ondas de Rayleigh son caracterizadas por un movimiento elíptico de la partícula en el plano radial y su velocidad de fase. En medios estratificados horizontales donde la velocidad varía con el espesor del depósito, ambas características exhiben dependencia de la frecuencia. La estratificación también

da lugar a la existencia de distintos modos de la onda de Rayleigh y el modo fundamental existe en todas las frecuencias.

El cociente de H/V de todos los modos de las ondas de Rayleigh, que es una medida del cociente de la elipticidad, exhibe por lo tanto una dependencia de la frecuencia en medios estratificados.

Los resultados más relevantes se pueden resumir como sigue, considerando la primera capa una simple sobre las estructuras del medio espacio:

Para el contraste de intermedio a alto de las velocidades de onda, la razón de elipticidad H/V de ondas Rayleigh exhibe picos infinitos y/o ceros que corresponden a la desaparición de la componente vertical, e inversión del sentido de rotación. Para bajos contrastes de la impedancia y porque el sentido de rotación no cambia con la frecuencia, la razón de elipticidad solo exhibe máxima en algunas frecuencias y mínimas en otras frecuencias sin ceros o infinitos.

Enfocándose primero en los modos fundamentales, la desaparición de la componente vertical ocurre a una frecuencia f_R la cual esta muy cerca de la frecuencia fundamental de resonancia para ondas S, solo si, el contraste de la velocidad de onda S excede un valor de 4. Para el contraste de velocidades intermedias (2.6 a 4), el pico de elipticidad todavía es infinito y ocurre a una frecuencia que puede ser de 50% más alto que el de la frecuencia fundamental de resonancia de las ondas S. Para contrastes más bajos de la velocidad, el pico infinito es substituido por un ancho máximo que tenga solamente amplitud baja (menos de 2-3), y ocurre en una frecuencia que pueda extenderse entre 0.5 a 1.5 veces la frecuencia fundamental de la onda S.

El cociente H/V de la elipticidad del modo fundamental puede también exhibir no sólo un pico en f_R , también un mínimo (cero) en una frecuencia más alta f_Z , correspondiendo a la desaparición del componente de H, y a una segunda inversión del sentido de la rotación. Algunos estudios se han realizado para

investigar la variabilidad del cociente f_z/f_R ; Konno y Ohmachi en 1998, divulgan un valor alrededor de 2 para un sistema limitado de perfiles de la velocidad.

Modos más altos exhiben también picos de H/V en frecuencias más altas que corresponden a un componente de desaparición de V; algunos de estos picos, especialmente para las estructuras del alto contraste, coinciden con los armónicos más altos de la onda S en resonancia. Sin embargo, para las solas estructuras de la capa, no se sabe ningún caso, para el cual todos los modos existentes de la onda de Rayleigh exhiben simultáneamente un pico en la misma frecuencia. Es decir para todas las frecuencias para las cuales varios modos existan simultáneamente (generalmente más allá de la frecuencia fundamental de la onda S), existen siempre un modo de la onda de Rayleigh (a menudo el fundamental) que pueda llevar una cierta energía en el componente vertical.

En estructuras de varias capas (k) de suelo blando y con discontinuidad de los depósitos, los resultados disponibles demuestran que todos los modos de la onda Rayleigh que existen en la frecuencia f_k exhiben un pico de elipticidad del campo común (es decir la componente vertical de todos los modos existentes de la onda de Rayleigh desaparece en las frecuencias f_k). En tales sitios, una curva de H/V con varios sitios es por lo tanto constante con la interpretación superficial de la onda. (SESAME, 2004)

Relación entre H/V y ondas Love

Las ondas Love llevan energía solamente en el componente horizontal. Su influencia en la dependencia del contenido frecuencial para el cociente de H/V puede por lo tanto depender solamente de la frecuencia de la componente H.

Se ha demostrado que, por lo menos para los casos de altos contrastes de la impedancia, las ondas Love consolidan el pico de H/V: todas las ondas superficiales llevan su energía máxima para las frecuencias que corresponden a los mínimos de la velocidad del grupo; para los altos contrastes de la impedancia por capas, el mínimo de la velocidad del grupo del modo fundamental de ondas

Love ocurre, para la desaparición de la componente V, en una frecuencia la cuál está muy cerca de la frecuencia fundamental de la onda S. (SESAME, 2004)

En cuanto a la aplicación de microtemblores en el estudio de amenazas naturales, vulnerabilidad y evaluación de escenarios de daño, es basada en que las áreas con picos predominantes muy claros en el rango de periodos cortos, corresponde al área de daño fuerte.

Teniendo en cuenta la aplicabilidad del método, los propósitos de la medición de microtemblores y de las aproximaciones existentes como se expresa en (Moreno, 2000), pueden resumirse en:

- (1) Obtención del periodo predominante del suelo.
- (2) Evaluación de efectos de sitio.
- (3) Detección de la estructura subterránea (la variación del periodo es consistente con el perfil geológico).
- (4) Obtención de perfiles de velocidad de ondas sísmicas.

El interés de este estudio es lograr los dos primeros propósitos mostrados por medio del uso de microtremors y el método de Nakamura o HVSR. El efecto de sitio es definido como la reacción de las condiciones geológicas locales a la energía sísmica entrante y se mide como amplificación local. La amplificación es causada por el contraste de la impedancia entre la capa sedimentaria y la base rocosa. (Fernández et al, 2000)

Muchos estudios han demostrado la utilidad de los microtremors, en varias condiciones geológicas y sociales, para determinar las características dinámicas de depósitos de suelos blandos. Y aunque la existencias de suelos blandos podría ser una limitante, la gran mayoría de ciudades y asentamientos urbanos están ubicados en valles o zonas que cumplen con esta condición.

Víctor Rodríguez y Saburoh Mirodikawa (2002) usan los microtremores para la evaluación de efecto de sitio y obtuvieron excelentes resultados. (Rodríguez et al, 2002)

A, Ojeda y J. Escallon en el 2000, concluyeron que, el análisis de microtremors que usa la técnica de Nakamura demostró ser una herramienta valiosa para determinar períodos dominantes de la vibración de suelos suaves, con comportamientos simples en su distribución y en la plasticidad de la capa. Además, los resultados obtenidos con microtremors permiten la determinación de zonas con comportamientos dinámicos típicos. Este hecho llega a ser muy importante en estudios de microzonificación de áreas urbanas. (Ojeda et al, 2000)

Nakamura expresó que el efecto de los sismos en las capas superficiales de los suelos depende de las características dinámicas del sitio las cuales pueden ser determinadas con microtremores, esto se demostró comparando registros de un mismo sismo en varias estaciones y registros de varios sismos en la misma estación. Se observó que en las distintas estaciones sobre depósitos de suelo diferentes, aun para un mismo sismo, los registros son muy dispares, y se observó que en una misma estación los registros de diferentes sismos son semejantes. Entonces se dice que el efecto crítico que depende de las características dinámicas se presenta en la capa superficial del depósito. El propósito fundamental del método de Nakamura con registros de microtemblores es reducir costos de operación al poder definir la función de transferencia con un solo sitio en superficie. (Nakamura, 2000)

A.A. Panou, N. Theodulidis, P. Hatzidimitriou, K. Stylianidis y C.B. Papazachos observaron que entre más profundo el depósito de suelo blando, en este caso aluvial, el factor de amplificación aumenta y en la zona donde se encuentra roca en superficie los resultados no mostraron amplificación. De forma inversa ocurre con la frecuencia fundamental y se comprobó una muy buena correlación entre el espesor del depósito y la frecuencia fundamental. (Theodulidis et al, 2005)

M. Bour, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin usaron la técnica de Nakamura para plasmar una microzonificación sísmica en una zona al sur de Francia. (M. Bour et al, 1998)

El método que se planteó inicialmente para el procesamiento de microtremors usaba un registro en basamento rocoso como referencia para comparar los datos obtenidos en la superficie del depósito de suelo blando. Se aplica la relación espectral de un sitio en suelo sedimentario con respecto a un sitio en roca. Este método presenta la complicación de encontrar afloramientos rocosos relativamente cerca de la zona de estudio.

La observación en serie de los microtremors es considerado otro método y a través de arreglos - arrays - de geófonos ha sido desarrollada para conocer la estructura del subsuelo y la naturaleza de la propagación de estas ondas. Los trabajos pioneros fueron los de Aki (1957), Toksöz (1964) y Lacoss et al (1969). Esta metodología consiste en la instalación de varios sensores tanto en depósitos como en roca, lo cual supone que en los análisis se pueden eliminar los efectos de fuente y de trayectoria.

Horike (1993) resumió las ventajas de este método de la siguiente forma:

1. Se determina bien la velocidad de fase de ondas superficiales por el método frecuencia/número de onda, por una clara separación de las ondas internas.
2. Se determina bien un modelo de estructura profunda de velocidad de ondas S, mejor que con otros estudios geotécnicos convencionales.
3. Este método es aplicable igualmente en áreas urbanas donde otras mediciones geotécnicas son difíciles de llevar a cabo.
4. Se deben incluir consideraciones adicionales para aplicar este método a una estructura subterránea irregular.

El método más moderno es llamado como SPAC. El propósito del método SPAC es obtener la velocidad de una estructura por medio de la medición de microtremors. Para esto es necesario el registro simultaneo en varias estaciones conformando un arreglo instrumental. El método requiere como mínimo tres estaciones. Siguiendo el proceso descrito anteriormente, la dispersión de la onda Rayleigh es obtenida y usada para determinar la velocidad de la estructura. Este método fue aplicado en la ciudad de México, los resultados fueron comparados con resultados obtenidos por Kagawa con el método K-F analizando datos obtenidos durante una campaña en 1991. Se usaron tres instrumentos en los vértices de un triangulo equilátero de lado igual a 1 Km. y un equipo en el centro del arreglo instrumental. Se concluyó que el método SPAC es más eficiente y económico que el método K-F, que requiere más de cuatro estaciones y que las amplificaciones calculadas son muy similares a las calculadas con razones espectrales de terremotos registrados. (Hortencia et al, 2003)

Las ventajas y desventajas de este método son resumidas de la siguiente forma:

1. Se determina bien la curva de velocidades de fase de ondas superficiales por el método frecuencia-numero de onda, por una clara separación de ondas internas.
2. Se determina bien un modelo de estructura profunda de velocidad de ondas de corte V_s , de la misma forma que con otros estudios geofísicos convencionales.
3. este método es aplicable igualmente en áreas urbanas, donde otros sistemas son difíciles de llevar a cabo. (Alfaro, 2006)

1.3 SELECCIÓN Y PLANTEO DEL MÉTODO A EJECUTAR.

La metodología más usada para estudios de microzonificación sísmica y caracterización dinámica es la medición y análisis de microtremors esto a causa de que no requiere mayores inversiones ya que usa pocas estaciones, en algunos

casos solo una, y no requiere la generación artificial de ondas o la espera de sismos. En la literatura existen diversas metodologías para el estudio de los microtremors, que fueron propuestas por grandes investigadores y que arrojaron buenos resultados. Después de una revisión bibliográfica se seleccionó el método de Nakamura, debido a que ha sido el más aplicado actualmente en el mundo; ha sido objeto de numerosas investigaciones y por ende seleccionada en este proyecto. Antes del trabajo realizado por Nakamura, Nogoshi e Igarashi en 1971 propusieron un método similar que relaciona la razón espectral H/V con una medida de la elipticidad de las ondas rayleigh como un indicador de la frecuencia fundamental de resonancia de una estructura. El método propuesto por Nogoshi e Igarashi es más exacto, pero el procedimiento de Nakamura es más atractivo por su simplicidad. (Hortencia et al, 2003)

Esta metodología fue seleccionada por las siguientes razones:

1. Permite la evaluación de una aproximación de la función de transferencia en depósitos de suelos blandos.
2. Bajos costos en la instrumentación.
3. Relativa simplicidad y facilidad de ejecución de las mediciones.
4. Abundante documentación sobre experiencias de aplicación en investigaciones en todo el mundo.

1.3.1 Técnica de Nakamura.

La metodología de Nakamura (1989) está basada en la suposición que el cociente espectral entre las componente horizontal y vertical de las microtrepidaciones es un aproximación de la función de transferencia de los suelos.

De las técnicas heterogéneas que manejan microtremors para caracterización sísmica de suelos, la de Nakamura ha sido la más reconocida debido a su fácil

instrumentación tanto en la labor de campo como en el procesamiento de datos. (Alfaro et al, 1999)

Para lograr este procedimiento Nakamura se basó a su vez en las siguientes suposiciones:

1. Las microtrepidaciones se componen de varios tipos de onda, principalmente onda S.
2. El ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh.
3. Las componentes vertical y horizontal de las microtrepidaciones se consideran similares en el basamento rocoso.
4. Estas microtrepidaciones son amplificadas por las capas superficiales blandas de suelo acumuladas sobre un substrato duro.
5. Se puede considerar que la componente horizontal de las microtrepidaciones es amplificada por la multireflexión de la onda S y la componente vertical por multireflexión de la onda P.
6. La componente vertical de las microtrepidaciones no es amplificada por las capas horizontales. (Alfaro, 2006 y Teves-Costa et al, 2006)

Se encontró que la suposición de Nakamura la cual dice que las vibraciones horizontales y verticales en base rocosa son iguales, se cumple con mayor aproximación en el rango de 0.1 a 10 Hz de la frecuencia. (Theodulidis et al, 1995)

La metodología propuesta buscó básicamente eliminar el efecto de las ondas Rayleigh para describir la función de transferencia en función de las ondas internas. Se conoce que el efecto de la onda Rayleigh se ve destacado en la componente vertical, de este modo la magnitud de su efecto puede ser calculada por la razón de la componente vertical en superficie y la componente vertical en el basamento rocoso. Entonces para suponer que el efecto de la onda rayleigh es cero como lo propone Nakamura, la razón debe ser igual 1. Como se muestra en la siguiente expresión:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} = 1$$

Generalmente la función de transferencia de estratos superficiales se define de la siguiente forma:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}}$$

Pero las ondas superficiales son afectadas fácilmente por el ruido artificial, que en la mayoría de los casos se propaga principalmente como onda Rayleigh. Por esta razón se deben incluir los efectos de la onda Rayleigh en la función de transferencia, solo en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie S_{VS} , pero no en el espectro de la componente vertical del basamento

S_{VB} ; y se considera que $\frac{S_T}{E_S}$ es una función S_{TT} más fiable ya que incluye dichos efectos:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS} / S_{HB}}{S_{VS} / S_{VB}}$$

Definiendo $R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$ y $R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}}$, entonces $S_{TT} = \frac{R_S}{R_B}$; R_B está cerca de la unidad

para un rango relativamente amplio de frecuencias para registros obtenidos en afloramiento rocoso. Esto implica que para el basamento la propagación es la misma en todas las direcciones, y por lo tanto $R_B = 1$

Entonces:

$$S_{TT} = R_S$$

Esto significa que la función de transferencia de capas superficiales es posible definirla solo con el movimiento en superficie. Visto de otro modo la componente vertical en superficie contiene las características del movimiento horizontal en el basamento rocoso.

RB debe estar libre del efecto de ondas Rayleigh y tener características relativas al sitio, por lo que una estimación más confiable de la relación STT se produciría al multiplicarla por $1/RB$ como término de compensación si existe información de las microtrepidaciones en basamento.

La metodología con base en el cociente espectral H/V es llamado por Nakamura (2000) como Técnica QTS, Quasi Transfer Spectrum.

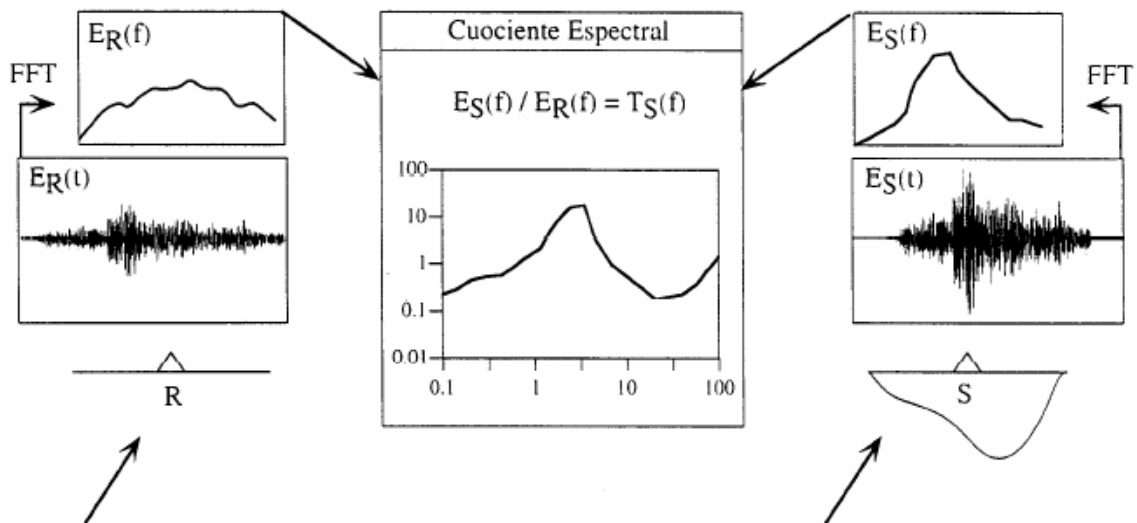


Figura 4. Técnica tradicional para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. (Guéguen, 1997)¹

¹ R. corresponde a un sitio de referencia. S al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. $E_R(t)$ y $E_S(t)$ son los registros en los sitios R y S del mismo evento sísmico y de la misma componente horizontal. FFT corresponde a la Transformación de Fourier.

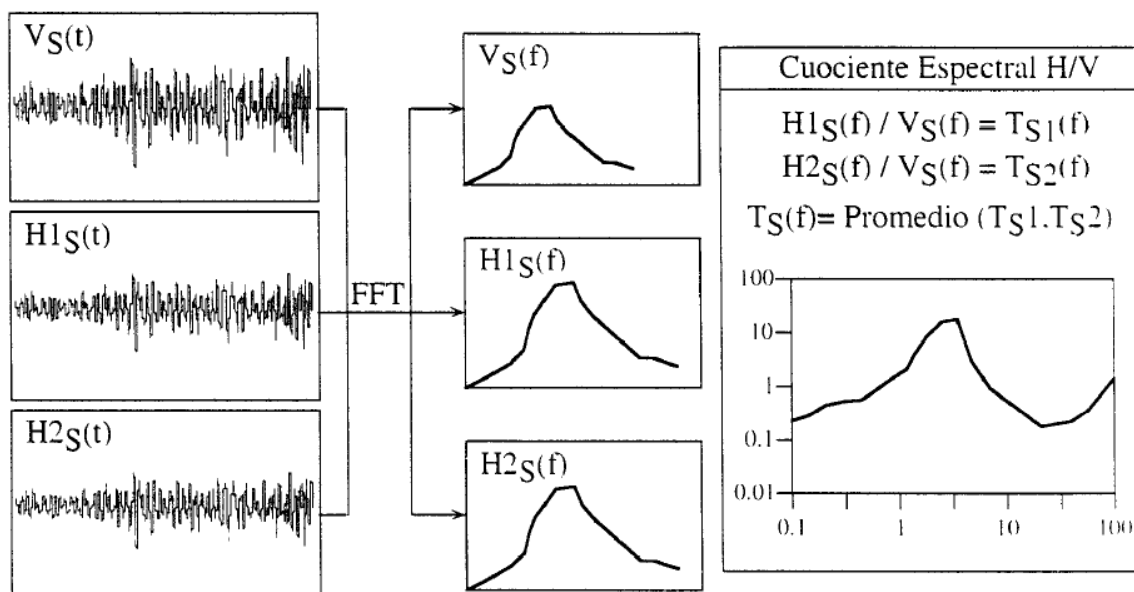


Figura 5. Técnica que utiliza el ruido ambiental para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. (Guéguen, 1997) ²

Víctor Rodríguez y Saburoh Mirodikawa (2002) demostraron en su estudio “APPLICABILITY OF THE H/V SPECTRAL RATIO OF MICROTREMORS IN ASSESSING SITE EFFECTS ON SEISMIC MOTION” que el uso de las razones espectrales de registros de microtremores es aplicable para la estimación o evaluación de la respuesta de sitio y periodos fundamentales, por medio de la comparación de razones espectrales de movimientos fuertes y razones espectrales de microtremores en 150 estaciones de la red local.

A, Ojeda y J. Escallon (2000), indicaron que en el caso de movimientos débiles; los espectros de respuesta, el análisis de Fourier y la técnica de Nakamura demostraron resultados similares y en Pereira una buena correlación fue observada con los resultados obtenidos de expedientes de movimientos fuertes. Además los microtremors manifestaron resultados claros cuando la técnica de Nakamura fue utilizada para evaluar períodos dominantes. Los periodos que

² S corresponde al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. VS(t), HIS(t) y H2S(t) corresponden a la componente vertical y a las dos horizontales del ruido ambiental registrado en la estación S. FFT corresponde a la Transformación de Fourier.

fueron obtenidos con microtremors son muy similares a los logrados con los registros de movimientos fuertes y débiles.

La buena correlación entre los microtremors y los datos del terremoto se puede explicar por la profundidad relativamente baja de los sedimentos (30 m) y por el alto contraste de las velocidades entre los suelos suaves y la roca de fondo, que conduce a los altos contrastes de la impedancia. (Ojeda, 2000)

(Nakamura, 2000) en este artículo el autor afirma que la técnica de Nakamura, es efectiva para identificar la frecuencia fundamental de resonancia y el factor de amplificación en capas de suelos sedimentarios.

N. Theodulidis, et al (2005) expusieron que la comparación entre las frecuencias fundamentales obtenidas de la razón espectral de microtremors y simulación numérica basada en datos geotécnicos de la zona arroja valores análogos. Los mismos resultados se dieron con las frecuencias fundamentales calculadas de la razón H/V y los registros del macro sismo del 20 de Junio de 1978.

M. Bour, et al (1998) con mediciones en tres estaciones cercanas y su traslape comprobaron la estabilidad del método de Nakamura. Se realizó una validación con el modelo lineal proporcionado por el SHAKE91, para la cual se uso información geotécnica obtenida por perforaciones realizadas específicamente para este propósito. Se usaron registros de acelerogramas de sismos de California e Italia porque se consideraron sus fuentes semejantes a las de Francia. Los valores de los periodos fundamentales medidos y los calculados por el método numérico correlacionaron muy bien para todos los casos y se comprueba que la técnica efectiva para tal caso. De los resultados siempre se observo una diferencia de la amplificación entre los obtenidos por el método experimental y el numérico; Los valores del método experimental son en un 50% mayores.

Samuel Pachón, Samuel Martínez, María Luisa Bermúdez y Aníbal Ojeda compararon los resultados obtenidos de razones espectrales con microtemblores y razones espectrales de sismos en la zona. Los resultados son análogos y se concluyó que el método de Nakamura es una herramienta muy efectiva para suelos blandos no muy profundos. (Pachón et al, 2001)

Juan Nobile Blanco (2005) en su estudio consumó que los resultados tuvieron la tendencia esperada con relación a la geología de la zona pero no muy buena con la gravimetría realizada en este mismo estudio.

“Lermo y Chávez-García (1994) compararon tres tipos de razón espectral: relaciones espectrales de movimientos horizontales fuertes con un sitio de referencia, relaciones espectrales de microtemblores con un sitio de referencia y relaciones espectrales de microtemblores horizontal (H) y vertical (V) (técnica de Nakamura). Concluyeron que la relación H/V da una mejor estimación del período predominante en un sitio y permite una estimación mas aproximada del nivel de amplificación que la relación espectral entre dos sitios.” (Moreno, 2000)

“Field y Jacob (1993) hicieron un experimento numérico distribuyendo fuentes en muchos sitios y concluyeron que la técnica de Nakamura da una buena estimación no sólo en la frecuencia del pico sino también en la amplitud, es decir, que la relación espectral H/V representa la función de transferencia del suelo.” (Moreno, 2000)

Philippe Rosset, A. De la Puente, L. Chouinard, D. Mitchell & J. Adams (2002) aportaron que los resultados expresan que el uso de microtemblores es apropiado para definir respuesta de sitio y frecuencia fundamental de resonancia en entornos urbanos.

Se aplicó la técnica de Nakamura y el registro en basamiento rocoso, al comparar los resultados se encontró una excelente similitud tanto en el periodo fundamental

y el efecto de sitio; aunque la geología superficial es diferente. (Fernández et al, 2000)

B. González y L. Pérez (2004) realizaron mediciones de microtemblores y los compararon con mediciones en suelos fiables y compactos de los alrededores, y concluyeron lo siguiente:

“El análisis de los resultados de la microzonificación sísmica de las ciudades de Santiago de Cuba y la Habana permitieron concluir que existe una buena correlación entre la distribución de los periodos predominantes, obtenidos a partir de los microtemblores de periodo corto y las condiciones geológicas locales.” (González et al, 2004)

Theodulidis et al (1995) en su discusión y a partir de los resultados, plantean que la razón espectral H/V tiene buena estabilidad. Adicionalmente los modelos teóricos mostraron que la razón espectral H/V correlaciona bien con las frecuencias de resonancia de las columnas de suelos en 1D.

De la comparación entre el método de la razón espectral H/V y el de la razón espectral tradicional, es claro que el último tiene amplitudes sistemáticamente bajas para frecuencias mayores que 1 Hz, mientras para frecuencias más bajas las amplitudes de la razón espectral standard son altas. Se podría insinuar que el método de nakamura es más estable que el método tradicional. (Theodulidis et al, 1995)

La comparación del mapa de frecuencias por HVSR con el mapa geológico y el corte transversal geológico ha mostrado variaciones grandes en las frecuencias fundamentales, entonces, no puede explicarse por las variaciones conocidas en la geología de la superficie o relacionarlo al espesor total de los sedimentos. Se concluyó que el uso de los microtemblores ha demostrado ser eficaz para evaluar la función de transferencia en depósitos de suelos aluviales pero no para aquellos con: distribución geológica complicada y depósitos aluviales compactados como

es el caso de Bovec. Se realizaron mediciones de refracción sísmica con ondas P y S por investigación geotécnica, en tres localizaciones en zonas urbanas de la superficie de Bovec. Los resultados de velocidades de onda cortante se compararon con las frecuencias fundamentales obtenidos de HVSR y se obtuvo una buena analogía respecto a la rigidez del depósito. (Gosar, 2007)

Se muestran los resultados de la refracción y la comparación de frecuencias en el estudio realizado por Andrej Gosar (2007) en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de resultados de frecuencia obtenidos por refracción y HVSR.

Seismic refraction data on thickness and S-velocity of sediments and comparison of microtremor HVSR peak frequency with calculated frequency for single layer

| Location | Microtremor HVSR f_0 | Seismic refraction | | |
|-----------------|------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| | | Thickness (h) | S-velocity (Vs) | $f_0 = Vs/4h$ |
| B37a (Mala vas) | 8.0 Hz | 9.0±1.0 m | 300 m/s | 8.3±0.8 Hz |
| H2 (Brdo) | 9.4 Hz | 9.9±1.4 m | 390 m/s | 9.8±1.4 Hz |
| B99 (Čezsoča) | 13.3 Hz | 6.9±0.4 m | 350 m/s | 12.7±0.7 Hz |

Para probar la estabilidad de la razón H/V, continuamente se observaron grabaciones de microtremors que fueron realizadas sobre roca y con una duración de 5 minutos cada 2 horas. Al analizar estos datos se notó que la frecuencia predominante se mantenía estable en el pico de la fluctuación presentada para cada componente. Los periodos predominantes observados están en acorde con los espesores de los depósitos aluviales. Además se realizaron análisis con modelado lineal en 1D para el depósito y los valores de frecuencias predominantes muestran un razonable acuerdo con estos resultados. En general se concluye que el registro de microtremors puede ser usado para obtener información fiable relacionada con el comportamiento sísmico de pequeñas capas aluviales. (Teves-Costa et al, 1996)

1.3.2 Resultados de Nakamura

Los estudios realizados por nakamura necesitaron mediciones continuas de las microtrepidaciones por más de 30 horas. Ubico los sitios de registro en

subestaciones del tren que pasaba por Kanomomiya y Tabata. Para entender las características dinámicas de la estructura de suelo se hicieron mediciones en superficie y en el fondo de la estructura de suelo. Se utilizó un sensor de velocidad de periodo de un (1) s.

Los resultados de la comparación en los dos sitios, entre STT y RS mostraron que:

1. En el sitio “Kamonomiya”, STT y RS coinciden tanto en el pico predominante como en la forma entera de las relaciones espectrales.
2. En el sitio “Tabata” STT y RS mostraron ser casi similares.
3. La función de transferencia RS no es afectada por las vibraciones inducidas por la operación de los trenes
4. La amplificación máxima de la velocidad puede ser estimada de manera aproximada usando la máxima amplitud de RS.

Adicionalmente se aplicó la relación RS a registros de sismos fuertes en roca y en suelos en la Ciudad de México, encontrando que RS también puede ser aplicada usando señales de sismos. (Rosales, 2001)

1.4 TRABAJO DE CAMPO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se han hecho muchos estudios de microtrepidaciones en diversas ciudades alrededor del planeta y sin importar el método de análisis que usen, el patrón a seguir para la medición de datos varía en algunas de sus consideraciones. Las características geológicas de la zona, el tiempo de muestreo, las condiciones climáticas y culturales, la cantidad de datos y otras circunstancias que pueden afectar el registro de onda o generar errores en los datos resultantes, deben ser definidas prácticamente para cada caso. El trabajo de campo inicia con la

selección de las condiciones para la grabación de los microtremors, para esto se consultaron varios estudios similares y de ellos se recolectaron los parámetros más significativos para este proyecto.

Los Parámetros utilizados y la metodología empleada para la adquisición de los registros de microtremors son explicados a fondo en el capítulo 4.

1.5 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Los datos generados se almacenan en un computador portátil como archivo de datos .dat. El análisis se realiza con la ayuda de software especializado, para este caso es el llamado “Jsesame”, que fue desarrollado por el proyecto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations). El programa básicamente toma los datos registrados, selecciona las ventanas con menos ruido de cada registro introducido, las procesa, encuentra el espectro con dominio en la frecuencia por medio de la transformada rápida de Fourier y calcula la razón espectral. La razón de los espectros en cada punto de medición nos indica la frecuencia predominante, y por consiguiente, el periodo fundamental de vibración necesario para desarrollar el mapa de isoperiodos. La amplitud máxima observada de la curva HVSR es considerada el efecto de sitio en ese punto.

1.6 VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados son verificados al compararlos con datos numéricos o teóricos que se obtienen de un modelamiento lineal utilizando SHAKE91 y una hoja de cálculo programada en Basic, llamada EERA.xls. Esta hoja nos muestra gráficas de todas las características dinámicas de un perfil de suelo basándose en la teoría lineal empleada por shake91.

Para dicho modelamiento se debe conocer el perfil estratigráfico de la zona de estudio y este debe contener información como: modulo de corte, velocidad de

propagación de las ondas Vs, espesores, etc.; de cada una de las capas encontradas en él. Esta información es detallada en el capítulo 5.

2. EQUIPO

2.1 GENERALIDADES

Obtener las propiedades dinámicas del subsuelo requiere un amplio conocimiento acerca de las vibraciones a registrar o de la metodología a aplicar para poder así seleccionar la instrumentación adecuada para este proceso, ya que la señal se caracteriza por el rango de frecuencias, tipo de onda y amplitud.

Los microtemblores pertenecen al rango de frecuencias de las vibraciones ambientales, el cual oscila entre 0.1 y 10 Hz, es una señal débil y su forma fue clasificada inicialmente como ruido blanco, pero ahora existen muchas estipulaciones que indican que un gran porcentaje de esta onda está compuesta por ondas superficiales (Hortencia et al, 2003). El equipo más adecuado para transducir este tipo de señal es el sismómetro o velocímetro, aunque las limitaciones del acelerómetro no son tan predominantes y en una gran cantidad de estudios concernientes al tema se han usado con eficacia. (Pachón, 2001 y Rincón, 2005)

La influencia del tipo de transductor fue probada por el proyecto SESAME con grabaciones simultáneas de dos sensores, un sismómetro y un acelerómetro conectados al mismo convertidor A/D; también 17 sensores fueron testeados variadamente y en general las señales son similares como se esperaba. Sin embargo, (SESAME, 2004)

- Los acelerómetros no tienen alta sensibilidad para frecuencias por debajo de 1 Hz y dan alta inestabilidad para los resultados de la razón H/V. Por esto es recomendado que las mediciones para la razón espectral de H/V sean realizadas usando sismómetros.

- La estabilidad es importante. No es recomendado que las mediciones para la razón espectral H/V se realicen usando sismómetros de banda ancha con periodo natural mayor de 20 segundos, porque ellos requieren un tiempo de estabilización muy alto
- No es recomendado que los sensores que tengan su frecuencial natural mas baja de la frecuencia de interés.

Para este estudio se medirán las microtrepidaciones o vibraciones ambientales y como se muestra en la figura 6, se recomendaría usar sismómetros de periodo corto.

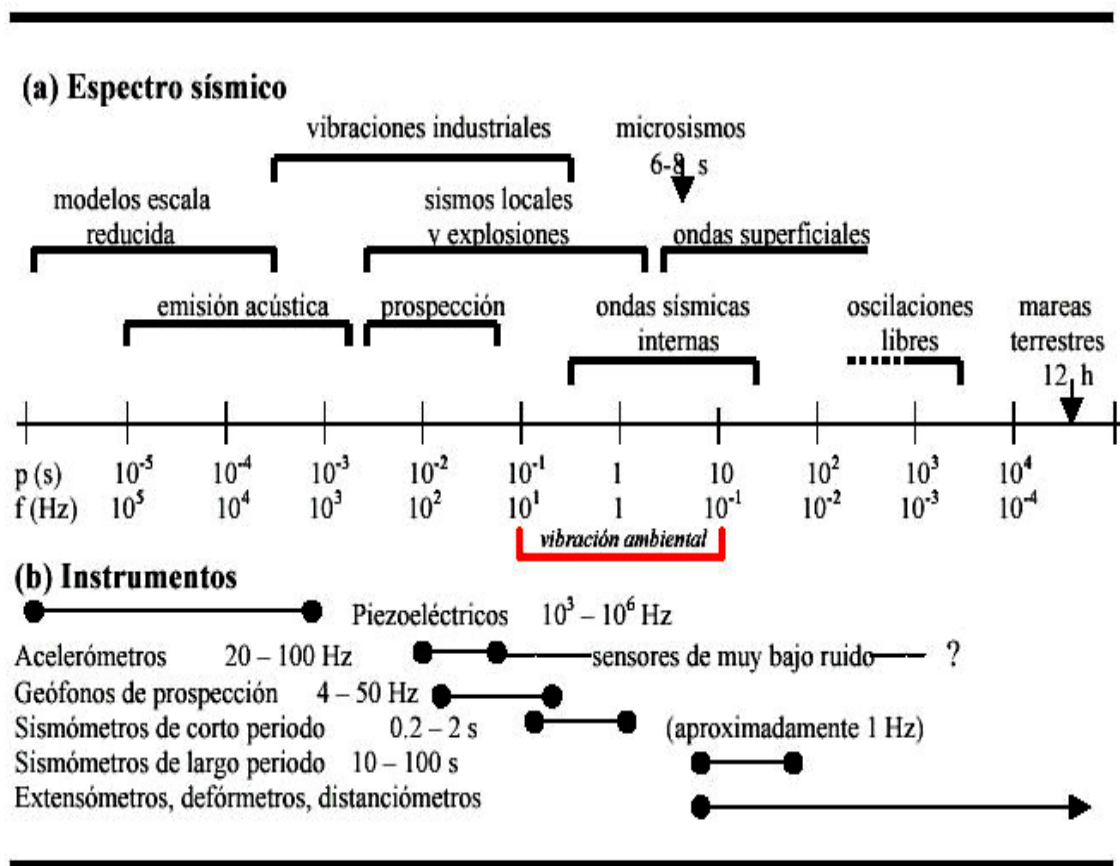


Figura 6. Espectro sísmico (Espinoza, 1999)³.

³ a) Rangos de frecuencia b) Instrumentos.

Aunque la configuración de los componentes del equipo varía con la disponibilidad de ellos en el presente mercado, el costo adquirido y la metodología empleada; siempre se deberá contar con un sensor o un grupo de sensores, un sistema de adquisición de datos y una PC para el procesamiento y análisis de los registros con la ayuda de un software especializado.

Para esta investigación se cuenta con el equipo básico, sensores, dispositivo de amplificación, filtros de ruidos no deseados en el registro y la tarjeta ADC (Analog digital converter). En la figura 7 se muestra el esquema general del sistema.

- Transductores o actuadores
- Acondicionamiento de señal
- Adquisición de datos y/o hardware de control
- Software

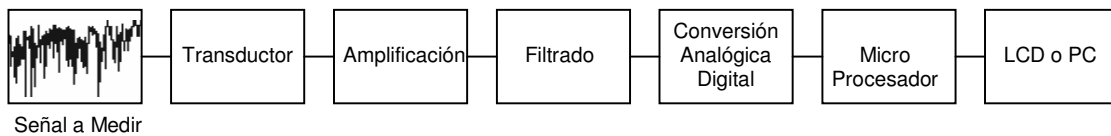


Figura 7. Sistema de adquisición de datos basado en PC (Esquema General)

Los registros procesados se pueden almacenar en formato digital en el PC o visualizar directamente en un display o LCD, como se muestra en el esquema es la última etapa.

2.2 SENSORES

Su función principal es convertir una señal física en señal de corriente o voltaje (digital). El transductor es el tipo de sensor usado para este estudio y es un dispositivo físico el cual es la primera etapa de un sistema de adquisición de datos (DAQ). En la obtención de señales sísmicas débiles o fuertes usamos el sismómetro y el acelerómetro respectivamente. Un aspecto importante para la

selección y uso adecuado del transductor es la frecuencia natural ya que esta debe ser diferente a la de la aplicación para evitar la resonancia y garantizar una señal representativa del sitio.

2.2.1 Principio Básico de Funcionamiento

El primer componente de un sistema de registro sísmico es el sensor, dado que las mediciones se realizan bajo un marco de referencia que es la superficie terrestre, casi la mayoría de los sensores sísmicos fundamentan su funcionamiento en la inercia de una masa suspendida, la cual tendera a permanecer estacionaria en respuesta a el movimiento en el exterior. El movimiento relativo entre la masa suspendida y el suelo se asume como la función que representa el movimiento del suelo. De acuerdo con esto, el elemento primario del sensor es un oscilador armónico simple amortiguado de un grado de libertad; como el que se muestra esquemáticamente en la figura 8. Este consta de una masa, m , suspendida de un mecanismo elástico de constante K , sujeta a un sistema de amortiguación de coeficiente C .

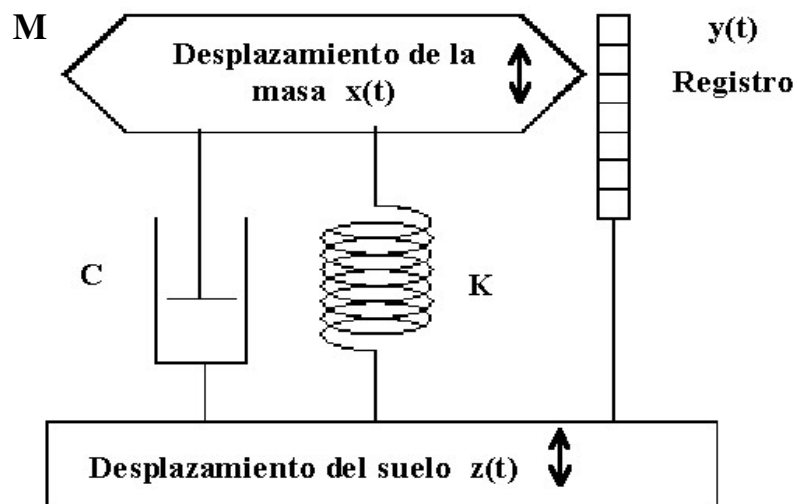


Figura 8. Esquema de funcionamiento de un sismómetro

Al aplicar a la base del instrumento una excitación $z(t)$ (desplazamiento absoluto del suelo), la masa experimenta un desplazamiento absoluto $x(t)$. El desplazamiento relativo, $y(t)$, de la masa respecto al suelo es:

$$y(t) = x(t) - z(t) \quad [2.1]$$

En los sensores con transductor mecánico, este desplazamiento relativo $y(t)$, amplificado es precisamente el registro obtenido.

La ecuación del movimiento del sistema de la figura 8 es:

$$m \ddot{x} + C \dot{y} + Ky = 0 \quad [2.2]$$

donde, como se ha dicho, m es la masa oscilante, k la constante elástica (fuerza / desplazamiento) y C el coeficiente de amortiguamiento (fuerza / velocidad).

Los sensores de tipo mecánico presentan una serie de problemas prácticos que los hacen inadecuados para muchas aplicaciones, entre estas desventajas están la baja sensibilidad, la cual está relacionada con el tamaño del sensor. Es decir que para aumentar la sensibilidad de un sensor se tiene que aumentar su tamaño, volviéndose poco práctico para trabajos de campo; además los registros se realizan sobre papel ahumado por medio de un sistema mecánico delicado y bastante complicado de manejar.

Para evitar estos problemas se usan los transductores electromagnéticos (Figura 9), los cuales se diseñan para tener una mayor versatilidad y son compatibles con diversos sistemas de amplificación y registro electrónico.

El sismómetro electromagnético cuenta con una bobina que rodea la masa del sismómetro y un imán que está fijado a la carcasa.

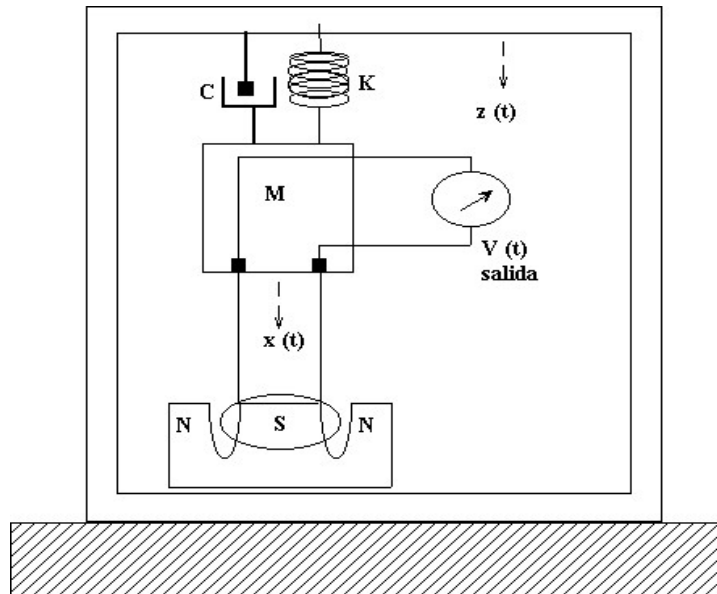


Figura 9. Esquema de funcionamiento de un sensor electromagnético.

Al tener lugar un movimiento relativo entre la masa y la carcasa, se induce entre los bornes de la bobina una fuerza electromotriz $V(t)$, proporcional a la velocidad relativa $\dot{y}(t)$.

2.2.2 Características Predominantes

Los sensores hacen parte del sistema para registrar ondas sísmicas y se denomina como el elemento más importante ya que es el encargado de tomar el dato directamente del suelo. Esto hace que la elección de este dispositivo sea la de más importancia ya que sus características se deben adaptar lo mejor posible a las condiciones de las ondas a medir.

2.2.2.1 El rango de frecuencias de operación (Ancho de banda)

El ancho de banda de un sensor significa el rango de frecuencias para los cuales está planteado el ejercicio de este, y debe afectar o envolver el intervalo de frecuencias de mayor utilidad del fenómeno que se desea experimentar.

Para el caso de los microtemblores, el rango de frecuencias de acción del sensor a seleccionar, se debe ajustar al intervalo entre 0.1 y 10 Hz., lo cual es relativamente fácil de adquirir entre los sensores más usuales del mercado.

2.2.2.2 La Sensibilidad

Término utilizado para describir el mínimo cambio en la especie censada que el instrumento puede detectar. Se refiere a la posibilidad de discriminar dos valores muy cercanos entre si. La sensibilidad se expresa cuantitativamente mediante la tasa de cambio de la medición respecto del cambio en la especie censada. Para nuestro caso la amplitud del registro A_R y el valor del movimiento que esta presentado el suelo A_M :

$$S = \frac{A_R}{A_M} \quad [2.3]$$

Dada la naturaleza de las oscilaciones que intervienen en el registro de microtemblores se deben inquirir sensores con alta sensibilidad a movimientos con pequeñas amplitudes.

2.2.2.3 El Rango Dinámico

El rango dinámico se define como la relación entre la máxima magnitud que el sensor puede producir como respuesta a la señal registrada (M_{\max}), y la mínima magnitud que puede resolver el sensor, es decir la menor señal sobre la que puede producir una respuesta registrable (M_{\min}),

$$RD = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} \quad [2.4]$$

La unidad comúnmente usada para expresar el rango dinámico de un sensor es el Decibelio (db), el cual es una medida de la relación entre dos magnitudes o niveles A_2 y A_1 ,

$$N(db) = 20 \log \frac{A_2}{A_1} \quad [2.5]$$

La razón de las magnitudes representa la cantidad de puntos o posiciones usados para graficar la curva entre estos límites y la resolución del equipo determina esta cantidad. Por ejemplo, para un sistema que cuenta con una resolución de 24 Bits, es decir genera 224 posiciones, que es igual a 16777216.

$$N(db) = 20 \log 2^n ; \text{ donde } n \text{ es la resolución.} \quad [2.6]$$

El rango dinámico del K2 es:

$$N(db) = 20 \log 2^{24} = 144,494 \text{ db.}$$

Los sensores especializados para este tipo de mediciones tradicionalmente cuentan con un rango dinámico mayor a los 100 decibeles.

2.2.3 Sismómetros y Acelerómetros

Sismómetros. La mayoría de los sensores sísmicos actuales utilizan el sistema de fuerza de retroalimentación o sistemas de fuerza balanceada. Este sistema consiste de un circuito de retroalimentación negativo, el cual ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa inercial para cancelar el movimiento relativo. Un transductor eléctrico convierte el movimiento de la masa en una señal eléctrica, la cual es una estimación de la fuerza de retroalimentación que debe ejercerse para anular el movimiento. La cantidad de fuerza que se debe ejercer

para anular el movimiento del péndulo corresponde a la aceleración del suelo. Este sistema permite extender el ancho de banda y la linealidad de los sismómetros, porque no permite grandes movimientos de la masa que doblen los resortes o los niveles. La señal de salida de estos sistemas posee un gran rango dinámico debido a que los transductores electromagnéticos tienen un amplio rango dinámico. En la figura 10 se muestran dos sismómetros muy usados.



a. Sismómetro de Banda ancha STS-2



b. Sismómetro de Banda ancha Guralp

Figura 10. Sismómetros.

Acelerómetros: Los acelerómetros miden la aceleración del suelo o la fuerza que actúa sobre las estructuras. Actualmente, con los avances tecnológicos y los sensores de banda ancha, no hay mucha diferencia entre los sismómetros y los acelerómetros. Sin embargo, los acelerómetros no registran en continuo y generalmente se activa al ser excitado por una onda sísmica que se registra a alta velocidad en disco digital. Durante el registro de la aceleración de un sismo, paralelamente se realiza el registro del tiempo. A partir de esta información puede obtenerse mediante integración registros en velocidad y desplazamiento en el campo próximo. Algunos equipos son mostrados en la figura 11, la figura 11-a es un registrador que contiene un acelerómetro como sensor.



a. Registrador Kinemetrics K-2



b. Acelerómetro FBA-23

Figura 11. Acelerómetros.

2.3 AMPLIFICADORES

Los amplificadores sísmicos son de diseño muy variado, pero todos ellos tienen como característica la alta fidelidad a las bajas frecuencias, ya que el rango de las señales de origen sísmico que normalmente se manejan se encuentra entre 2 y 200 ciclos por segundo. Pueden tener capacidad de amplificación desde 8 veces (18 decibeles) hasta dos millones de veces (126 decibeles).

En la mayoría de los sismómetros pueden operarse simultáneamente varios amplificadores, utilizando algunos elementos comunes, como fuente de poder, sistema de control, filtros, etc.

Cada amplificador recibe la señal de un geófono o combinación de geófonos conectados al mismo cable conductor, constituyendo lo que se conoce como un canal de amplificación.

Los sismómetros más comunes pueden operar simultáneamente 1, 6, 8, 12, 24, 48, 96 y hasta más de 1000 canales. Aquellos sismómetros que operan muchos canales, en realidad no tienen tantos amplificadores como canales, sino que se utilizan dispositivos electrónicos que conectan en secuencias varios geófonos a un mismo amplificador (multiplicador), en un periodo de tiempo muy corto, que para cubrir un ciclo completo de conmutación, puede ser de 2 milisegundos, 4 milisegundos, etc., que puede ajustarse según las necesidades.

Al salir la señal del amplificador para ser alimentada a los sistemas de medición o registro, debe ser multiplicada, o sea invertido el proceso de conmutación.

El Kinematics K2 cuenta con una entrada de 12 canales y una unidad de amplificación con ganancia variable en x1, x3, x10, x30, x100 (opt).

2.4 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El siguiente reto en el proceso de obtener información a partir de eventos sísmicos, es el de tener la capacidad de grabar la señal proveniente del sismómetro con la mejor calidad posible, para lograr este propósito se han venido desarrollando sistemas de adquisición de datos cada vez mas avanzados tecnológicamente.

Se puede definir un sistema de adquisición de datos como un equipo autónomo diseñado para registrar la señal de salida de un sensor, el cual transforma el movimiento de la superficie terrestre en un voltaje proporcional al desplazamiento, la velocidad o la aceleración de este.

Los avances logrados en la actualidad en el campo del procesado de las señales digitales, las técnicas de almacenamiento de la información y los circuitos integrados; llevan a la existencia en el mercado de múltiples equipos que llenan las necesidades de un sistema de registro y contienen otras características mas avanzadas.

Un sistema de adquisición de datos sísmicos, consiste típicamente de un convertidor de la señal analógica a digital (digitizador – digitizer), y de un sistema de grabación de la información registrada por el sensor. Lo más común en la actualidad es realizar la grabación de la señal en discos duros, aunque algunos equipos utilizan otros sistemas de memoria. El digitizador y la grabadora de la señal son comúnmente parte de la misma unidad, aunque físicamente son dos unidades separadas.

Además de estas partes básicas, el equipo generalmente cuenta con sistemas de comunicación (en el caso de redes manejadas a distancia) y con mecanismos de activación automáticos (para los casos en los que se requieran registrar únicamente eventos que superen cierta magnitud).

Aunque el manejo de estos equipos tienen una dificultad intrínseca que aumenta con la sofisticación y el número de opciones que maneje por lo que se requerirá de un adiestramiento previo para poder utilizarlo adecuadamente en las pruebas de campo, se podría decir que en resumen las funciones básicas de este equipo son convertir la señal análoga a señal digital, realizar filtraciones de esta señal y finalmente grabar los registros realizados.

El convertidor de la señal análoga a digital (A/D converter - ADC), es el encargado de tomar la señal que los sensores han captado del movimiento en un punto de la estructura y que transmiten mediante una señal eléctrica (análoga), para luego hacer un muestreo de esta señal espaciándola en intervalos de tiempo iguales, Δt , convirtiéndola en una señal digital la cual se almacena en la memoria del equipo, esta señal digitalizada podrá ser analizada y procesada posteriormente por un computador.

2.4.1 Sistema Convertidor Analógico - Digital

La tarea fundamental del sistema DAQ es la medición y generación de señales físicas del mundo real. Antes que un sistema basado en procesadores pueda medir una señal física, un sensor o transductor deberá convertir estas señales en una señal eléctrica, como voltaje o corriente.

Normalmente, las tarjetas insertables DAQ se consideraban como sistema DAQ completo; sin embargo, las tarjetas son solamente uno de los componentes del sistema. A diferencia de la mayoría de los instrumentos independientes, no se

pueden conectar señales directamente a una tarjeta DAQ. Algún accesorio debe acondicionar la señal antes que la tarjeta la convierta en información digital. Finalmente, el software controla el sistema adquiriendo los datos, analizándolos y presentando los resultados.

Entrada Analógica

Cuando se miden señales analógicas con una tarjeta ADC, se deben considerar los siguientes factores que afectan la calidad de la señal digitalizada: rango de trabajo para la tarjeta (FSR), resolución, rango, frecuencia de muestreo y ruido.

Las entradas al terminal común están referidas a un punto de tierra común. Estas entradas se pueden utilizar cuando las señales son altas (más de 1 V), los cables que corren desde la fuente de la señal hacia el hardware de entrada analógica son cortos (menos de 4.5 m) y todas las entradas comparten una referencia de tierra común. Si las señales no cumplen con estas condiciones, se utilizan las entradas diferenciales. Con entradas diferenciales, cada entrada tiene diferentes potenciales con respecto a tierra. Las entradas diferenciales también reducen o eliminan los errores causados por ruido, ya que el ruido adquirido en modo común por las señales se cancela.

La resolución es el número de bits que el convertidor analógico a digital (ADC) utiliza para representar la señal analógica. Mientras mayor sea la resolución, mayor es el número de divisiones entre las cuales se divide el rango y por lo tanto, menor es el cambio detectable en el voltaje. Un convertidor de 3 bits (rara vez utilizado, pero útil para este ejemplo), divide el rango en 2³ u 8 divisiones. Un código binario entre 000 y 111 representa cada división. Claramente, la señal digital no es una buena representación de la señal original porque se ha perdido mucha información durante la conversión. Al incrementar la resolución a 16 bits, el número de códigos del ADC se incrementa de 8 a 65, 630 (2¹⁶) y, por lo tanto se

puede obtener una representación extremadamente cercana a la señal analógica original.

El rango se refiere a los niveles de voltaje máximo y mínimo que el ADC puede adquirir. Las tarjetas DAQ ofrecen rangos seleccionables (por lo general de 0 a 10 V o de - 10 a 10 V), por lo que puede ajustar el rango de la señal de ese ADC para aprovechar al máximo la resolución disponible para medir la señal con mayor precisión.

La ganancia se refiere a cualquier ampliación o atenuación de la señal que pueda ocurrir antes que la señal sea digitalizada. Al aplicar ganancia a la señal se disminuye efectivamente el rango de entrada del ADC y, por lo tanto, se permite que el ADC utilice tantas divisiones digitales como le sea posible para representar a la señal. Por ejemplo a continuación se muestra el efecto de aplicar ganancia a una señal que fluctúe entre 0 y 5 voltios utilizando un ADC de 3 bits y un rango de 0 a 10 V. Si no se aplica ganancia, o con ganancia = 1, el ADC utiliza sólo cuatro de las ocho divisiones en la conversión. Al amplificar la señal con una ganancia de dos antes de digitalizar, el ADC utiliza ahora las ocho divisiones y, por lo tanto, la representación digital es más exacta. Efectivamente, la tarjeta cuenta ahora con un rango de entrada de 0 a 5 voltios, porque cualquier señal arriba de 5 será amplificada por un factor de dos, haciéndola mayor de 10 V.

Teniendo en cuenta las características del transductor y el rango de valores que toma la señal física a medir se puede definir un nivel de amplificación que permita colocar la señal de tensión en unos valores similares a los valores de entrada del conversor de datos.

Rangos de la señal a medir: $\pm 10 \times 10^{-3} \left[\frac{cm}{s} \right]$

Sensibilidad del sensor: $1,15 \left[\frac{V}{in/s} \right] \equiv 0,453 \left[\frac{V}{cm/s} \right]$

Rango de entrada del conversor: ± 10 [V].

Entonces:

$$(10 \times 10^{-3}) * (0,453) * \mathbf{A} \cong 10$$
$$\mathbf{A} \approx 2200$$

Donde A es el nivel de amplificación necesario para aprovechar de la mejor manera el rango de entrada del conversor.

Para el caso de interés se tiene una señal de tensión que por su bajo nivel se encuentra muy expuesta al ruido (entendido como las señales que se presentan en las bandas que no son de utilidad para la aplicación) y que además no posee la amplitud suficiente para trabajar adecuadamente con el rango de entrada del conversor analógico-digital.

Por ésta razón es necesario llevar a cabo procesos de amplificación y filtrado con el fin de entregarle al conversor una señal que presente ciertas características que permitan aprovechar al máximo las potencialidades de un conversor de 16 y 24 bits como los que se utilizarán.

El rango, la resolución y la ganancia disponible en una tarjeta DAQ determinan el menor cambio detectable en la entrada de voltaje. Este cambio en voltaje representa un bit menos significativo (LSB) de valor digital y es usualmente llamado ancho de código. El cambio detectable más pequeño se calcula como $\text{rango} / (\text{ganancia} * 2^{\text{resolución en bits}})$.

Por ejemplo, una tarjeta DAQ de 12 bits con un rango de entrada de 0 a 10 V y una ganancia de 1 detecta cambios de 2.4 mV, mientras que la misma tarjeta con un rango de entrada de – 10 a 10 voltios detecta sólo un cambio de 4.8 mV.

$$\frac{\text{rango}}{\text{ganancia} * 2^{\text{resolucion}}} = \frac{10}{1 * 2^{12}} = 2.4 \text{ mV} \quad \frac{20}{1 * 2^{12}} = 4.8 \text{ mV}$$

2.5 EQUIPO EMPLEADO

El equipo utilizado para desarrollar los objetivos propuestos esta comprendido por dos instrumentos: un sistema de adquisición de datos acompañado de un sismómetro los cuales fueron diseñados y elaborados por estudiantes de la Universidad, por ello se referenciarán como “equipo UIS” y un registrador Kinematics (K2), el cual tiene incorporado todo lo necesario para la adquisición de datos incluyendo el sensor.

El sistema de adquisición de datos K2 de kinematics posee un acelerómetro como transductor y las características principales de este sistema son:

Rango Dinámico: 145 dB + (modelo del ruido de EpiSensor disponible de Kinematics).

Ancho de Banda: DC a 200 Hz.

Sensibilidad: 125 V/g.

Resolución: 16 bits DSP con filtro antialias.

Salida de Full escala: Seleccionable por el usuario en $\pm 2.5V$; $\pm 10V$; $\pm 5V$, $\pm 20V$ diferencial.

Frecuencia natural: 202 Hz.

Rata de muestreo: seleccionable en 20, 40, 50, 100, 200 y 250.

En cuanto al equipo UIS, el sensor es un transductor triaxial- Modelo Hs-1 Lt. Este modelo está disponible con frecuencias naturales desde 4.5 hasta 28 Hz, con sensibilidades desde 460 hasta 1150 mV por pulgadas/segundo. Este sensor posee una frecuencia de resonancia de 4.5 Hz, la cual es una de las frecuencias estándar en la industria, se encuentra cerca de las frecuencias de interés para observar microtemblores y sus principales características se encuentran en la tabla 2. En el ANEXO C se puede revisar equipos empleados en varios estudios consultados.

Tabla 2. Características del equipo UIS (Cala, 2004).

| Descripción | especificación a 25 °C |
|---------------------------|-------------------------------|
| Frecuencia Natural | 4,5 Hz \pm 0.75 Hz |
| Banda de Paso | <140 Hz |
| Sensibilidad | 1,15 V/in/s \pm 10% |
| Constante de transducción | 0,0325 |
| Masa móvil | 22 g |
| Resolución | 16 Bits |

La frecuencia de muestreo que posee el sistema de adquisición de datos del equipo UIS no es variable y es de 305.1833 Hz, esto indica que cada 0.00327 segundos se registra un dato, quiere decir que si se toman mediciones de 10 min, tendremos un registro de 183486 datos; además esta frecuencia es muy alta para la frecuencia propuesta por la teoría de Nyquist y se tendrá unas muy buenas representaciones gráficas. El K2 es un equipo más completo y ofrece la opción de escoger la frecuencia de muestreo, la cual será explicada más adelante como muestreo de señales.

Por otra parte; el equipo UIS tiene una desventaja para realizar las mediciones de microtremors, aunque su transductor cumple con lo recomendado, es decir un sismómetro con ancho de banda en el rango requerido, la tarjeta de adquisición de datos esta diseñada para medir el rango de las frecuencias mayores a 4.5 Hz, esto significa que solo medirá la mitad del contenido frecuencial de interés. Esta razón hace que el equipo que usa como transductor un acelerómetro, es decir el K2, sea el vital para este estudio.

Cabe anotar que la visualización y manipulación de datos con el equipo UIS es posible gracias a un software elaborado por los mismos diseñadores y que se basa en la plataforma de Lab-View. Para ejecutar el programa es necesaria la instalación previa de la plataforma ya que el software no posee licencia para ejecutarse por si solo.

2.5.1 Modos de operación del equipo UIS

El equipo da dos posibilidades de trabajo al momento de realizar las pruebas de campo. La primera, denominada modo continuo, consiste en utilizar el equipo para adquirir datos en forma continua con la ayuda de un computador como elemento de almacenamiento y visualización. La segunda posibilidad consiste en utilizar el equipo en un modo denominado “datalogger” en el cual las pruebas son adquiridas independientes del PC, haciendo uso del banco de memorias, el cual almacena las pruebas junto con la fecha y hora en que fueron tomadas, hasta el momento en el que el usuario decida descargarlas para su posterior visualización.

La razón de implementar estos modos de trabajo, es brindarle al usuario la posibilidad de trabajar de la manera que mejor se adapte a sus requerimientos específicos en un momento dado (portabilidad, disponibilidad de un computador portátil para una prueba a campo abierto, etc.).

Una explicación más detallada de estos modos de operación se brinda a continuación.

Modo Continuo:

Consiste en trabajar el equipo como un osciloscopio y requiere estar conectado directamente al PC por medio de un cable serial. Permite visualizar los datos inmediatamente después de ser adquiridos; en este modo de trabajo el equipo tomará una muestra por cada canal (X, Y, Z) y las transmitirá al PC para su visualización, éste proceso se repetirá hasta que se dé la orden de terminación de la prueba que se está tomando.

Este modo es conveniente cuando la prueba se va a efectuar en un sitio con disponibilidad de un PC o de un computador portátil que tenga instalado el software de visualización en Labview diseñado por los autores de este proyecto o

en su defecto otra interfaz compatible con el equipo. La principal ventaja consiste en que se podrá trabajar todo el tiempo que se requiera con la posibilidad de guardar los datos adquiridos directamente en disco duro, lo que brinda un amplio rango de tiempo para realizar pruebas estacionarias.

Para proporcionarle más robustez al sistema estos datos serán almacenados igualmente en la memoria del equipo de manera temporal, previendo alguna falla en el PC, como un bloqueo imprevisto del sistema operativo o un suceso externo como un apagón de luz.

Modo Data-Logger:

El modo “Data-Logger” consiste en realizar una adquisición de datos independiente del PC, pues el proceso se manejará por medio de la interfaz de usuario (teclado y LCD) y sólo se dispondrá del PC para la descarga y posterior visualización de las pruebas.

La ventaja principal de este modo de trabajo es su flexibilidad puesto que permite realizar pruebas en cualquier lugar, con la confianza de que las muestras almacenadas no se perderán a pesar de la ausencia de alimentación, ya que la memoria del sistema es no volátil.

La capacidad de almacenamiento es considerable (hasta 38 minutos) y se presenta la posibilidad de dividir la memoria para realizar pruebas de menor duración establecidas por el usuario. En este modo el usuario podrá configurar el reloj de tiempo real (RTC), para garantizar la fecha y hora exacta en que se realiza la prueba.

La configuración del modo de trabajo se efectúa desde la interfaz de usuario del equipo (teclado y LCD) por medio de menús y desde la interfaz gráfica en Labview, donde se escoge el modo de trabajo para poder realizar la descarga de datos, para su correcta visualización.

3. SEÑAL

Una señal se puede definir como una cantidad física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes. Por ejemplo el voltaje cambiando con respecto al tiempo en un circuito electrónico, o el brillo de una imagen variando con la distancia.

Las señales han adquirido importancia en muchos campos del conocimiento, tales como las telecomunicaciones, aeronáutica, astronáutica, acústica, sismología, ingeniería biomédica y medicina. Existen diferentes tipos de señal y en cada área del conocimiento, las señales utilizadas son de distinta naturaleza. Por ejemplo, en acústica las señales son generadas por fuentes de sonido como la voz, la música o cualquier clase de ruido; en control de procesos pueden ser señales de tipo térmico, mecánico o eléctrico generadas por los procesos mismos; en medicina pueden ser señales eléctricas o magnéticas generadas por el organismo humano; en sismología se trata de señales mecánicas, es decir, movimientos que se producen cuando las ondas se propagan a través de la corteza terrestre. Cada tipo de señal tiene parámetros que la caracterizan; es decir, que reflejan el comportamiento de uno o varios fenómenos físicos; estos parámetros contienen información de los fenómenos físicos que se están midiendo.

En nuestro caso, el análisis de las señales sísmicas propagándose en el suelo, el fenómeno físico involucrado es el movimiento de las capas que forman el subsuelo. Estos movimientos generalmente producen, a su vez, movimientos en la superficie que pueden ser detectados y medidos, estos movimientos tienen ciertas características, tales como la intensidad y la naturaleza ondulatoria. Si el movimiento de la superficie, que es una señal analógica se traduce de alguna manera a una señal eléctrica o digital, las características de la señal sísmica se preservan, y en este caso se contaría con una señal que podría ser estudiada con

mayor facilidad que la señal mecánica original. Más adelante se definirán estos dos tipos de señales y los parámetros que las caracterizan.

En el caso de las señales sísmicas una de las características más importantes es que son función del tiempo: a medida que avanza el tiempo, la intensidad de los movimientos, es decir la amplitud, toma diversos valores alcanzando para un determinado tiempo su máximo valor y luego disminuye hasta que el suelo vuelve a su estado inicial de reposo.

3.1 DOMINIO DE LA SEÑAL

Una señal puede ser representada y estudiada desde dos dimensiones diferentes: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Cuando una señal se representa usando el tiempo como la variable independiente se dice que pertenece al dominio del tiempo, mientras que cuando la señal se representa usando como variable independiente la frecuencia se dice estar representando en el dominio de la frecuencia (Figura 12).

El espectro de una señal nos enseña cómo es esa señal en el dominio frecuencial; la respuesta en frecuencia de un sistema nos aporta el conocimiento de como se comporta ese sistema para diferentes entradas, gracias a la perspectiva que aporta el dominio de la frecuencia.

Una señal podrá ser representada en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia sin que se modifique la señal, además podemos movernos entre estos parámetros de uno a otro usando la herramienta matemática conocida como: La Transformada de Fourier. La Transformada de Fourier es útil porque se encarga de llevar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, el trabajo con la señal en frecuencia, no solo sirve como información, sino que la señal puede ser modificada. De forma similar una señal representada en el dominio de

las frecuencias se puede llevar al dominio del tiempo realizando una operación inversa.

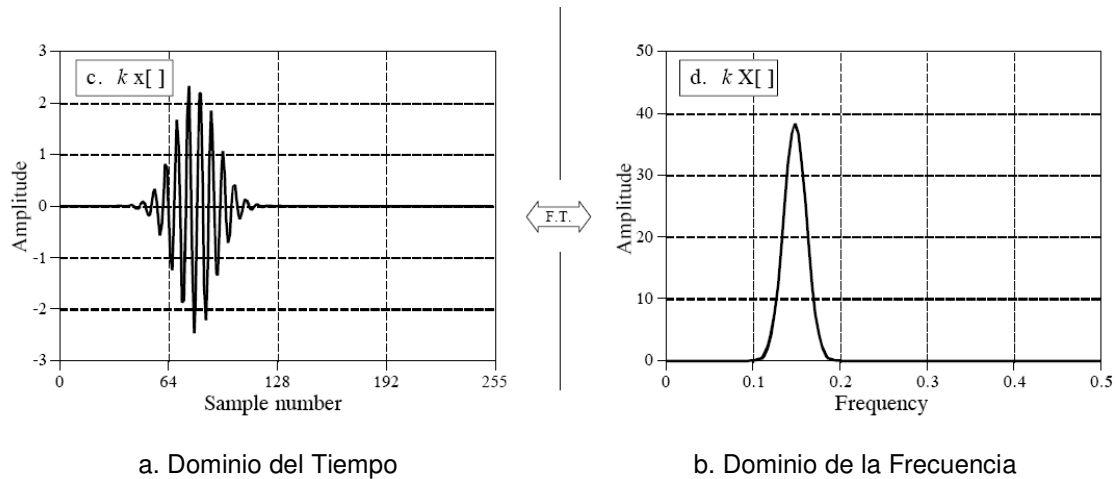


Figura 12. Representación grafica de una señal.

El uso de La Transformada de Fourier se ve justificado, porque no en todos los análisis desarrollados para las señales es conveniente aplicarlos en el dominio del tiempo, por el grado de complejidad que puede generarse y dependiendo de lo que se requiera hacer con la señal registrada, uno de los dominios tiende a ser mas fácil de manejar que el otro, así que en vez de usar procedimientos complicados para trabajar con una señal en el dominio del tiempo, puede llevarse al dominio de la frecuencia donde estos procedimientos se vuelven mas simples.

3.2 TIPOS DE SEÑALES

3.2.1 Señales Analógicas

Las señales analógicas son aquellas cuya intensidad o frecuencia es directamente proporcional a los datos que representa y sus magnitudes se representan mediante variables continuas; comúnmente una señal contiene magnitudes físicas como: amperaje, voltaje, potencia, presión, temperatura, o cualquiera que pueda

ser medida. Las señales analógicas puede ser caracterizadas por los parámetros: nivel, forma, frecuencia.

3.2.2 Señales Digitales

Las señales digitales son aquellas que utilizan distintos objetos o dígitos, para representar elementos del mundo real y sus magnitudes pueden representarse mediante valores discretos en lugar de variables continuas, este tipo de señales son discretas tanto en tiempo como en amplitud; las señales digitales son de mejor calidad, y sirven para representar las señales analógicas, desde luego hay que convertirlas; pero hay que dejar claro que las señales digitales son artificiales, es decir creadas por el hombre. Una señal digital se puede caracterizar por dos parámetros solamente: su estado y su tasa o rata.

El estado quiere decir que la señal esta limitada a tomar magnitudes físicas determinadas y son sólo unos valores discretos (on – off) o (HI, LOW); como la amplitud de la señal puede solo tomar uno de dos valores se le conoce como señal digital binaria. Por abstracción, dichos estados se sustituyen por ceros y unos, lo que facilita la aplicación de la lógica y la aritmética binaria. Si el nivel alto se representa por 1 y el bajo por 0, se habla de lógica positiva y en caso contrario de lógica negativa.

La tasa o rata es el cambio de un nivel a otro que ocurre periódicamente, no es arbitrario; es decir, tiene un valor predeterminado que se denomina “periodo”. En el caso de una computadora la transición se produce en nanosegundos, pero el número es variable, depende de la velocidad de la computadora: ejemplo, 600 millones de transiciones en un segundo (procesador de 600Mhz, 600 millones de Hz o 600 millones de ciclos por segundo).

La señal digital es una sucesión de valores altos y valores bajos. En otras palabras, es una sucesión de “unos” y “ceros”.

Una señal digital puede provenir de los siguientes tipos de fuentes:

Una fuente discreta en el tiempo; Una fuente que genera señales discretas en el tiempo y continuas en amplitud; Una fuente continua en el tiempo y continua en amplitud. En este caso es necesario muestrear la señal continua, para posteriormente cuantizarla.

3.3 SISTEMAS DE SEÑALES

El procesamiento de señales se realiza por medio de sistemas; un sistema es un conjunto de componentes o dispositivos del mundo físico que interactúan entre sí, que aceptan señales como entradas, las transforman y generan otras señales a su salida; un sistema puede ser visualizado como una caja negra del mundo físico que transforma la señal a su entrada para generar la señal a su salida. En la figura 13 $x(t)$ representa la señal de entrada al sistema, la caja representa el sistema que transforma la señal y $S[x(t)]$ la señal de salida transformada.

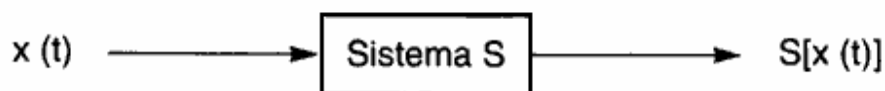


Figura 13. Representación esquemática de sistema de señales.

Los sistemas usados para el procesamiento de señales sísmicas están compuestos comúnmente por amplificadores y filtros, que son dispositivos físicos conocidos como hardware; estos modifican la señal analógica por medio de circuitos eléctricos. En general, el sistema se caracteriza por el tipo de operación que realiza sobre la señal. Por ejemplo, si la operación es lineal, el sistema se denomina lineal, si la operación es no lineal, el sistema se dice que es no lineal, etc.

Para nuestros fines, es conveniente ampliar la definición de sistema para incluir no sólo dispositivos físicos, sino también realizaciones software de operaciones sobre una señal. En el procesado digital de señales en un ordenador, las operaciones realizadas sobre una señal constan de varias operaciones matemáticas especificadas por un programa de software. En este caso el programa representa una implementación del sistema en software. Así tenemos un sistema de procesado digital que es mucho más útil, ya que podemos variar los parámetros de transformación de la señal, por ejemplo en el filtrado, cambiar el rango de frecuencias no deseadas desde un software. Dado que las señales sísmicas son analógicas, un sistema digital debe incluir un dispositivo conversor de señal de análogo a digital.

3.4 FILTRADO DE LA SEÑAL

Los traductores que miden la señal detectan un amplio rango del espectro de frecuencias, el filtrado permite dejar pasar solo las frecuencias que contengan la información que nos interesa y eliminar las demás; Un filtro es un sistema que realiza un proceso de discriminación de una señal de entrada obteniendo variaciones en su salida, los filtros están diseñados para dejar pasar una serie de frecuencias; dependiendo de las características del filtro la señal de salida puede presentar cambios en amplitud, frecuencia o fase.

3.4.1 Tipos De Filtros

Existen diferentes clasificaciones, los diversos tipos de filtros descritos a continuación corresponden a la clasificación de acuerdo con la parte del espectro que dejan pasar y que eliminan, estos son: pasa-bajas, pasa-altas y pasa-banda. Para cada uno de estos filtros existen dos zonas principales las cuales son llamadas Banda de paso y la banda de atenuación.

En la banda de paso, es donde las frecuencias pasan con un máximo de su valor, o hasta un valor de 70.71% con respecto a su original (la cual es la atenuación de -3 dB)

3.4.1.1 Pasa Bajas

Este filtro sirve para eliminar las frecuencias altas (la alta o baja frecuencia es un término relativo que dependerá de la aplicación); su funcionamiento es a base de un capacitor y resistencia, este filtro tiene la siguiente configuración:

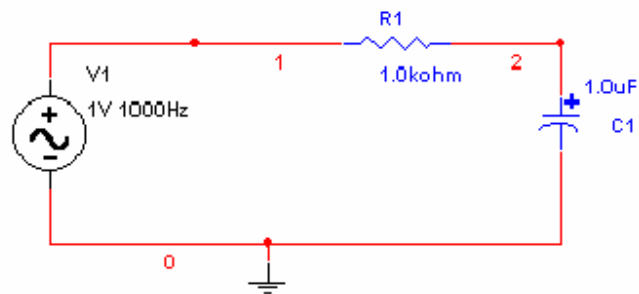


Figura 14. Esquema del circuito para filtro pasa bajas.

El capacitor se comporta como una resistencia dependiente de la frecuencia por la relación de:

$$R_c = \frac{1}{C2\pi f}$$

Es decir, para frecuencias muy bajas el capacitor (por la regla de división de voltaje) al ser una resistencia muy alta, consume todo el voltaje, si se conecta la salida en paralelo al capacitor se tendrá el máximo de voltaje a la salida.

Conforme aumentemos la frecuencia de la fuente el capacitor disminuye su impedancia, con lo que el voltaje que disipa disminuye, hasta tender a cero. Este tipo de filtro se representa con una gráfica de respuesta en frecuencia:

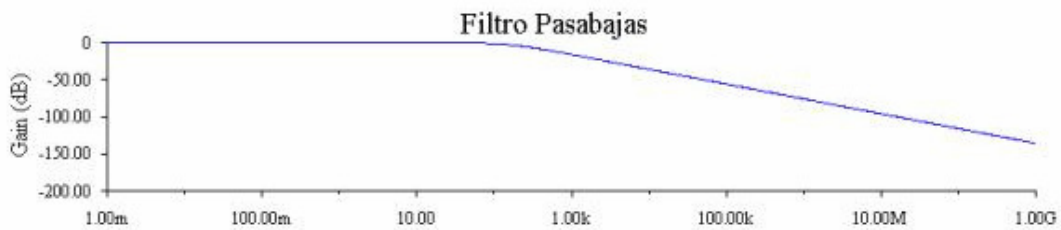


Figura 15. Esquema de filtro pasa bajas.

3.4.1.2 Pasa Altas

Este filtro sirve para eliminar las frecuencias bajas, es el segundo de los filtros pasivos, el único cambio con respecto al filtro pasa bajas que presenta es la conexión de la salida, la cual en vez de tomarse del capacitor se toma de la resistencia lo cual nos provoca que en vez de dejar “pasar” las frecuencias bajas pasen las frecuencias altas.

Como ya se menciono el circuito físicamente es igual que el anterior, solamente la salida se toma de la resistencia.

Explicación, cuando la frecuencia es demasiado baja, el voltaje se consume casi en su totalidad en el capacitor, el cual se comporta como una impedancia de valor muy alto, por lo que en la salida no se tiene casi voltaje, cuando la frecuencia aplicada es aumentada se tiene que el valor de la impedancia representada por el capacitor disminuye hasta que casi no consume voltaje, y la mayoría del voltaje se tiene a la salida.

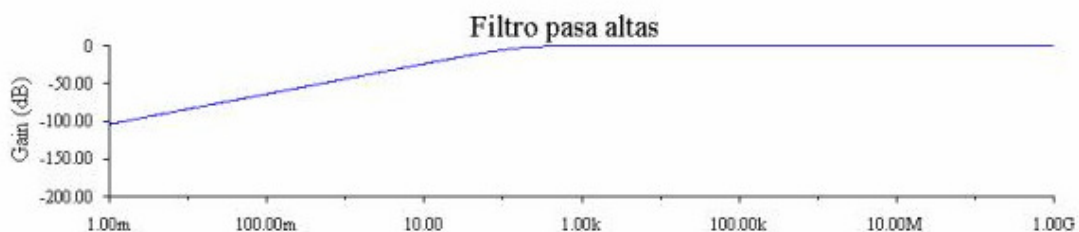


Figura 16. Esquema del filtro pasa altas.

Estos dos filtros tienen un valor llamado frecuencia de corte, la cual es el valor de la frecuencia a partir del cual se considera que ya está filtrando las señales. Esta frecuencia está determinada como la frecuencia en la que el valor de la salida con respecto a la entrada tiene una atenuación de -3dB. (o la salida es 0.717 del valor de la entrada). Dependiendo de los valores elegidos de resistencia y capacitancia será el valor de la frecuencia de corte. Pero, para una resistencia fija, el valor de la frecuencia de corte depende del valor del capacitor. Siguiendo un procedimiento similar al anterior obtenemos que para el filtro pasa altas:

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

$$f_c = \frac{1}{RC2\pi}$$

Donde f_c es la frecuencia de corte en hercios, R es la resistencia en ohmios y C es la capacidad en faradios.

3.4.1.3 Pasa Banda

Estos filtros sólo dejan pasar frecuencias dentro de una banda. Este es un filtro que se compone de un filtro pasa baja en serie con un filtro pasa alta entre los que hay un rango de frecuencias que ambos dejan pasar.

Los componentes se deben seleccionar para que la frecuencia de corte del filtro pasa altas sea menor que la del filtro pasa bajas.

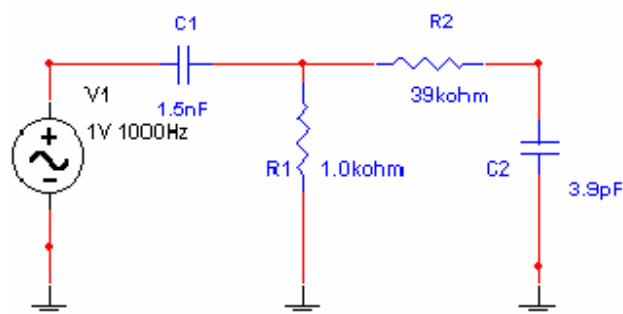


Figura 17. Esquema del circuito para filtro pasa banda.

Un filtro ideal de este tipo sería el que tiene bandas pasantes y de corte totalmente planas y zonas de transición entre ambas nulas, pero en la práctica esto nunca se consigue; siendo normalmente más parecido al ideal cuando mayor sea el orden del filtro. En filtros de órdenes altos suele aparecer un rizado en las zonas de transición conocido como efecto Gibbs.

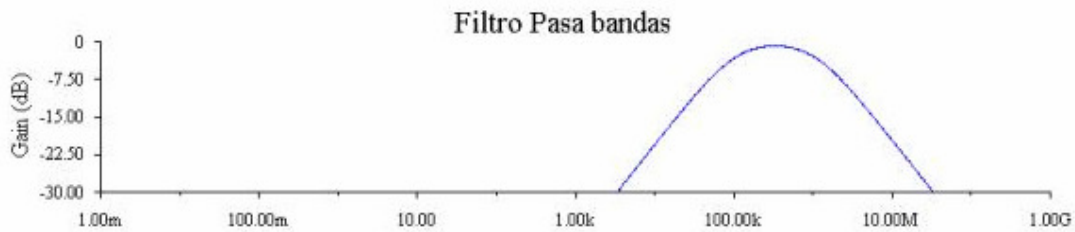


Figura 18. Esquema de filtro pasa bandas.

La característica más importante de este circuito es el ancho de banda que permitiremos pasar, el ancho de banda es igual a la resta de las frecuencias de corte.

3.5 CONVERSIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS A SEÑALES DIGITALES

La mayoría de las señales de interés práctico, señales de voz, biológicas, sísmicas, radar, sonar y distintos tipos de comunicación, como las señales de audio y video, son analógicas. Para procesar señales analógicas por medios digitales es necesario convertirlas a formato digital, esto es, transformarlas en una secuencia de números de precisión finita. Este procedimiento se denomina conversión análogo-digital (A/D) y los dispositivos correspondientes conversores A/D (ADC).

Conceptualmente, podemos ver la conversión A/D como un proceso de tres pasos.

- Muestreo. Ésta es la conversión de una señal en tiempo continuo a una señal en tiempo discreto obtenida tomando muestras de la señal en tiempo continuo en instantes de tiempo discreto.
- Cuantificación. Ésta es la conversión de una señal en tiempo discreto con valores continuos a una señal en tiempo discreto con valores discretos (señal digital). El valor de cada muestra de la señal se representa mediante un valor seleccionado de un conjunto finito de valores posibles. La diferencia entre la muestra sin cuantificar y la salida cuantificada se denomina error de cuantificación.
- Codificación. En el proceso de codificación, cada valor discreto se representa mediante secuencia binaria de bits.

Aunque modelamos el conversor A/D con un muestreador seguido de un cuantificador, en la práctica la conversión A/D se efectúa en un único dispositivo que toma la señal analógica de entrada y produce un número codificado en binario.

3.5.1 Muestreo de señales

El realizar el muestreo de una señal, lo que se pretende es representar la relación de dicha señal con el tiempo, mediante una serie de puntos representativos, es decir representar mediante una serie de muestras una señal continua. Como es de esperarse en el proceso de muestreo inevitablemente se esta perdiendo información, y la clave de el muestreo esta saber que cantidad de información es relevante para un correcta interpretación de la señal, esto nos proporcionara el limite entre un muestreo correcto y uno que no lo es.

3.5.1.1 Elección de la frecuencia de muestreo.

Para seleccionar la frecuencia correcta para realizar el muestreo de una señal continua, se parte del Teorema de Muestreo de Shannon o frecuencia de Nysquist; el cual enuncia que:

Una señal continua debe ser muestreada como mínimo con una tasa de muestreo superior a dos veces la máxima frecuencia contenida en la señal de interés, es decir el muestreo será correcto solamente si la señal no contiene componentes de frecuencia que sobrepasen la mitad de la frecuencia de muestreo,

en caso contrario se presentara el fenómeno conocido como Aliasing (Figura 19).

Si se utiliza una frecuencia menor a la establecida por el teorema de Shannon, se produce una distorsión conocida como aliasing; algunos autores traducen este término como solapamiento. El aliasing impide recuperar correctamente la señal cuando las muestras de ésta se obtienen a intervalos de tiempo demasiado largos. La forma de la onda recuperada presenta pendientes muy abruptas.

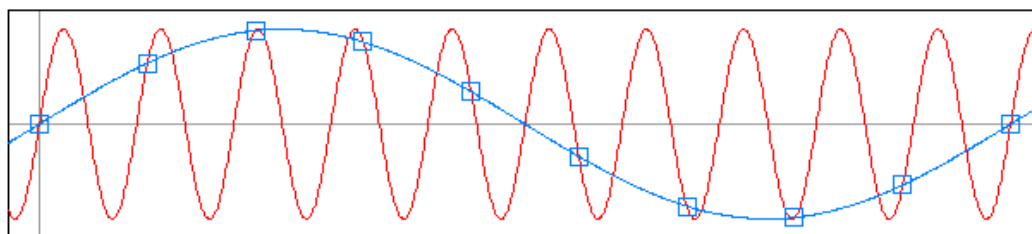


Figura 19. Muestreo de señales Incorrecto (Wikipedia "Frecuencia de muestreo").⁴

Para evitar el Aliasing, se tiene que limitar el ancho de banda de la señal que esta siendo registrada y muestreada, y la frecuencia de muestreo, f_S tiene que ser lo suficientemente larga. Si f_{MAX} es la mayor frecuencia contenida en la señal, entonces la señal muestreada debe ser tal que la frecuencia Nyquist (f_N) :

⁴ Se presenta aliasing, al reconstruir la señal con base en las muestras (trazo azul), esta diferirá de la señal original (trazo rojo)

$$f_N = \frac{1}{2} f_S \quad [3.1]$$

es decir la mitad de la frecuencia a la que se está realizando el muestreo, sea mayor que f_{MAX} , lo que es equivalente a:

$$\Delta t < \frac{1}{2f_{MAX}} \quad [3.2]$$

3.5.2 Filtro anti-aliasing

Para eliminar el aliasing, los sistemas de digitalización incluyen filtros pasa bajas, que eliminan todas las frecuencias que sobrepasan la frecuencia ecuator (la que corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo elegida) en la señal de entrada. Es decir, todas las frecuencias que queden por encima de la mitad de la frecuencia de muestreo seleccionada son eliminadas. El filtro paso bajo para este uso concreto recibe el nombre de filtro antialiasing. Sin embargo, abusar de los filtros antialiasing, puede producir el mismo efecto que se quiere evitar. Cuando se conectan varios filtros en cadena (en el muestreo, en la conversión digital-analógica, etc.), un filtrado excesivo de una onda que ya cumplía con el requisito para su correcta transformación A/D puede degenerar y provocar que la onda final presente una pendiente marcada.

3.5.3 Rangos de frecuencia

Al procesar cualquier señal con el fin de medir parámetros o extraer otros tipos de información, es necesario saber aproximadamente el rango de frecuencias que contiene la señal. Como referencia, veamos la figura 6.

3.6 CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE

La amplitud de la señal que se toma en campo generalmente viene desplazada en una cantidad determinada debido a varios factores como alteraciones en el equipo, inestabilidad de la señal misma, etc.

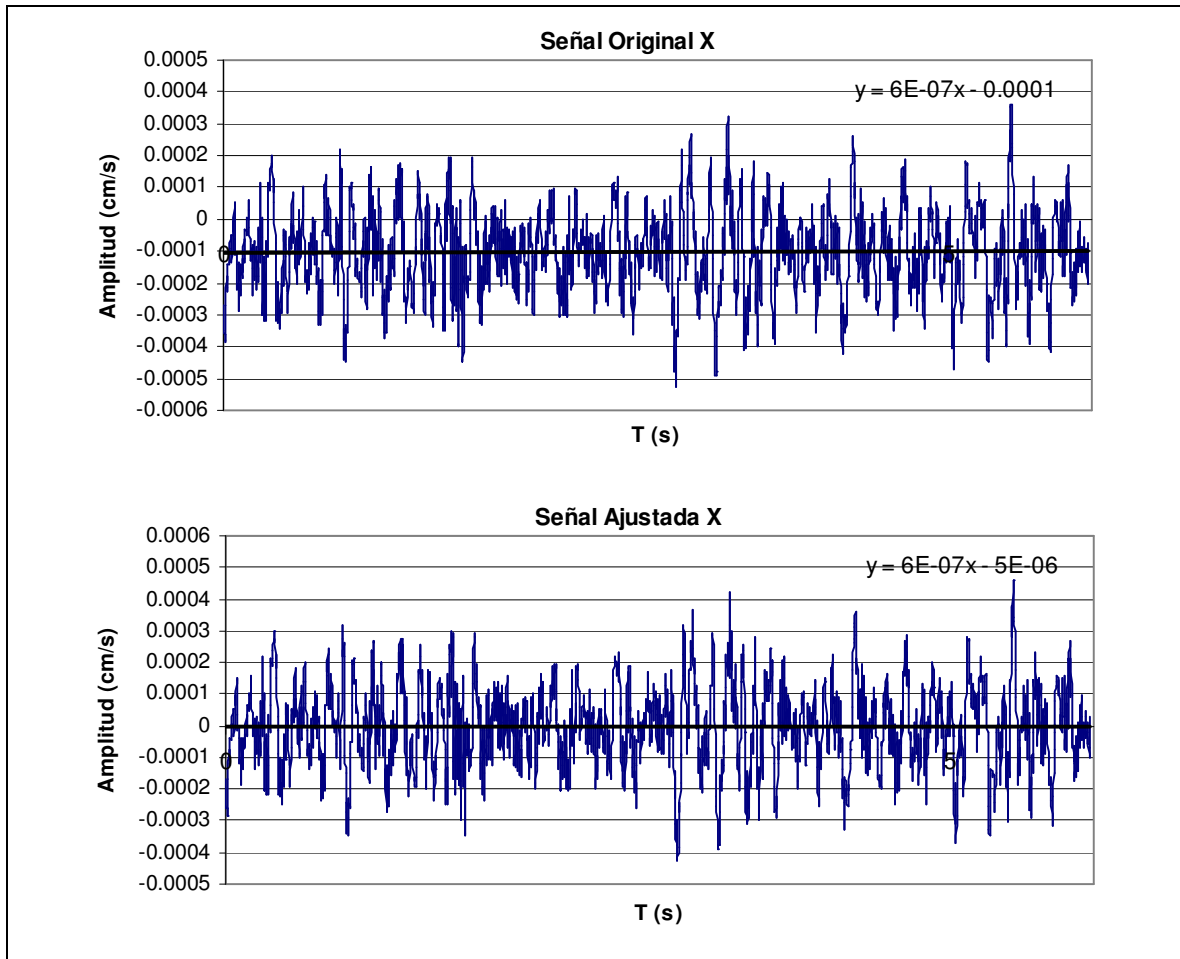


Figura 20. Representación gráfica del proceso de corrección de línea base.

La corrección por línea de base consiste en determinar la cantidad que se debe correr cada ordenada para poder encontrar la línea real de cero. Para tales fines se debe calcular un polinomio, el que mejor se ajuste a los datos originales por el método de los mínimos cuadrados, este polinomio conforma una línea recta, de tal

manera que los coeficientes del polinomio luego son restados de la señal original para obtener una función centrada en el origen.

Las gráficas a continuación demuestran el proceso descrito anteriormente (figura 20). Se realizó solo este proceso sobre una señal original, la línea negra representa la regresión lineal y se observa el desplazamiento de esta de una gráfica a la otra.

3.7 USO DE VENTANAS: TAPERING

El software de procesamiento de datos (Jsesame) usado en este estudio aprovecha este proceso para el acondicionamiento de las señales. La operación de aplicar una ventana se fundamenta en multiplicar establecida señal por una función que sea nula fuera de cierto intervalo. Entonces a partir de la señal muestreada $s_c(t)$, N-muestras consecutivas de la señal pueden ser seleccionadas y considerar solo la parte que ha sido multiplicada por la ventana, que tendrá una duración finita de $N \cdot T_c$, obtenida mediante:

$$s_w(t) = w(t) \cdot s_c(t)$$

La consecuencia de la multiplicación en el dominio del tiempo se resuelve en la convolución en el dominio de la frecuencia:

$$S_w(\omega) = W(\omega) \cdot S_c(\omega)$$

Y se cree entonces aparente que a medida que $W(\omega)$ “se acerca” más al impulso ideal $\delta(\omega)$, la transformada de la señal filtrada por la ventana $S_w(\omega)$ es similar a aquella de la señal original $S_c(\omega)$.

El tipo de ventana más simple es la ventana rectangular:

$$w(t) = \begin{cases} 1 & t = 0, T_c, 2T_c, \dots, (N-1)T_c \\ 0 & t \neq 0, T_c, 2T_c, \dots, (N-1)T_c \end{cases}$$

Sin embargo esta ventana produce una discontinuidad en los bordes de la señal filtrada que al realizar la transformada de Fourier provoca la aparición de frecuencias que en realidad no existen en la señal. Para eliminar este problema se introducen funciones $w(t)$ que sean adecuadamente suavizadas en los bordes. Las más comunes son:

1. ventana Bartlett o triangular

$$w_n = \begin{cases} \frac{2n}{N-1} & , 0 \leq n \leq \frac{1}{2}(N-1) \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & , \frac{1}{2}(N-1) \leq n \leq (N-1) \end{cases}$$

2. ventana Hanning

$$w_n = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right], \quad 0 \leq n \leq N-1$$

3. ventana Hamming

$$w_n = 0,54 - 0,46 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right), \quad 0 \leq n \leq N-1$$

4. ventana Blackman

$$w_n = 0,42 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) + 0,08 \cos \left(\frac{4\pi n}{N-1} \right), \quad 0 \leq n \leq N-1$$

Todas estas ventanas son nulas fuera de los límites especificados y su representación gráfica se observa en la figura 21.

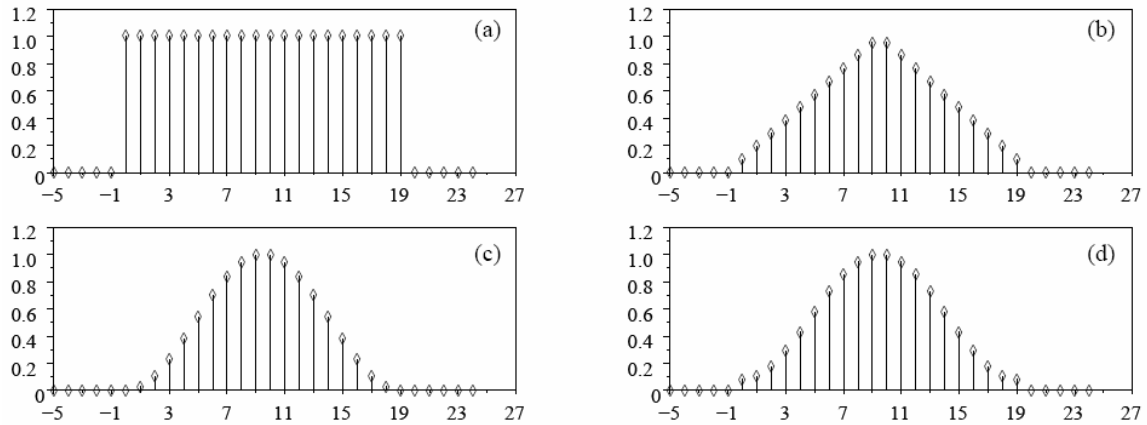


Figura 21. Tipos de ventanas para aplicar el tapering: (a) rectangular, (b) triangular o de Bartlett, (c) de Hanning, (d) de Hamming. (Quintero, 2005)

3.8 SUAVIZADO DEL ESPECTRO

El suavizado de señales permite obtener curvas más limpias, libres de frecuencias superpuestas a las frecuencias dominantes. Entre los métodos más usados en microtrepidaciones se encuentran el triángulo de Pascal, la campana de Gauss, la ventana de Parzen de 0,5 Hz, la ventana de tiempo del 10% del coseno escalonada y el suavizado de Konno y ohmachi el cual lo recomienda SESAME (2004) con un ancho de banda de 40Hz que puede ser remplazado por una ventana triangular con ancho de banda de 0.2 Hz y que sus resultados son similares.

4. MEDICIÓN

El ejercicio de la medición consiste en dar valores a los fenómenos que interesan en el marco de un planteamiento geográfico. Por una parte, sirve inicialmente para caracterizar los atributos de los objetos que se estudian y entonces se emplea al comienzo de todo tratamiento. Por otra parte, interviene al final para caracterizar formas espaciales, describir la naturaleza y la intensidad de relaciones, calificar semejanzas, etc.

Para el estudio se medirán los atributos de las microtrepidaciones, que son ondas de señal débil de tipo ambiental y como en todas las ondas sus variables más importantes son su forma, frecuencia o periodo y nivel.

Para medir con buena precisión y exactitud, se hace necesario el uso de instrumentación adecuada y conocer muy bien las condiciones externas, ya que estas emiten ondas generadoras de interferencias en la señal. Para eventos sísmicos como las ondas de bajo nivel o microtrepidaciones la instrumentación es muy variada y elemental, es decir, no requiere de muchos dispositivos.

Muchos investigadores se han propuesto a determinar las mejores características del sitio, equipo, clima y modo de registrar estas señales, con el objetivo de que los análisis realizados proporcionen los resultados más representativos de la zona. (SESAME, 2004).

4.1 PARÁMETROS DE INSTALACIÓN Y ADQUISICIÓN

La medición de las ondas ambientales se hará con la ayuda de un sistema de adquisición de datos, el cual para este tipo de mediciones es muy sencillo; consta de un sensor triaxial, un dispositivo electrónico que contiene la tarjeta que

convierte la señal analógica a digital (A/D) y un computador portátil. La instalación del equipo UIS ya nombrado en capítulos anteriores, es muy simple ya que sus componentes son solo tres y la comunicación se hace con cableado, este para conectar el transductor a la tarjeta A/D y esta última al microprocesador. El K2 necesita de un ordenador para la configuración del muestreo y opcionalmente el almacenamiento de datos; un cable es la interfase entre estos.

Los sensores disponen de un nivelador y en ellos está impresa una señal para indicar la componente Y, esto para referenciar todas las mediciones de igual forma; la coordenada Y será asignada como dirección norte.

Del uso de velocímetros y acelerómetros, también se ha discutido para definir cual es el que mejor se desempeña en la medición de microtemblores. Aunque Alfaro (1997) considera que se pueden usar tanto sensores de aceleración como de velocidad para realizar las mediciones; Bour, et al (1998) usaron un registrador Lennartz Mars88 conectado a un acelerómetro CMG-5T; Pachón (2001) en su estudio, el equipo utilizado para registrar las microtrepidaciones fue un registrador Kinematics, Modelo ETNA con tres sensores FBA triaxiales ortogonales con rango dinámico de 108 dB y 24 bits de resolución; Rosset et al (2002), para registrar los microtremors usaron un sismómetro con tres componentes y en cada sitio se tomó solo un registro con una duración de 15 minutos; Rincón (2005) utilizó un acelerómetro de alto rango dinámico. Para la recolección de datos se usaron sismómetros portátiles Gosar (2007).

Todos los estudios mencionados anteriormente realizaron mediciones de microtremors y tuvieron resultados satisfactorios sin importar el equipo empleado, pero la sugerencia de Alfaro (1997) puede ser considerada. En este estudio fue utilizado un velocímetro, este no se escogió por sus ventajas o desventajas ante otros equipos, si no porque se encontraba disponible en la Universidad Industrial de Santander. También se dispone del acelerómetro que fue adquirido por sus buenas especificaciones y versatilidad.

4.1.1 Instalación del sensor

La instalación del sensor se debe hacer de tal forma que se acople al medio o al suelo muy bien, para ello el proyecto SESAME (2004) realizó numerosas pruebas variando las condiciones de la superficie de instalación del sensor y las consideraciones obtenidas del proyecto son:

- No es recomendable hacer mediciones sobre suelos suaves irregulares tales como: fango, hierba, suelo arado, hielo, grava, nieve no compacta, etc.; o de cubiertas artificiales tales como cubierta sintética del deporte, si no se pueden evitar deben ser mirados con más atención.
- Garantizar que el sensor este sobre el suelo: el sensor se debe instalarse directamente en la tierra, excepto en las situaciones muy especiales (cuesta escarpada, por ejemplo).
- El componente del asfalto o del concreto no afecta resultados de H/V en la banda de frecuencia principal del interés, aunque las perturbaciones leves se pueden observar en la gama de 7-8 hertzio, que no cambian la forma de las curvas de H/V.
- La hierba por sí misma no afecta resultados de H/V, con la condición de que el sensor esté en buen contacto con la tierra y no, por ejemplo, colocado inestablemente en la hierba, como puede ser con hierba alta doblada debajo del sensor. En tales casos, es mejor quitar la hierba alta antes de instalar el sensor, o cavar un agujero para instalar el sensor directamente en suelo. La grabación en hierba cuando el viento está soplando puede conducir a que los resultados sean totalmente perturbados debajo de 1 hertzio.
- Evite la grabación en suelos saturados de agua, por ejemplo después de lluvia pesada.

- Evite la grabación en la grava superficial con cohesión baja, pues el sensor no será juntado correctamente a la tierra y las curvas serán obtenidas con fuertes perturbaciones. Intente encontrar otro tipo de suelo a algunos metros donde se ausente, o quite la grava superficial para encontrar la tierra firme abajo, si es posible.
- La grabación en nieve o hielo puede afectar los resultados. En tales casos, se recomienda que la nieve esté condensada y el sensor esté instalado en una placa del metal o de madera para evitar la inclinación del sensor debido al derretir local bajo las patas del sensor. Cuando se hacen grabaciones en tales condiciones, que la temperatura esté dentro de las especificaciones del equipo dadas por el fabricante.
- El uso de una placa de metal entre el sensor y el suelo no modifica los resultados.
- En caso de una inclinación por superficie escarpada que no permite la correcta nivelación del sensor, la mejor solución es instalar el sensor en una pila de arena o en un envase plástico llenó con arena.
- El sensor debe ser instalado horizontalmente según lo recomendado por el fabricante.
- No hay necesidad de enterrar el sensor, pero no perturba la medición si éste es el caso. Puede ser útil sin embargo, configurar el sensor en un agujero (sin ninguna necesidad de llenarlo) para protegerlo, por ejemplo, del efecto de un débil viento en hierba.
- No ponga ninguna carga en el sensor.

- Cuando un interfaz artificial es necesario entre la tierra y el sensor, se recomienda altamente que algunas pruebas estén realizadas antes de hacer las grabaciones para examinar una influencia posible del interfaz elegido.
- La longitud del cable que conecta el sensor con la estación de adquisición de datos no influye en los resultados por lo menos hasta una longitud de 100 m.

Todas estas condiciones se cumplieron para el sensor del equipo UIS y el acelerómetro K2.

4.1.2 Consideración de señal

Antes de realizar cualquier medición se debe conocer que tipo de señal se medirá y por consiguiente las características que posea esta; para configurar los equipos de tal forma que no se generen errores o pérdidas de información, por ejemplo: al configurar una tasa de muestreo menor que la propuesta por el teorema de Nysquist, se generan efectos alias. Para la medición también se pueden usar filtros y amplificadores analógicos los cuales emplean circuitos electrónicos para modificar las señales transducidas, pero hoy en día tienen uso más frecuentemente los filtros y amplificadores digitales que se aplican en la señal una vez es procesada por la tarjeta ADC; ya que son más prácticos y economizan el proceso. Este estudio empleó esta última opción para ambos equipos, tanto el UIS y el K2.

En la investigación realizada por Gitterman et al (1996) para la medición de microtemblores usaron un sensor con lectura de tres canales simultáneamente, Se uso un filtro analógico pasabanda de 0.1 – 10 Hz y con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

Fernández (2000) uso un filtro analógico de frecuencias que solo toma la banda de 1-25 Hz; Pachón (2001) empleó una frecuencia de muestreo de 200 muestras por

segundo, (frecuencia de Nysquist de 100 Hz); Nakamura et al (2002) usaron la frecuencia de muestreo como de 100 Hz. La frecuencia de muestreo es suficiente con un valor de 50 Hz, ya que los valores de frecuencias en las ondas de interés no sobrepasan los 25 Hz, aunque valores más altos no interfieren en los resultados de la razón espectral H/V (SESAME 2004). Theodulidis et al (2005) enfocaron la frecuencia de medición en un rango de 0.2 y 20 Hz y la frecuencia de muestreo fue de 100 Hz; Nobile (2005) configuró la frecuencia de muestreo en 100 muestras por segundo es decir 100 Hz (50 Hz para Nysquist); Ventura et al (2006) usaron una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

Como se observo, muy pocos estudios usaron filtros analógicos para realizar la medición y en cuanto a los amplificadores muchas veces están incorporados en el equipo como es el caso del K2.

4.2 SELECCIÓN DE SITIOS

El registro de microtrepidaciones es muy versátil en cuanto a que se puede realizar el estudio en muchas zonas. Los parques, los jardines, los separadores viales con forraje o sin él, canchas de fútbol, etc., son puntos comunes de las ciudades y generalmente se encuentran bien distribuidos. En el campus se cuenta con el área deportiva la cual dispone de múltiples escenarios propicios para realizar mediciones. Algunos autores han realizado mediciones en las intersecciones de una cuadrícula de ancho variable entre 100 y 1000 m (Hiroshi et al, 2004), como será demostrado más adelante, mientras que otros han ejecutado las mediciones con una distribución espacial inspeccionada por los sitios aptos para realizar las mediciones.

Alfaro, et al (1997) en la medición de microtremors para la microzonificación de Barcelona los puntos medidos fueron seleccionados:

1. teniendo buena cobertura de varios distritos en la ciudad.
2. siendo significativos a las diferentes estructuras de suelos, de acorde a la geología conocida y datos geotécnicos.

La ciudad contribuyó con cartografía detallada para evadir sitios con alto nivel de vibración, como vías subterráneas y sistemas de acueducto principales.

Pachón, et al (2001) seleccionaron los sitios regidos por la conveniencia del lugar para no estar cerca de zonas con mucha actividad y se podría comparar que tienen separación de 832 m en forma de red teniendo en cuenta la cantidad de sitios y el área de estudio.

Fernández, et al (2002) tomaron datos a partir de las 3:00 p.m. en un día de trabajo, en un pequeño parque, a 20 m de una avenida con tráfico fuerte y a 30 m del puerto y una vía del ferrocarril.

Nakamura, et al (2002) consideraron que la separación entre puntos o sitios de medición debe ser entre 100 y 300 metros.

Rosset, et al (2002) seleccionaron 70 sitios en un área de 4 Km², esto implica que la separación promedio de los sitios es de 240 m.

Nobile (2005) en su proyecto hizo que la separación entre estaciones o sitios de medición fuese de 500 metros y recomendó que para la selección de sitios evitar la cercanía de instalaciones eléctricas, zonas con alto flujo vehicular, evitar colocar el equipo sobre tuberías subterráneas o alcantarillas. Además antes de iniciar con el registro es prudente dejar reposar el equipo para su estabilización.

Rincón (2005) para la selección de los sitios de medición recorrió las ciudades de Tunja y Sogamoso buscando lugares en los que hubiera suelo natural visible y los cuales tuvieran fácil acceso, tales como parques, lotes y parqueaderos. Se preseleccionaron 150 sitios para ambas ciudades y se descartaron los que estuvieran sobre conducciones hidráulicas y sanitarias subterráneas; además se cruzaron con una cuadrícula de 300 m por 300 m para densificar los datos.

Theodulidis, et al (2005) para este estudio usaron una malla que cubrió un área 1.2 Km X 2.5 Km y los puntos tuvieron separación promedio de 140 m.

Verdugo et al (2005) caracterizaron el suelo de Santiago de Chile y la selección de los sitios se realizó buscando las mejores condiciones para registrar las señales lo más estacionarias posibles. De estas 70 señales se usaron para el procesamiento solo 24.

Romero (2006) para la medición del ruido ambiental usó una malla de 250 m de separación entre sitios.

Rocabado et al (2005) en la medición de los microtemblores emplearon una malla con un espaciamiento de 500 metros. Los autores afirman que los resultados fueron satisfactorios.

Ventura et al (2006) para la selección de sitios tuvieron cuidado en no tomar datos donde existieran pulsos de tráfico fuerte y directo, alcantarillas y otras estructuras subterráneas. Se aplicó una malla de 1000 m aproximadamente.

Gosar (2007) decidió usar una grilla de 200 metros en los 12 kilómetros cuadrados del depósito de Bovec. 124 sitios fueron seleccionados cuidadosamente para evitar la influencia de árboles, ríos, topografía fuerte y fuentes de ruido puntuales. Las mediciones fueron tomadas solo en días sin viento debido a las perturbaciones provocadas por él, es sabido por el proyecto SESAME. Se tuvieron problemas debido a zonas industriales en las que se encontraron frecuencias dominantes de 20 Hz.

Un estudio realizado para definir los parámetros necesarios de medición de microtemblores es el SESAME (2004), y sus recomendaciones son seguidas al pie

de la letra en esta memoria. El proyecto SESAME después de realizar numerosas pruebas recomienda lo siguiente:

- Para una microzonificación, se recomienda que se use un espaciamiento grande inicialmente (por ejemplo a la rejilla de 500 m) y, en caso de la variación lateral de los resultados, disminuir el espaciamiento de los puntos de la rejilla, a 250 m, por ejemplo.
- Para un estudio de la respuesta de sitio, nunca se debe utilizar solo un punto de medida para derivar un valor f_0 . Se recomienda que por lo menos tres puntos sean medidos.
- El acoplamiento del sensor con el suelo debe ser tratado con cuidado. El concreto y el asfalto proporcionan buenos resultados, mientras que la medición en suelos suaves o irregulares tales como fango, hierba, suelo arado, hielo, grava, nieve no compactada, etc., se deben mirar con más atención.
- Evite generalmente materiales “suaves/incoherentes” tales como espuma-caucho, cartulina, grava (así sea en un envase o no), etc.
- Los usuarios son advertidos que el registro cerca de las estructuras tales como edificios, árboles, etc., pueda influir en los resultados: hay evidencia clara de que los movimientos de las estructuras debido al viento, pueden introducir en la banda de baja frecuencia fuertes perturbaciones en la tierra. Desafortunadamente, no es posible cuantificar la distancia mínima de la estructura donde sea insignificante la influencia, como esta distancia depende de demasiados factores externos (tipo de la estructura, fuerza del viento, el tipo del suelo, el etc.).

- Evite de medir sobre las estructuras subterráneas tales como parqueaderos de coches, tuberías, tapas de la alcantarilla, etc., estas estructuras pueden alterar perceptiblemente la amplitud del movimiento vertical.
- Ninguna influencia de se ha observado por los cables de tensión.
- Todas las clases de fuentes locales de corta-duración (pasos, coche, tren,...) pueden trastornar los resultados. La distancia de influencia depende de la energía de la fuente, las condiciones del suelo, etc., por lo tanto no es posible dar en forma general valores de la distancia mínima. Sin embargo, las mediciones se deben hacer tratando de alejarse todo lo posible.
- Evite las medidas cerca de fuentes monocromáticas tales como máquinas de la construcción, industriales máquinas, bombas, etc.
- Los disturbios de corta duración en la señal se pueden evitar durante el análisis de H/V usando en la selección de ventanas un anti-trigger para quitar los transeúntes. Una consecuencia de esto es que la duración de las grabaciones se debe aumentar para recolectar y reservar tiempo.

Todas las condiciones anteriores se aplicaron y se complementaron con recomendaciones dadas por otros estudios.

4.3 DURACIÓN Y CANTIDAD DE LAS MUESTRAS

Con respecto al tiempo de registro de las señales aún no hay un consenso; algunos autores han realizado tres registros de las microtrepidaciones durante 3 minutos cada uno y en un mismo sitio (Alfaro, et al. 1999); otros utilizaron tres registros de cinco minutos de duración a diferentes horas del día (Rocabado, et al. 2005).

Verdugo, et al (2005) caracterizaron el suelo de Santiago de Chile y usaron más 70 registros de 15 minutos de duración.

Alfaro et al. (1997) en la medición de microtremors para la microzonificación de Barcelona los sitios seleccionados para realizar mediciones fueron en total 70, que se llevaron a cabo en tres campañas. En cada sitio se tomaron varios registros de 30 minutos. De cada registro se seleccionó una ventana de 30 segundos por componente y se obtuvo el espectro con la función de Fourier que fueron suavizados con varios métodos.

Alfaro et al (1998) realizaron 204 mediciones de las cuales se obtuvieron 195 periodos predominantes y nueve no fueron procesables, la duración de las muestras se modificó de los muestreos pasados, se tomaron registros de 180 seg.

Theodulidis et al (2005), seleccionaron en total 250 puntos de medición y la duración de las muestras fue de 20 min.

Bour et al (1998) en su estudio los puntos de medición fueron 137 en total y se grabaron datos de diez minutos de duración en cada punto.

Pachón (2001) realizó la medición de los registros en 237 sitios distribuidos en toda el área metropolitana de Bucaramanga con 165 Km² de superficie, en cada sitio se realizaron tres mediciones con una duración de 20 segundos cada una.

Romero et al (2006) tomaron muestras de 300 segundos con la ayuda de un sismómetro.

Nakamura et al (2002) tomaron mediciones la longitud de cada registro es de 40.96 segundos y se tomaron 3 repeticiones de los registros en cada sitio

Rincón (2005) tomó tres registros de 180 segundos en cada sitio. De acuerdo con la metodología planteada se analizaron 552 registros en la ciudad de Tunja y 480 en la ciudad de Sogamoso.

Nobile (2005) midió datos en 157 estaciones, de un solo registro en cada una con duración de 10 minutos.

Ventura et al (2006) solo se realizaron un registro en cada sitio que se extendió hasta los 30 minutos.

Gitterman et al (1996) realizaron mediciones a varias horas del día con duraciones de 2 a 4 minutos.

Gosar (2007) seleccionó 124 sitios y la duración de las medidas fue de 20 minutos.

Teves-Costa et al (1996) para la recolección de información usaron un acelerómetro Kinematics SSR-1. En cada sitio se grabaron registros de 180 segundos de duración.

La cantidad de los sitios de medida o registro de datos es relativa, esto obedece a la metodología empleada para ubicarlos; por ejemplo, si se usa una malla o grilla, la cantidad de puntos depende del área de la zona de estudio y la separación de los puntos utilizada en la grilla; por otra parte si se usa la búsqueda aleatoria de las mejores condiciones para la medición, podríamos asignar un sitio por cada 6,25 hectáreas esto simulando el uso de una grilla de 250m X 250m, la cual es la especificada por el proyecto SESAME como la necesaria para una exploración rigurosa.

Muchos autores tomaron varios registros en un mismo sitio, esto con el fin de obtener una medida más confiable. Para el presente estudio esta consideración no es adoptada, ya que se supone equivalente tomar una medición tres veces más larga sin ser interrumpida, y en últimas el procesamiento de datos se aplica a ventanas o tramos seleccionados de toda la secuencia medida y que pueden ser un número mucho mayor de tres. SESAME recomienda un número mínimo de ventanas igual a 10.

Todas las situaciones y consideraciones son contempladas por el proyecto Sesame el cual tiene una amplia bibliografía acerca del tema. En cuanto a la duración del registro SESAME estableció que para que la medida sea confiable

debe cumplirse la siguiente condición: $f_o > \frac{10}{l_w}$ donde f_o es la frecuencia fundamental y l_w es la longitud de las ventanas a seleccionar. Su propósito es que la frecuencia de interés tenga por lo menos 10 ciclos significativos en cada

ventana. Un número grande de ventanas y ciclos es necesario para esto, por ello se recomienda que el total de ciclos significativos $n_c = l_w * n_w * f_o$ donde n_w es el número de ventanas; sea mayor de 200. Lo anterior se resume en la tabla 3.

Tabla 3. Duración recomendada de grabación. Fuente: SESAME (2004).

| f_0 [Hz] | Valor Mínimo para l_w [s] | Mínimo número de ciclos significativos recomendados (n_c) | Mínimo número de ventanas | Duración mínima útil de la señal [s] | Duración mínima de registro recomendada [min] |
|------------|-----------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|---|
| 0.2 | 50 | 200 | 10 | 1000 | 30' |
| 0.5 | 20 | 200 | 10 | 400 | 20' |
| 1 | 10 | 200 | 10 | 200 | 10' |
| 2 | 5 | 200 | 10 | 100 | 5' |
| 5 | 5 | 200 | 10 | 40 | 3' |
| 10 | 5 | 200 | 10 | 20 | 2' |

La tabla anterior expresa que entre más alta sea la frecuencia fundamental esperada, más cortas pueden ser las ventanas y por ende más corta la duración del registro.

4.4 CONDICIONES AMBIENTALES Y PERIODO DEL DÍA

Nakamura en 1989 se propuso a investigar el efecto del ruido cultural en las mediciones, para ello realizó mediciones continuas durante más de 30 horas y encontró que las horas de la madrugada, entre las 1 y las 4, proporcionan las mejores condiciones para las mediciones. Recientemente se han realizado pruebas por diversos investigadores a diferentes horas del día, encontrando que aunque la amplitud de las señales se incrementa en el día (un orden de magnitud con respecto mediciones nocturnas) no hay variación significativa en la forma de los espectros (Giraldo et al, 1999). Algunos autores consideran inclusive que el ruido cultural puede ayudar a definir mejor el periodo fundamental de vibración del suelo. "Stål & Westberg en 1996 indicaron que mediciones en cercanías de una vía con tráfico constante se traducirían en mejores resultados, y Muccarelli en

1998 encontró que energizando el suelo con un martillo de refracción sísmica, se puede modelar mejor los periodos.” Rosales (2001).

Por otra parte muchos estudios plantean, que el periodo del día no es relevante en los resultados obtenidos (SESAME, 2004), por ello no se considero como parámetro elemental, las mediciones se realizaron en horas del día siguiendo las condiciones atmosféricas propuestas por el proyecto Sesame:

- El viento tiene probablemente la influencia más frecuente y se sugiere evitar medidas durante días ventosos. Incluso un viento leve (aproximadamente. > 5 m/s) pueden influenciar fuertemente los resultados de H/V introduciendo perturbaciones grandes en las frecuencias bajas (debajo de 1 hertzio) que no se relacionan con los efectos del sitio. Una consecuencia es que el viento perturba solamente sitios de baja frecuencia.
- Las medidas durante la lluvia pesada deben ser evitadas, mientras que la lluvia leve no tiene ninguna influencia sensible en resultados de H/V.
- Las temperaturas extremas se deben tratar con cuidado, siguiendo las recomendaciones del fabricante para el sensor y el registrador.
- Los acontecimientos meteorológicos de presión baja levantan el contenido de baja frecuencia y pueden generalmente alterar la curva de H/V. Si las medidas no se pueden retrasar hasta condiciones atmosféricas más reservadas, la ocurrencia de tales acontecimientos se debe observar en la hoja del campo de la medida.

Por ejemplo: Alfaro et al (1997) en la medición de microtremors para la microzonificación de Barcelona se realizaron mediciones en el periodo comprendido entre las 11:00 p.m. y las 4:00 a.m. para evitar las perturbaciones y los altos niveles de ruido. Pero en un nuevo estudio (Alfaro et al, 1998) se hicieron

nuevas mediciones para la microzonificación sísmica de Barcelona complementando análisis pasados y se realizaron mediciones durante todo el día y toda la noche cambiando la metodología del estudio precedente.

En cambio Theodulidis et al (2005), midieron los datos durante horas de la noche de 6:00 PM – 8:00 PM y en la madrugada de 11:00 PM – 4:00 AM, como lo propuso Panou et al (2005).

Teves-Costa et al (1996) para reducir el efecto de fuentes de ruidos localizados, como industrias, las grabaciones las realizaron entre las 11 p.m. y las 4 a.m.

Bonnefoy-Claudet et al (2006) expresaron que en un cierto término el promedio espectral de la amplitud demuestra que el período predominante del microtremor es diferente según la hora (un período más largo durante noche que durante día). Además, las medidas durante día y la noche fueron realizadas en treinta sitios en Japón, considerando varias clases de subsuelo. Kanai y Tanaka (1961) sugieren la relación empírica siguiente (1):

$$\text{Amplitud (Noche)} = 0.3 * [\text{Amplitud (Día)}]^{1.5}$$

4.5 PARÁMETROS CONSIDERADOS

En el equipo UIS el dispositivo electrónico que contiene la tarjeta A/D, es el que controla todo el proceso. El dispositivo tiene un panel con teclado y pantalla, desde el cual: se da inicio y fin a la medición, y se selecciona el modo de operación; ya que cuenta con dos modos, continuo y data-logger que ya fueron explicados en el capítulo 2. En el caso de este estudio se usó el modo continuo, pues nos permite visualizar directamente la señal en el computador y permite almacenamiento de registros más extensos. El ordenador no requiere exigentes características, solo se tiene en cuenta que la longitud de las mediciones tomadas depende de la memoria disponible en él y es recomendado que disponga de

conexión por puerto serial debido a que el dispositivo electrónico fue diseñado con estos puertos. La visualización y almacenamiento de los datos en el computador se logra gracias a software programado en Labview, y por ello debe estar previamente instalado. Cabe anotar que el software disponible no cuenta con las licencias de Labview, por ello no es un ejecutable y debe instalarse la plataforma completa.

El sistema de adquisición de datos K2, funciona de una manera similar pero más sencilla, ya que es un dispositivo en forma de caja que contiene todo lo necesario excepto el computador. El k2 también dispone de software para la adquisición de datos y configuración de los parámetros. La frecuencia de muestreo empleada por otros estudios se generaliza en los 100 Hz y es la usada para los registros tomados por el K2

Para determinar la duración de los registros se consideraron las ediciones de microtrepidaciones obtenidas de la microzonificación sísmica de Bucaramanga, estas indican que la zona posee microtemblores de contenido frecuencial en el orden de 5 Hz, según esto y la tabla 3, se recomienda tomar mediciones de 3 minutos. Pero como la universidad tiene alto flujo peatonal, las mediciones de 3 minutos pueden no ser suficientes para obtener ventanas de mínimo 20 segundos sin perturbaciones y esto obliga a aumentar su duración. Se considero que se tomarían registros con el doble de la duración mínima; de 6 minutos, para que el software Jsesame seleccionara las mejores ventanas.

4.5.1 Sitios de Medición

La Universidad Industrial de Santander consta con un área de 33.7 hectáreas que representan la zona estudiada, en esta área aproximadamente el 50% es zona edificada en la cual no hay contacto directo con el suelo y esta fuera de las condiciones dadas para la medición.

Los parámetros para la ubicación de un punto de registro de microtrepidaciones, han sido motivo de estudio de varios investigadores, por lo tanto se pueden encontrar diversos patrones para estos escenarios.

Se realizó inicialmente una exploración preliminar en la cual se seleccionaron 9 puntos o sitios de medición. Estos sitios fueron seleccionados de forma conveniente según los parámetros establecidos por las investigaciones previas y que se podían reconocer a simple vista, como por ejemplo no establecer el punto de registro en cercanías de árboles de gran altura. Para esta campaña de medición fue necesario dos días de trabajo y se destinó el uso del sismómetro o velocímetro. Los puntos de registro están muy bien distribuidos en todo el campus universitario, estos son suficientes para el propósito y además nos ayudan a encontrar zonas con fuentes puntuales de frecuencias altas, como es el ejemplo un motor de aire acondicionado. Estas zonas deben ser evitadas por las mediciones. La figura 22 contiene la ubicación de los nueve sitios preliminares y está Indicados con puntos rojos.

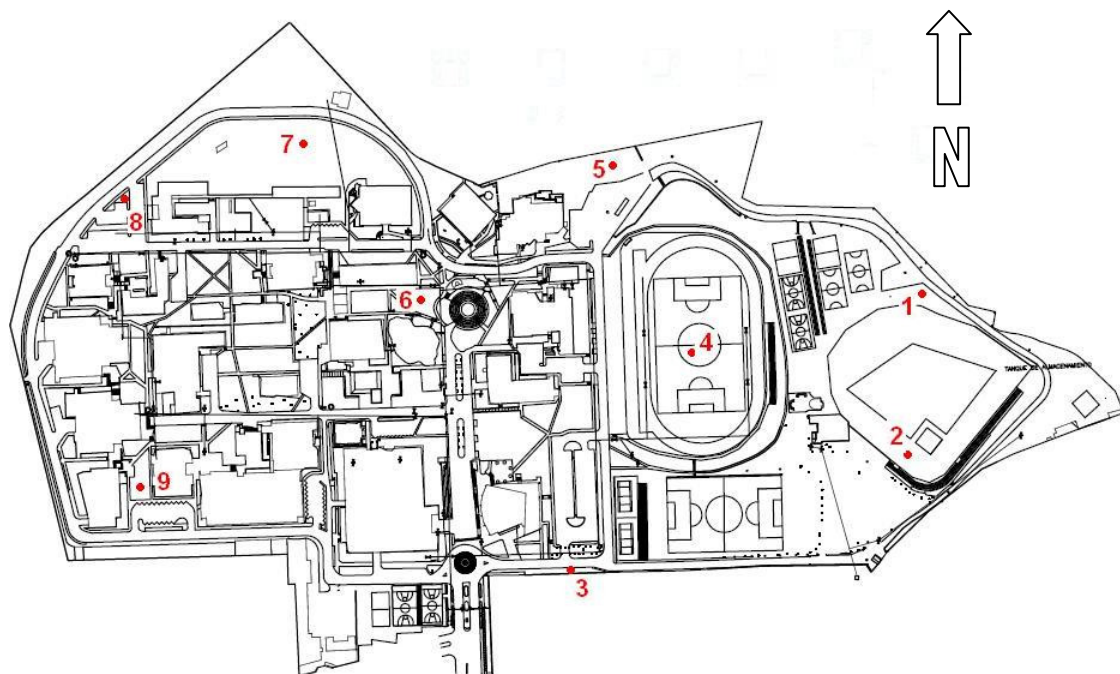


Figura 22. Ubicación de los sitios de medición de la exploración preliminar.

El acelerómetro se empleó para una segunda campaña de medición y registro de datos, para este proceso se emplearon todas las condiciones halladas exceptuando la aplicación de una malla para la ubicación inicial de los puntos, esto a causa de las dimensiones del campus, que son de oriente a occidente 860 m de longitud y en dirección norte-sur 460 m de longitud, estas dimensiones son muy reducidas para aplicar una malla de 250 m así como se recomienda por: Romero et al (2006) y SESAME (2004). La ubicación de los dos registros A y B tomados en la segunda jornada, es mostrada en la figura 23 y está indicado con el punto rojo. En la figura 24 se puede observar una panorámica de la meseta de Bucaramanga en la que se ubica la Universidad Industrial de Santander.

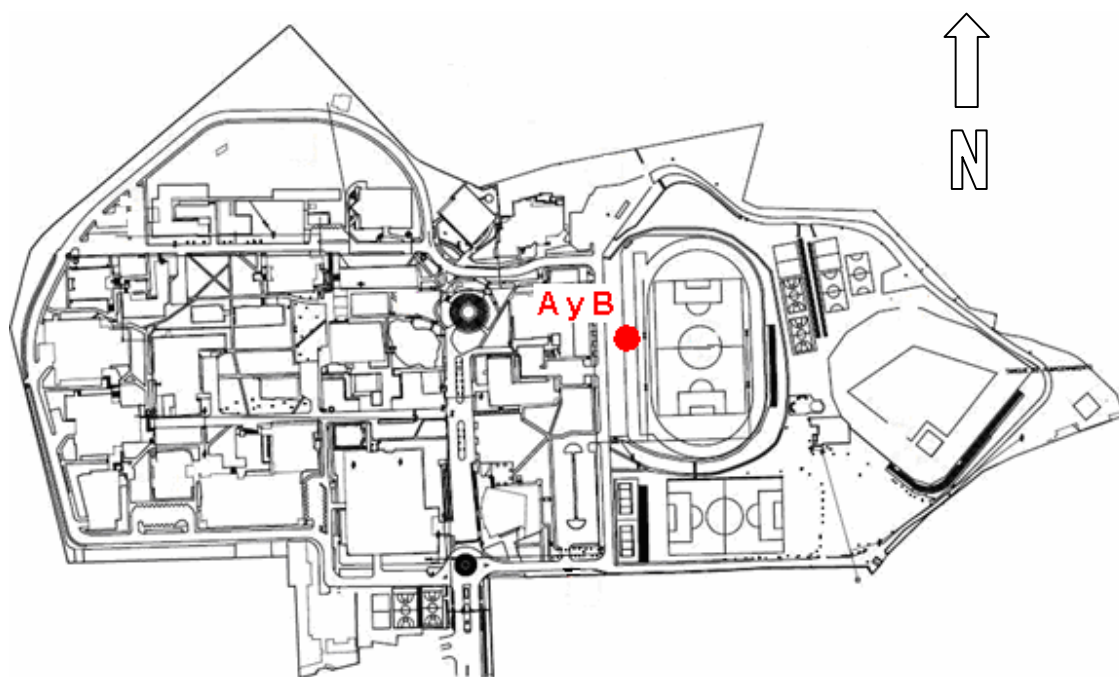


Figura 23. Ubicación del sitio de medición de la exploración con acelerómetro y K2.



Figura 24. Panorámica de la meseta de la ciudad de Bucaramanga en dirección Norte-Sur.

En el ANEXO C se muestra un resumen de los parámetros utilizados por otros estudios.

5. PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

5.1 GENERALIDADES

Las señales de microtrepidaciones y ruido ambiental son registradas por el sistema de adquisición de datos y almacenadas en archivos que pueden ser leídos con un editor de texto. Los datos obtenidos de las sesiones de medición realizadas y explicadas en el capítulo anterior, deben ser seleccionados y acondicionados para un mejor procesamiento.

La selección de los registros es controlada por muchos factores externos, refiero como a externos las condiciones del sitio al momento de hacer las mediciones. Estos factores pueden ser vibraciones no detectadas por simple inspección visual y de planos de infraestructura de la zona, los más comunes son motores de aires acondicionados y conductos de agua potable no referenciada; para estos casos el procesamiento incluye filtros digitales y de amplitudes no esperadas. El acondicionamiento de los datos es realizado para que el paquete de procesamiento se ejecute adecuadamente.

El paquete de procesamiento es el software “Jsesame” el cual fue creado por la comisión europea en el proyecto llamado “SESAME European research Project”. Este proyecto se realizó desde el primero de mayo del 2001 hasta el 31 de octubre del 2004. El Jsesame es un uso de JAVA para proporcionar un interfaz gráfico de uso fácil para la técnica espectral del cociente de H/V, que se utiliza en estudios locales del efecto del sitio. El programa utiliza las funciones de la selección automática de la ventana y del cociente espectral de H/V ejecutando programas externos independientes desarrollados en el lenguaje FORTRAN. Jsesame es principalmente una herramienta para organizar los datos de entrada, ejecutar la selección de la ventana, procesar las ventanas y exhibir los resultados del

proceso. El software funciona en ambientes del Unix, de Linux, del Macintosh y de Windows (Anexo A). El método para evaluar la frecuencia de resonancia y factor de amplificación utilizado por el Jsesame es el propuesto por Nakamura (1989) que aplica razones espectrales H/V así como es el interés de este análisis, además realiza algunos arreglos digitales a la señal, necesarios para mejores resultados.

Todas las operaciones que el Jsesame ofrece no siempre han sido usadas por otros investigadores, pero si algunas de ellas y en algunos casos han empleado el mismo software (Verdugo et al, 2005 y Nobile, 2005). Giraldo et al (1999), en su caso, el procesamiento de las señales incluye: corrección de la línea base, filtrado en el rango de las frecuencias de interés, utilización de una ventana de Hanning y posteriormente suavizaron los espectros de Fourier utilizando una campana gaussiana.

M. Bour et al (1998) en su microzonificación sísmica en el sur de Francia, para cada punto medido, los cocientes espectrales fueron calculados como sigue:

- Corrección compensada o corrección de línea base
- Filtrado de la señal.
- Selección de las ventanas de 8192 puntos (entre 10 y 20 ventanas)
- Uso de un tapering simétrico de Hanning en el 20% de la señal
- Cómputo de espectros Fourier en tres direcciones (E-W, N-S, UP)
- Alisamiento de los espectros de Fourier por una ventana de anchura del 10% de la frecuencia
- Cálculo de la razón V/H promedio de los cocientes espectrales, definidos como:

$$\sqrt{\frac{(EW^2 + NS^2)}{2*UP^2}}$$

- Cálculo de la media de los cocientes espectrales y su desviación estándar.

Estos pasos son prácticamente los mismos seguidos por Jsesame a excepción de la selección de ventanas la cual es automática, solo basta especificar la longitud de estas y los rangos de los filtros de altas amplitudes puntuales, como son explicados en el anexo I. Juan Manuel Benjumea Cadavid, (2003) dice que: “La relación LTA/STA o filtro de ruidos puntuales graba un evento cuando la relación entre el promedio absoluto de la señal en una ventana larga y el promedio en una ventana de tiempo corta supera un valor preestablecido, por lo general 2.”. SESAME (2004) en todas sus pruebas, las ventanas seleccionadas tuvieron una duración de 20 seg.

Por otra parte, Rosset et al (2002) para el análisis de las señales se tomaron ventanas de 30 segundos sin traslapo entre ellas, se aplicó la transformada rápida de Fourier para hallar los espectros de las tres componentes, se suavizaron con una ventana de Parzen y se calcularon las razones espectrales H/V.

Rincón (2005), a cada registro le extrajo ventanas de 20 segundos con un traslapo de 50%, se aplicó corrección de línea base a cada ventana, se suavizó usando una ventana de Hanning, se realizó la transformada rápida de Fourier y se empleó un suavizado gaussiano.

Ventura et al (2006) para el procesamiento de datos se utilizó el paquete DASam, que se encargó de aplicar la transformada rápida de Fourier y calcular las razones espectrales. Se aplicó un filtro digital para eliminar las frecuencias menores a 0.05 Hz y mayores a 20 Hz.

Gosar (2007) para el procesamiento de datos revisó los registros para omitir los perturbados por ruidos puntuales (Filtrar amplitudes), se seleccionaron ventanas con una duración de 30 segundos sin traslapo entre ellas. Se usó un alisado triangular en las ventanas antes de calcular los espectros con la transformada rápida de Fourier y los espectros se suavizaron al 5%. La HVSR fue computada

con el promedio de las componentes horizontales divididas por la componente vertical para cada ventana.

Teves-Costa et al (2006) para el análisis los registros fueron filtrados con un filtro pasa banda con rango de 0.5 Hz a 15 Hz y separados en secuencias de 2048 muestras generando una ventana con duración de 20.48 segundos. El espectro de Fourier obtenido de todas las ventanas fue promediado y suavizado para obtener el espectro de amplitudes para cada componente y aplicar la técnica de Nakamura usando la siguiente expresión:

$$H/V(\omega) = \frac{\sqrt{NS(\omega)^2 + EW(\omega)^2}}{Z(\omega)}$$

La transformada de Fourier es usada en todas la investigaciones revisadas, también lo hacen Nakamura, et al. (2002), aunque, Anggi Quintero (2005) dice que la aplicación de la transformada rápida de Fourier provoca una disminución de la resolución en la frecuencia.

Los factores empleados en este estudio para el acondicionamiento de señal y procesado son resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros generales para procesado de muestras con Jsesame.

| | |
|----------------------------|---|
| Espaciado de la Frecuencia | Transformada rápida de Fourier |
| Filtro | Pasa Banda de 0,1 a 10 Hz |
| Tapering | Ventana de Hanning con 5% de la Ventana |
| Suavizado | Lineal triangular de 1 Hz de banda |
| Merging | Cuadrático |
| Longitud de Ventana | 20 segundos |

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Para procesar las señales y obtener resultados, precedentemente se hizo una selección general con simple reconocimiento de las señales, descartando aquellas

que tenían ruidos constantes con amplitudes no referentes a la zona, esto se puede apreciar comparándolas con los datos de los sitios cercanos. El proyecto Sesame recomienda que los sitios estén separados a 500 metros de distancia como máximo, es decir, construir una malla de 500 m. Reducir esta distancia es necesario cuando se encuentran discontinuidades en los resultados de los sitios, esto se presenta por constantes irregularidades en los suelos.

El campus de la Universidad Industrial de Santander tiene dimensiones muy pequeñas para los alcances de un estudio de caracterización dinámica con microsismos, considerando que en su dimensión más larga orientada de oriente a occidente tiene apenas 860 m de longitud y en dirección norte-sur 460 m de longitud. Con estos parámetros es necesario solo dos sitios de medición para cubrir toda el área del campus, este trabajo inicialmente discurrió tomar nueve sitios para mediciones preliminares, aprovechando que es una área pequeña y más datos podrían solucionar inquietudes futuras.

Después de la selección de los sitios se llegó a un número menor, cuatro sitios son los establecidos para ser analizados y presentados, con sus respectivas frecuencias fundamentales y factores de amplificación. Estos sitios están ubicados en las canchas de micro football, la cancha de baseball o diamante, la cancha de football principal y en la gallería; en el plano mostrado corresponden a los puntos 1, 2, 4 y 6 respectivamente (figura 25). Cabe mencionar que los sitios clasificados están localizados hacia la zona menos edificada y se puede decir que el principal factor para este fenómeno son los aires acondicionados que intervienen significativamente generando frecuencias altas estacionarias muy marcadas o en las curvas de HVSR no se determina fácilmente un pico predominante. Este fenómeno pudo ser evitado haciendo los registros en horas de la madrugada cuando se espera que todos estos equipos no estén en funcionamiento. Desafortunadamente no fue posible realizar esta jornada de medición. De la expedición preliminar se determinó que los registros con el acelerómetro se tomarían solo en la zona no edificada, y por ello se grabaron dos datos (Registro A

y B) en un mismo sitio el cual coincide con el punto 4 de la campaña preliminar, este en la cancha principal de football.

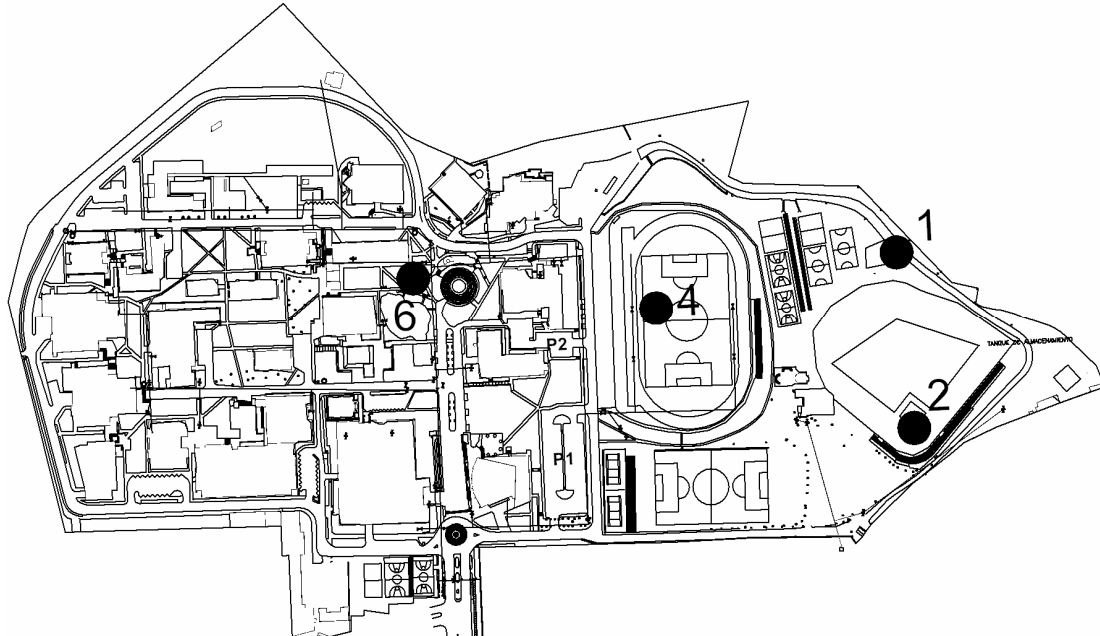


Figura 25. Plano de ubicación de los sitios en los que se presentan resultados preliminares.

5.2.1 Exploración Preliminar

5.2.1.1 Sitio N° 1 Canchas Micro football

Fecha: 21 de marzo del 2007

Hora: 12:55 p.m.

Tipo de sensor: sismómetro

Condiciones Ambientales: soleado, temperatura 24 °C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: arenosa arcillosa

Observaciones: a 100 m de distancia se desarrollaba un evento deportivo en una de las canchas.

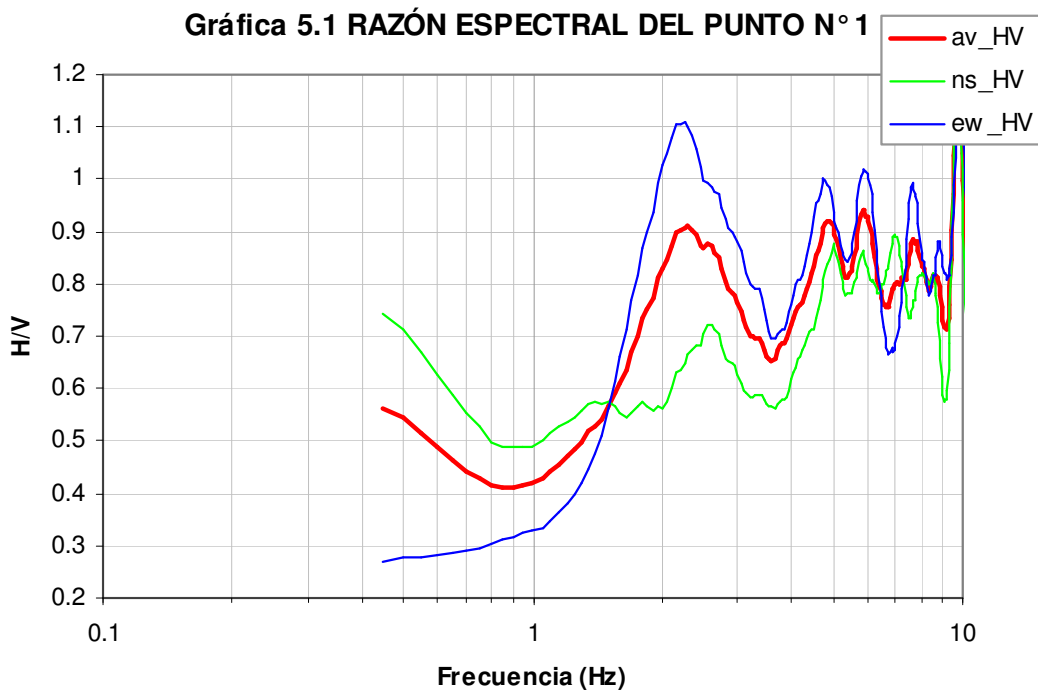


Figura 26. Razón espectral del sitio 1, Canchas de Micro Football.

En la figura 26 se muestra la razón espectral para el sitio número 1, se aprecian dos picos que señalan una **frecuencia fundamental de 5.89** y 5 Hz con **factor de amplificación de 0.94** y 0.9 respectivamente. Los periodos correspondientes para cada frecuencia son 0.98 y 0.32 segundos.

5.2.1.2 Sitio N° 2 Diamante

Date: 21 de marzo del 2007.

Hora: 1:27 p.m.

Tipo de sensor: sismómetro

Condiciones Ambientales: soleado, temperatura 24 °C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: forraje corto

Observaciones: algunos peatones a 80 m.

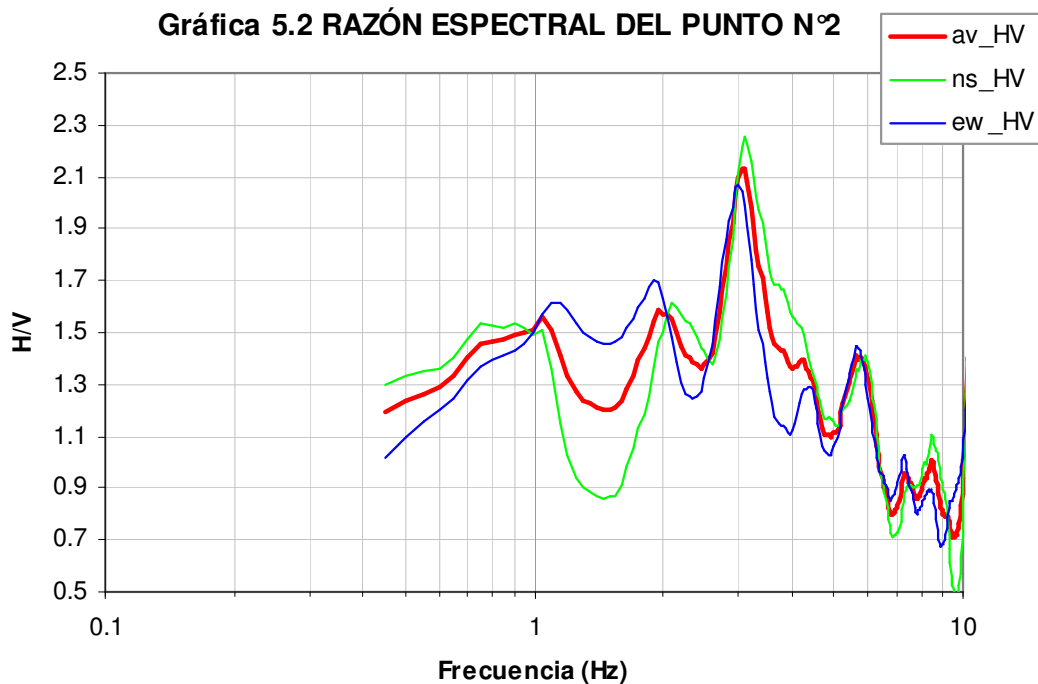


Figura 27. Razón espectral del sitio 2, Diamante.

En la figura 27 se muestra la razón espectral para el sitio número 2, el pico predominante señala una **frecuencia fundamental de 3.1 Hz** y **factor de amplificación de 2.13**. El periodo correspondiente para esta frecuencia es de 0.47 segundos.

5.2.1.3 Sitio N° 4 Cancha De Football

Date: 30 de marzo del 2007

Hora: 10:53 a.m.

Tipo de sensor: sismómetro

Condiciones Ambientales: soleado, temperatura 25°C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: follaje corto

Observaciones: ningún evento divisible a simple vista, zona desolada.

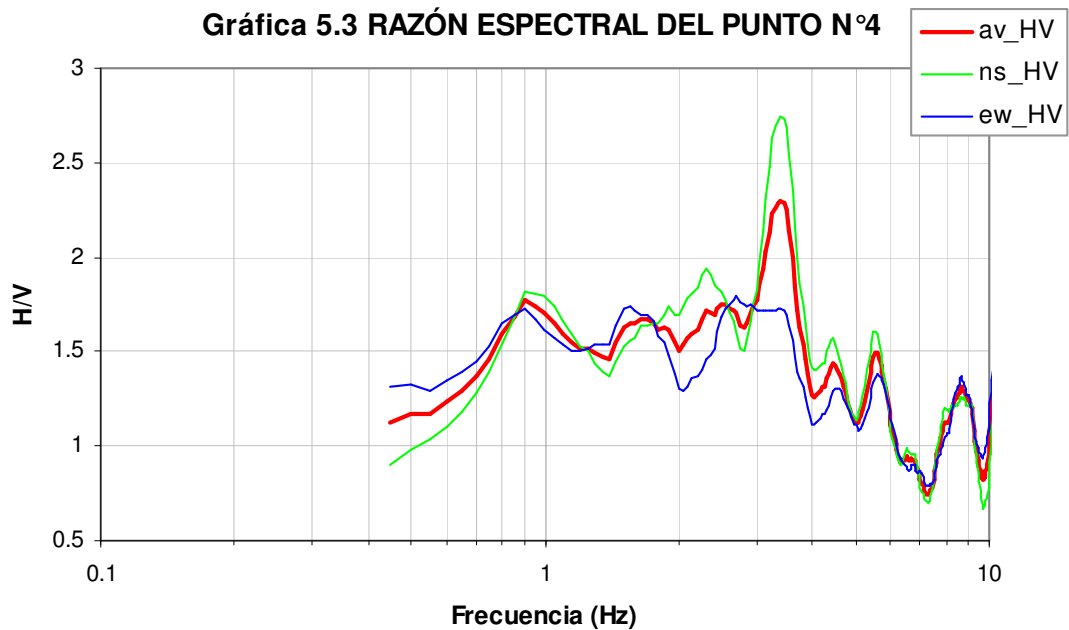


Figura 28. Razón espectral del sitio 4, Cancha de Football.

En la figura 28 se muestra la razón espectral para el sitio número 4, el pico predominante señala una **frecuencia fundamental de 3.4 Hz** y **factor de amplificación de 2.29**. El periodo correspondiente para esta frecuencia es de 0.43 segundos.

5.2.1.4 Sitio N° 6 Gallera

Date: 30 de marzo del 2007

Hora: 12:53 p.m.

Tipo de sensor: sismómetro

Condiciones Ambientales: sombra, temperatura 25°C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: follaje largo pero fue retirado para situar el sensor.

Observaciones: peatones ocasionales a 10 m.

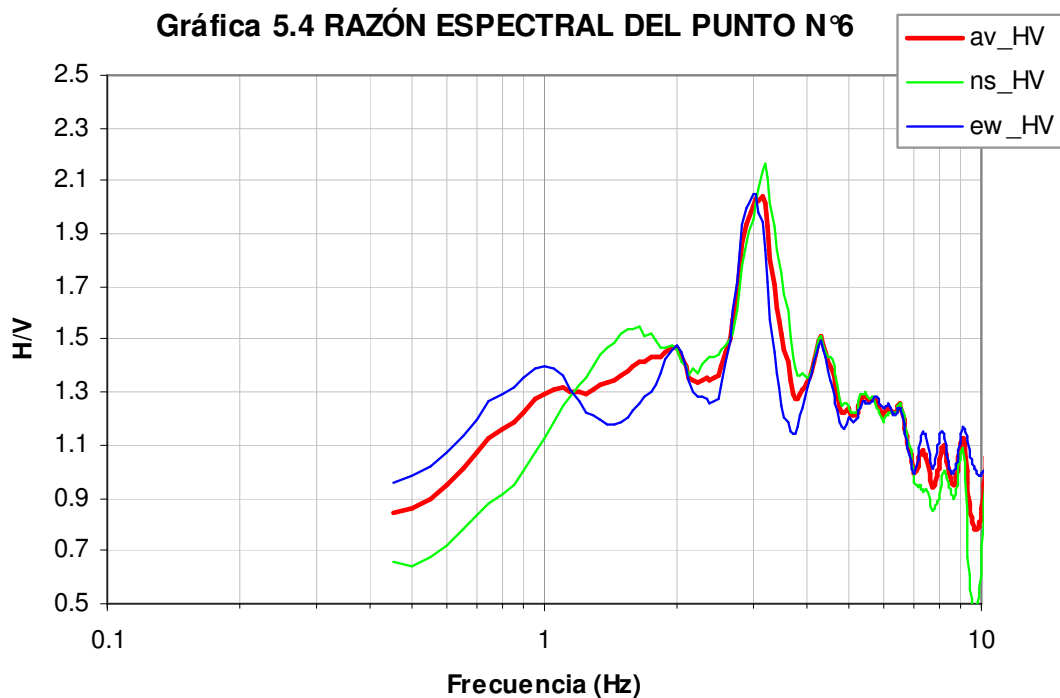


Figura 29. Razón espectral del sitio 6, Gallera.

En la figura 29 se muestra la razón espectral para el sitio número 6, el pico predominante señala una **frecuencia fundamental de 3.15 Hz** y **factor de amplificación de 2.0**. El periodo correspondiente para esta frecuencia es de 0.49 segundos.

5.2.2 Exploración con Acelerómetro y K2

5.2.2.1 Registro A.

Fecha: 7 de septiembre del 2007

Hora: 4:30 p.m.

Tipo de sensor: acelerómetro

Condiciones Ambientales: sombra, temperatura 24°C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: follaje largo pero fue retirado para situar el sensor.

Observaciones: peatones ocasionales a 10 m.

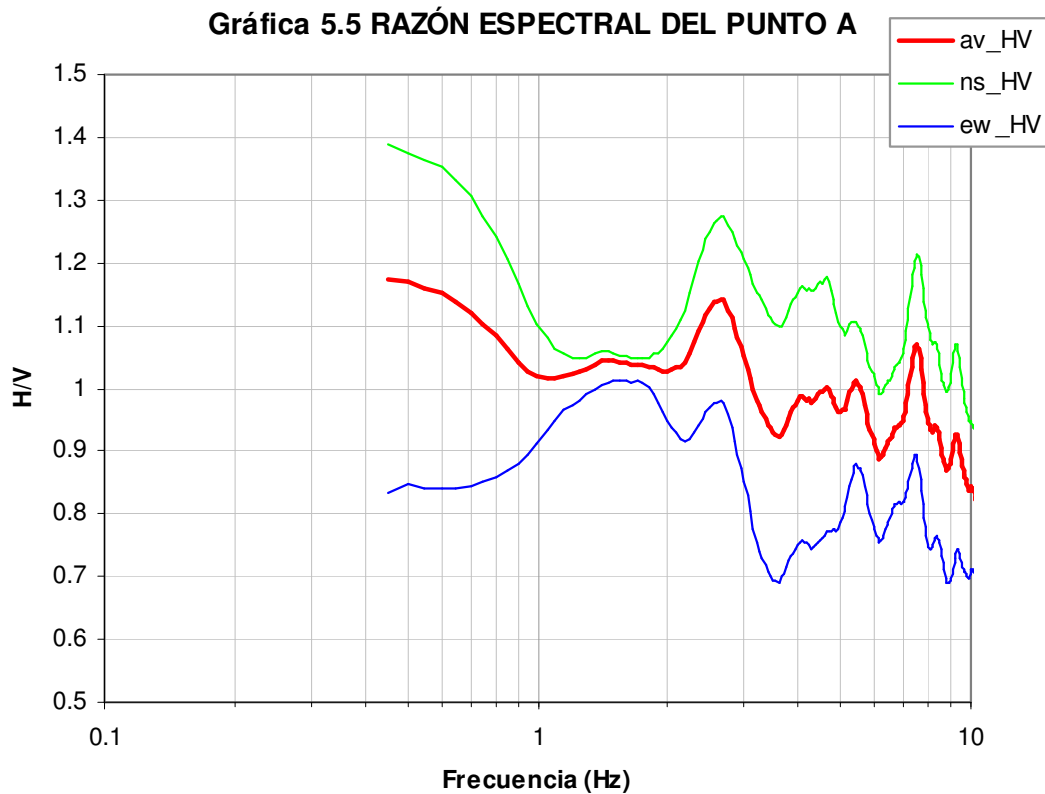


Figura 30. Razón espectral del registro A.

En la figura 30 se muestra la razón espectral para el registro A, el pico predominante señala una **frecuencia fundamental de 2.65 Hz** y **factor de amplificación de 1.15**. El periodo correspondiente para esta frecuencia es de 0.87 segundos.

5.2.2.2 Registro B.

Fecha: 7 de septiembre del 2007

Hora: 5:00 p.m.

Tipo de sensor: acelerómetro

Condiciones Ambientales: sombra, temperatura 24°C aprox.

Sensor sobre suelo de tipo: follaje largo pero fue retirado para situar el sensor.

Observaciones: peatones ocasionales a 10 m.

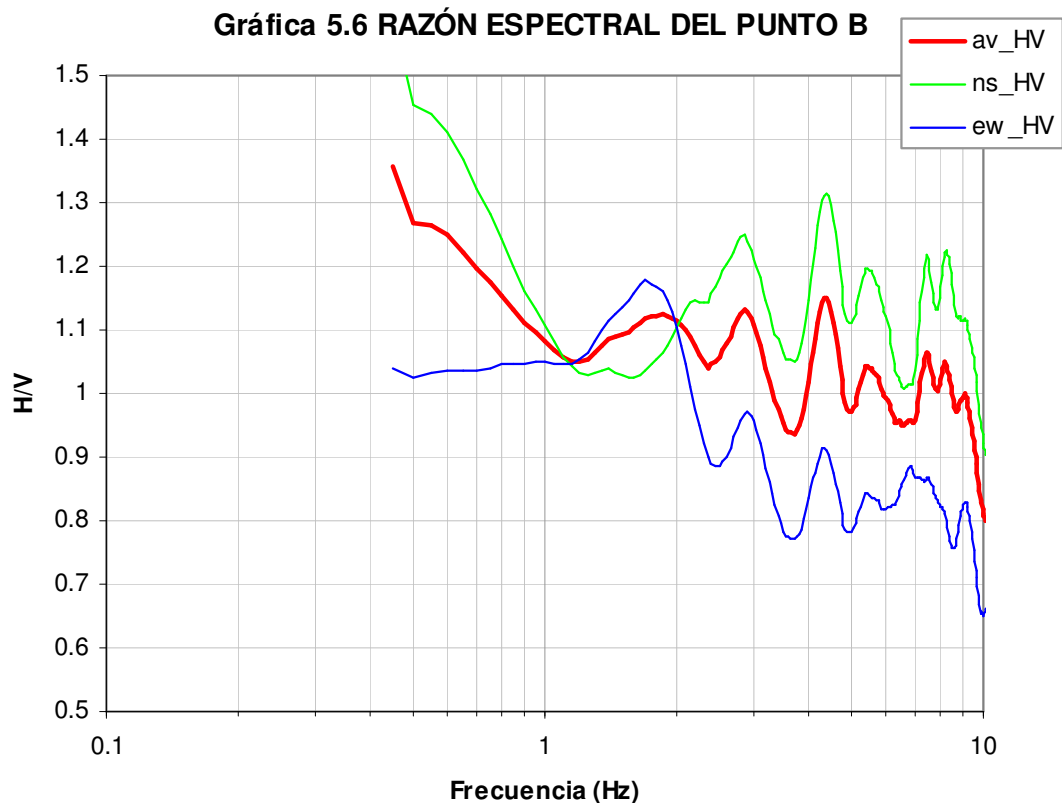


Figura 31. Razón espectral del registro B.

En la figura 31 se muestra la razón espectral para el registro B, el pico predominante señala una **frecuencia fundamental de 4.35 Hz** y **factor de amplificación de 1.15**. El periodo correspondiente para esta frecuencia es de 0.87 segundos.

El promedio de los datos tomados por el sismómetro es 3.05 Hz (0.32 s) en la frecuencia fundamental y 1.51 de F.A, para los registros del acelerómetro 4.5 Hz (0.22) y 1.1 respectivamente.

El promedio no fue calculado directamente de los valores resultantes mostrados, estos fueron calculados promediando las amplitudes de las curvas obtenidas para cada registro de la misma forma que se hace la para las ventanas seleccionadas en un registro y observando el nuevo pico de la curva resultante.

6. VALIDACIÓN

La caracterización dinámica de suelos es posible por medio de métodos empíricos y métodos analíticos, de los cuales se usaron uno de cada uno, la ya mencionada técnica de Nakamura como método empírico y el modelo lineal equivalente como método empírico. El modelo lineal equivalente fue muy bien adaptado a los sistemas computacionales en el software Shake y posteriormente por su actualización Shake91. Por ello se implementó en este estudio como complemento a los datos experimentales obtenidos de campo; aunque, el Shake91 no fue usado con su interfase original la cual es un poco complicada y tediosa de operar, si fue usada su estructura computacional por medio de un archivo de Excel el cual es llamado EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis). Este documento de Excel se encargó de elaborar una interfaz más descriptiva de los datos necesarios para el cálculo y de los resultados obtenidos por Shake o Shake91.

El cálculo de la función de transferencia por el modelo lineal equivalente es una herramienta muy útil, pero de difícil aplicación considerando los datos necesarios para tal objetivo. Es necesario el previo conocimiento de las características geotécnicas del depósito de suelo en estudio, tales como la columna litológica, velocidad de ondas sísmicas de cizalla para cada estrato, modulo de cortante y sus porcentajes de deformación, etc. Para la obtención de esta información es necesaria la realización de sondeos a grandes profundidades con sus respectivos análisis en laboratorio y estas condiciones hacen encarecer la investigación.

La columna litológica y los datos necesarios para nuestro estudio y el análisis lineal equivalente, fueron obtenidos de un sondeo realizado por el Ingeominas en cercanías a la zona de estudio para la caracterización dinámica de Bucaramanga y su área metropolitana.

Castillo et al (2005) aplicaron el software EERA y se empleó un acelerograma sintético basado en las normas técnicas de Venezuela. Para nuestro caso se usaron acelerogramas recomendados por la microzonificación de Bucaramanga, los cuales son equivalentes.

6.1 COLUMNA LITOLÓGICA

La columna litológica del depósito aluvial de la ciudad de Bucaramanga se definió patentemente en el estudio realizado por Ingeominas. (Ingeominas, 2001). En la figura 32 se muestra el modelo que reúne las columnas resultantes de todas las perforaciones realizadas, pero para nuestro propósito se tomó la definida por la perforación en el sector parque de los niños.

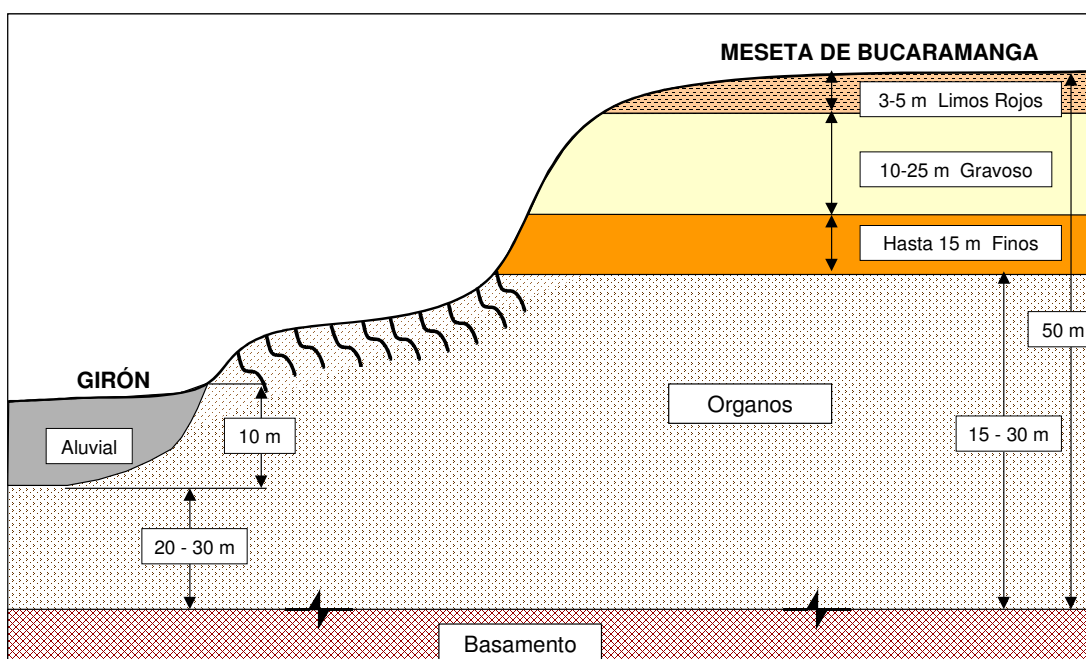


Figura 32. Perfil litográfico general de la ciudad de Bucaramanga. (Ingeominas, 2001)

Teniendo en cuenta la información obtenida a través de la Perforación del sector parque de los niños, ejecutada durante los trabajos de investigación geotécnica del subsuelo, la cartografía geológica, los estudios de refracción sísmica y los sismos registrados en las estaciones cercanas, el estudio de caracterización

sísmica de Bucaramanga definió el perfil litológico de la zona nororiental de Bucaramanga; zona donde esta ubicada la universidad. La perforación llegó hasta 98 metros de profundidad con muestreo continuo de los materiales. Hicieron ensayos de laboratorio de clasificación, compresibilidad y resistencia tanto estática como dinámica. Con base en el perfil geotécnico y mediante un análisis de sensibilidad se definieron la ubicación del basamento a 50 metros de profundidad, lo que permitió definir claramente el modelo tal y como se presenta en la Tabla 5 y en la figura 33.

Tabla 5. Perfil del Subsuelo en el sector Parque de los Niños.

| CAPA | PROF. (m) | DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA | IP (%) | yt (ton/m³) |
|-------------|--------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 1 | 0 a 3 | Miembro Limos Rojos | 15 | 1.60 |
| 2 | 3 a 30 | Miembro Gravoso | 20 | 2.30 |
| 3 | 30 a 50 | Miembro Órganos | 10 | 2.15 |
| 4 | 50 | Basamento (Roca) | - | 2.40 |

6.2 DIAGRAMAS DE MÓDULO CORTANTE Y AMORTIGUAMIENTO

El estudio de microzonificación sísmica indicativa de Bucaramanga con base en los ensayos triaxiales cíclicos ejecutados sobre muestras de los Miembros Limos Rojos, Gravoso y Órganos de la Formación Bucaramanga, reprodujo el comportamiento esfuerzo – deformación para cada uno de estos materiales mediante la utilización del modelo hiperbólico según el procedimiento planteado por Hardin & Drnevich en 1992. Estos diagramas son empleados en este análisis y son presentados en las figuras 34, 35 y 36 para cada estrato: miembro órganos, miembro gravoso y miembro limos rojos respectivamente. Además una tabulación de estos diagramas las cuales son empleadas en el software EERA (Tablas 6, 7 y 8).

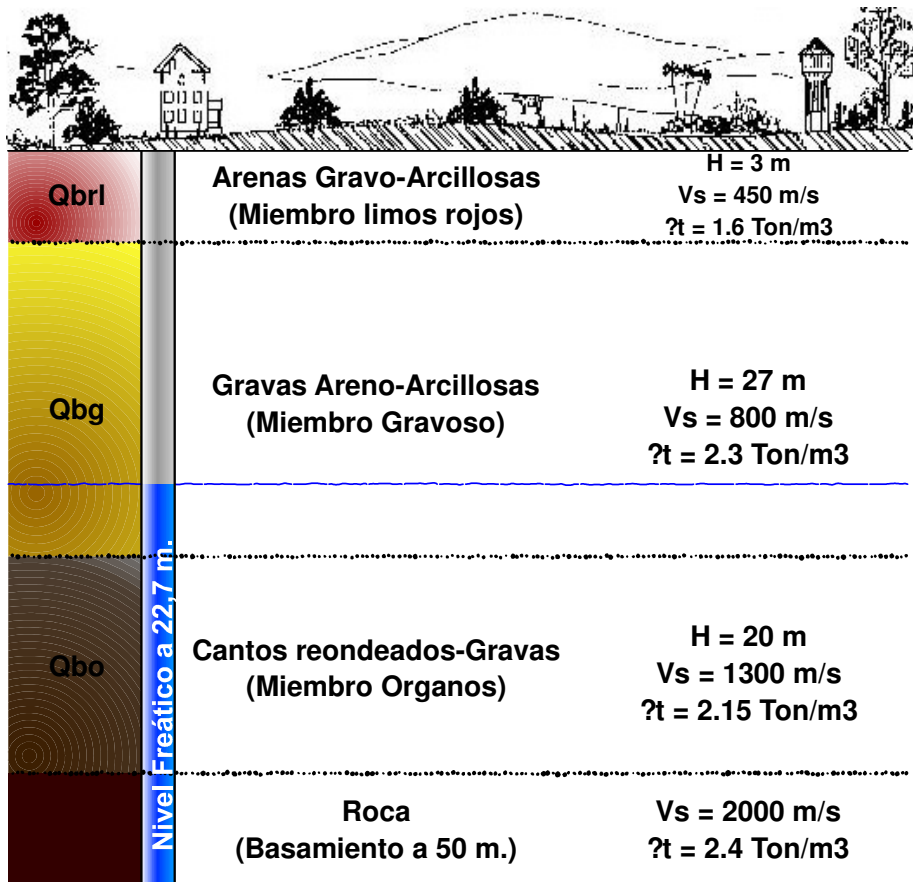


Figura 33. Perfil Litológico del subsuelo de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 6. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro órganos.

**MIEMBRO ÓRGANOS FORMACIÓN
BUCARAMANGA**

| Strain (%) | G/G _{max} | Strain (%) | Damping (%) |
|------------|--------------------|------------|-------------|
| 0.000001 | 1 | 0.000001 | 0 |
| 0.000003 | 0.992 | 0.000003 | 0.3 |
| 0.00001 | 0.9875 | 0.00001 | 1 |
| 0.00003 | 0.96 | 0.00003 | 2.2 |
| 0.00006 | 0.94 | 0.00006 | 3 |
| 0.0001 | 0.9 | 0.0001 | 4.9 |
| 0.0003 | 0.75 | 0.0003 | 10.6 |
| 0.0006 | 0.608 | 0.0006 | 17 |
| 0.001 | 0.475 | 0.001 | 22.6 |
| 0.003 | 0.235 | 0.003 | 32.5 |
| 0.006 | 0.138 | 0.006 | 37 |
| 0.01 | 0.08 | 0.01 | 38 |

Tabla 7. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro Gravoso.

MIEMBRO GRAVOSO

| Strain (%) | G/Gmax | Strain (%) | Damping (%) |
|------------|--------|------------|-------------|
| 0.000001 | 1 | 0.000001 | 0 |
| 0.000003 | 1 | 0.000003 | 0.1 |
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 0.2 |
| 0.00003 | 0.994 | 0.00003 | 0.4 |
| 0.00006 | 0.986 | 0.00006 | 0.7 |
| 0.0001 | 0.98 | 0.0001 | 1 |
| 0.0003 | 0.96 | 0.0003 | 2 |
| 0.0006 | 0.93 | 0.0006 | 3.5 |
| 0.001 | 0.89 | 0.001 | 5.6 |
| 0.003 | 0.73 | 0.003 | 12.3 |
| 0.006 | 0.575 | 0.006 | 18 |
| 0.01 | 0.44 | 0.01 | 25 |

Tabla 8. Tabulación de los diagramas de modulo cortante y amortiguamiento para el miembro Limos Rojos.

MIEMBRO LIMOS ROJOS

| Strain (%) | G/G _{max} | Strain (%) | Damping (%) |
|------------|--------------------|------------|-------------|
| 0.000001 | 1 | 0.000001 | 0 |
| 0.000003 | 1 | 0.000003 | 0.2 |
| 0.00001 | 0.99 | 0.00001 | 1 |
| 0.00003 | 0.97 | 0.00003 | 2 |
| 0.00006 | 0.95 | 0.00006 | 2.5 |
| 0.0001 | 0.92 | 0.0001 | 4 |
| 0.0003 | 0.78 | 0.0003 | 9.5 |
| 0.0006 | 0.64 | 0.0006 | 16 |
| 0.001 | 0.51 | 0.001 | 22 |
| 0.003 | 0.27 | 0.003 | 32 |
| 0.006 | 0.15 | 0.006 | 36.5 |
| 0.01 | 0.1 | 0.01 | 38 |

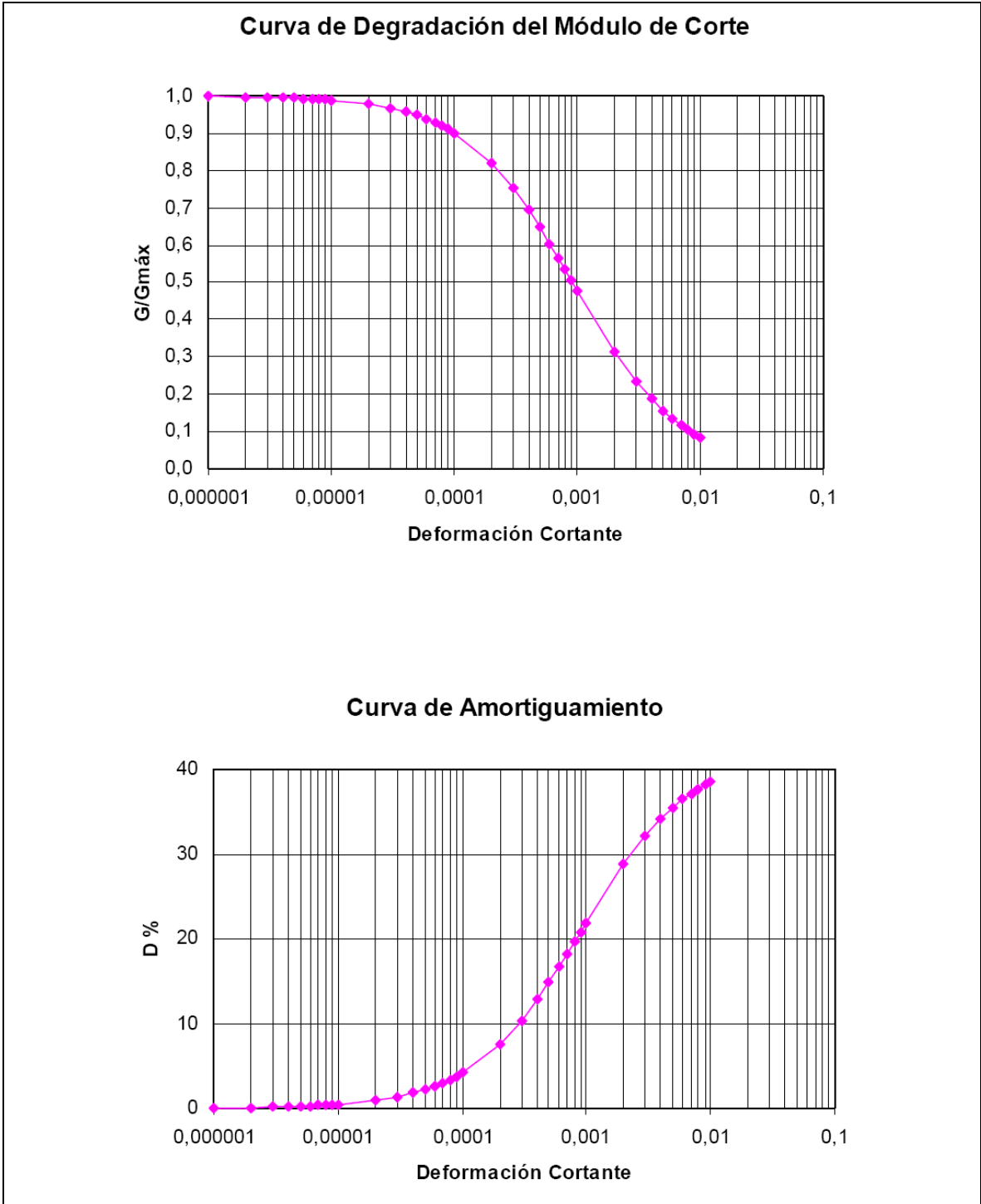


Figura 34. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Órganos (Formación Bucaramanga).

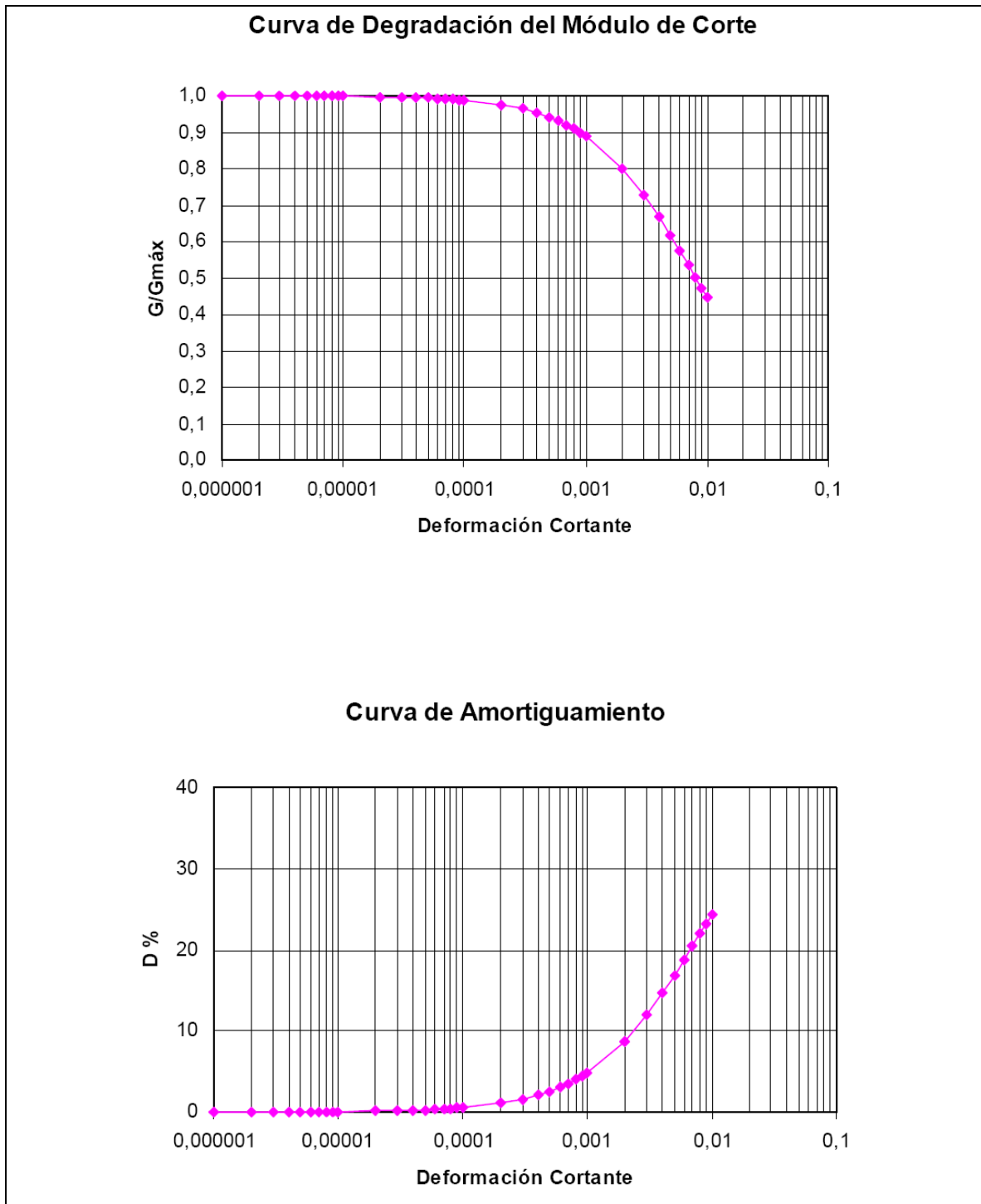


Figura 35. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Gravoso (Formación Bucaramanga).

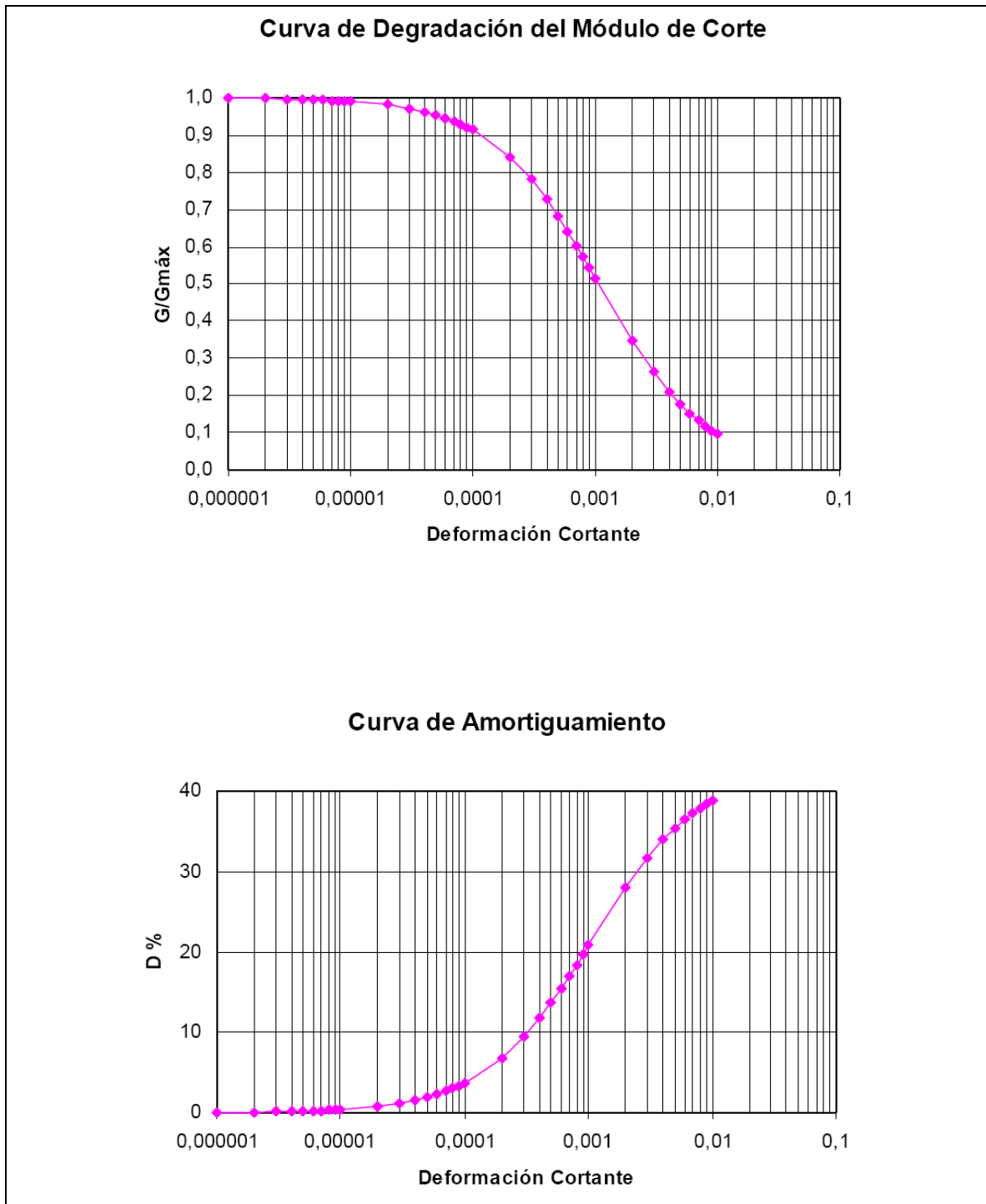


Figura 36. Propiedades dinámicas para los materiales del miembro Limos Rojos (Formación Bucaramanga).

6.3 SISMO DE ENTRADA

Para la simulación numérica es necesario usar el acelerograma de un sismo, el cual debe ser equivalente a los esperados en la zona o a aun mejor, que se halla registrado en una estación cercana.

La microzonificación sísmica de Bucaramanga especificó varios acelerogramas compatibles con las fallas localizadas en Bucaramanga, es el caso de la falla de Santamarta y escenario sísmico frontal (nido de Bucaramanga). La figura 37 muestra algunos de ellos, y el usado para este caso es el acelerograma del conocido sismo de Loma Prieta, el mayor movimiento telúrico registrado en la bahía de San Fráncico, California.

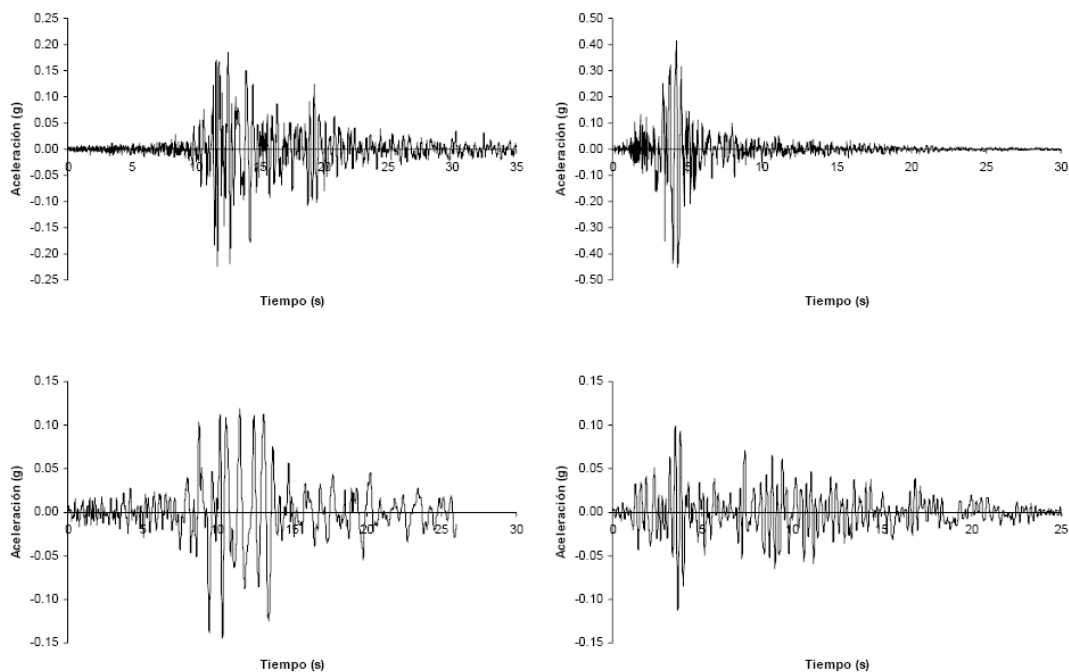


Figura 37. Acelerogramas compatibles con fallas en Bucaramanga.⁵

⁵ De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze.

6.4 VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE

Dentro de los estudios realizados por la microzonificación de Bucaramanga se presenta el análisis correspondiente a los ensayos de refracción sísmica, con lo cual se determinó la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (P) y transversales (S) en diferentes lugares del Área Metropolitana de Bucaramanga, la profundidad de las diferentes interfases refractadas presentes en la zona y su correlación con los resultados obtenidos en el estudio geológico. Para nuestro interés solo es necesario recolectar las velocidades de corte para nuestro modelo litográfico, las cuales son expresadas en la tabla 9.

Tabla 9. Velocidades de corte de los estratos presentes en el subsuelo.

| DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA | Vs (m/seg.) |
|------------------------|-------------|
| Miembro Limos Rojos | 450 |
| Miembro Gravoso | 800 |
| Miembro Órganos | 1300 |
| Basamento (Roca) | 2000 |

6.5 RESULTADOS

Los resultados obtenidos por el modelamiento lineal equivalente con la ayuda de EERA son muy explícitos. Los valores de interés son el periodo fundamental y la amplificación del depósito de suelo especificado. Estos valores son mostrados a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Período Fundamental (s)} &= \mathbf{0.20} \\ \text{Amplificación Máxima} &= \mathbf{1.654} \end{aligned}$$

El periodo fundamental es calculado a partir de información del perfil litológico por medio de la expresión $T = \frac{4H}{V_s}$, donde H es el espesor del depósito y Vs es la

velocidad de corte. Del espectro de Fourier modelado se obtiene una frecuencia fundamental de 1.46 Hz la cual expresa un periodo de 0.68 s (figura 38). Estos valores son heterogéneos, pero, si vamos a los resultados de la microzonificación sísmica el valor de 0.2 s. para el periodo es el considerado, ya que este es el resultado para el punto medido en el campus de la universidad en aquel estudio.

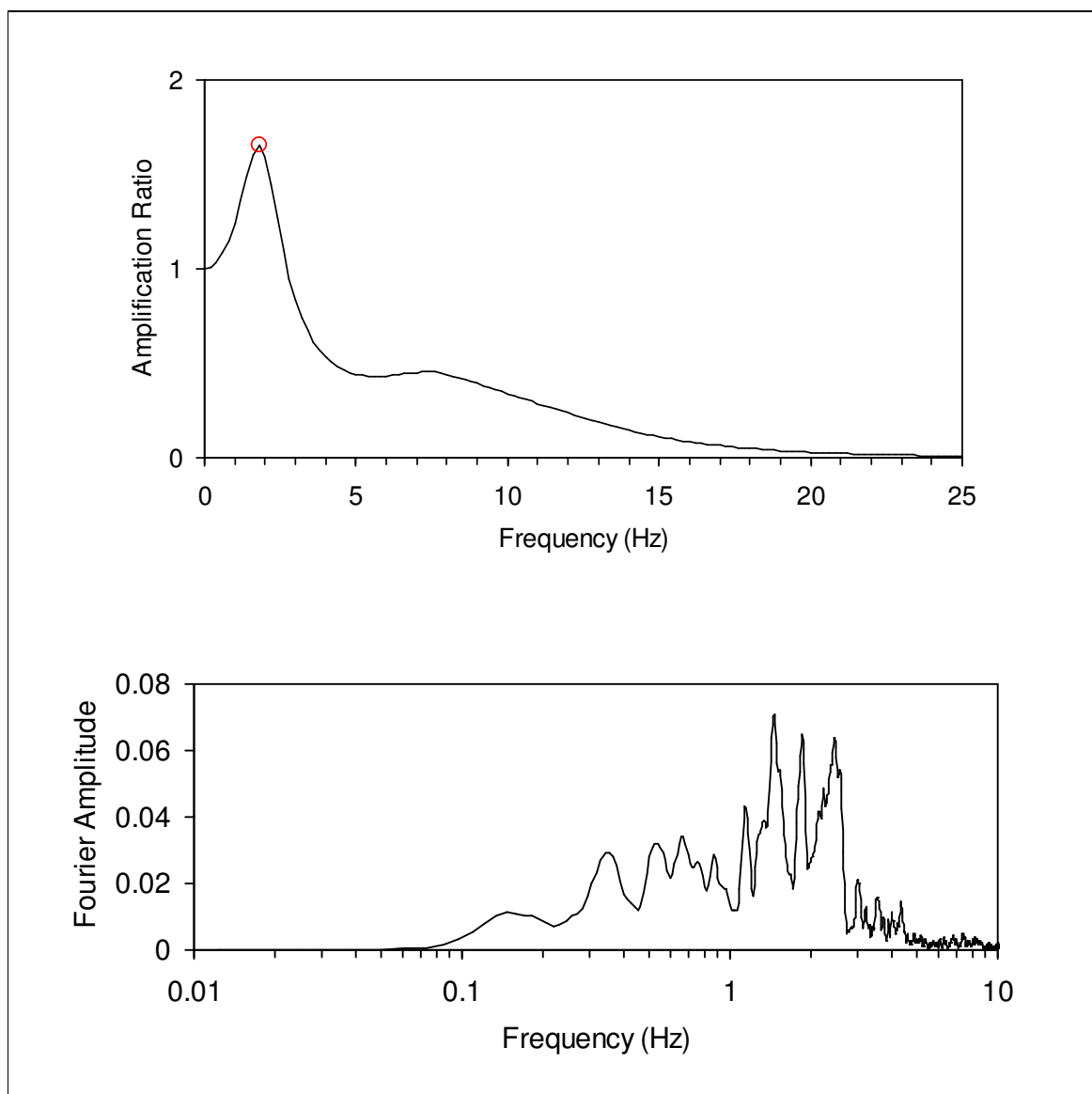


Figura 38. Amplificación y frecuencia de Fourier del depósito de suelo en el campus de la Universidad Industrial de Santander.

Los resultados y el promedio de ellos obtenidos del campus universitario, son mostrados en la tabla 10. En esta tabla se puede apreciar que los sitios 2, 4 y 6 correlacionan muy bien tanto en la frecuencia como en el factor de amplificación, pero no lo hacen con los valores teóricos. Los registros A y B aunque que fueron tomados en el mismo sitio no armonizan en la frecuencia pero si poseen la misma amplificación. Los resultados en el sitio 1 son completamente diferentes a los demás, el factor de amplificación expresa una deamplificación y la frecuencia fundamental es muy a cercana a la teórica. El promedio no fue calculado directamente de los valores resultantes mostrados en la tabla 10, estos fueron calculados promediando las amplitudes de las curvas obtenidas para cada registro de la misma forma que se hace la para las ventanas seleccionadas en un registro y observando el nuevo pico de la curva resultante.

Tabla 10. Resultados.

| Registro | Frecuencia Fo (Hz) | Factor de Amplificación |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Sitio 1 | 5.4 | 0.94 |
| Sitio 2 | 3.1 | 2.13 |
| Sitio 4 | 3.4 | 2.29 |
| Sitio 6 | 3.15 | 2 |
| Promedio | 3.05 | 1.51 |
| Registro A | 2.65 | 1.15 |
| Registro B | 4.35 | 1.15 |
| Promedio | 4.5 | 1.10 |
| Periodo To (s) | 0.22 | |
| Modelo Lineal | 5 | 1.654 |

7. CONCLUSIONES

- Se evaluaron los periodos predominantes y amplificación local del campus de la Universidad Industrial de Santander experimentalmente y empíricamente. Los resultados obtenidos demuestran que se puede determinar la función de transferencia aproximada de un depósito de suelo por medio de mediciones en superficie, ya que se encontró tendencia a un valor específico en varias mediciones.
- La comparación de resultados obtenidos de los registros tomados con el K2 en un mismo sitio no fueron exactos, el valor de la frecuencia fundamental no fue la misma pero el promedio de las curvas de H/V arroja un valor de frecuencia fundamental muy cercano al esperado, aunque, para la amplificación no es así; esto se debe a la poca sensibilidad de los acelerómetros para medir amplitudes de vibraciones ambientales. Además el empleo de acelerómetros en la medición de vibración ambiental es limitada en la banda de frecuencias de 1 Hz en adelante. En el caso del Equipo UIS los resultados correlacionaron mejor pero los valores no fueron precisos, esto era de esperarse ya que la tolerancia en la sensibilidad y el rango de frecuencias en el los sensores es considerablemente alta.
- Las vibraciones inducidas por maquinarias, motores como el de los aires acondicionados y tráfico fuerte; intervienen significativamente en las señales de microtremors o vibración ambiental, induciendo a que el espectro generado por la transformada de Fourier sea menos aproximada y las curvas no generen picos representativos.
- La técnica de Nakamura y la medición de vibraciones ambientales parece ser una buena herramienta para la evaluación de la función de transferencia en tiempos y a costos reducidos, pero es claro que debe ser complementada con otras metodologías.
- La metodología usada para la medición de señales es tan importante como

la técnica aplicada, sobre todo las características y clase del equipo empleado, ya que las mediciones realizadas con el equipo UIS arrojaron resultados diferentes a los obtenidos con el K2.

- Se observó que el suavizado del espectro de las señales es de gran importancia para la obtención de resultados representativos sobre todo para la frecuencia fundamental. La comparación del espectro suavizado en la función lineal en caja de 0.1 Hz con la función lineal triangular de 1 Hz, aplicados a un mismo registro fue heterogénea en la cantidad de picos visibles. Se debe buscar el suavizado que mejor genere el pico en la razón espectral y se recomienda usar la función lineal triangular en un rango de 1 a 5 Hz para el suavizado de los espectros.
- En el estudio realizado por INGEOMINAS sobre la microzonificación sísmica indicativa de la ciudad de Bucaramanga se caracterizó el suelo de la zona de estudio mostrando un valor para la amplificación local de 1.8 y un periodo de vibración de 0.2 segundos. Comparándolos con los datos obtenidos de este análisis, factor de amplificación de 1.5 y periodo fundamental de 0.22 segundos, se observa que tienen una buena aproximación.
- Los equipos que se componen de acelerómetros como sensor son más confiables para definir periodos fundamentales, por otro lado los equipos que utilizan sismómetros como sensor tienen un mejor comportamiento para definir el factor de amplificación.
- Es preciso continuar trabajando en la conformación de un marco teórico apropiado que explique específicamente que tipos de ondas componen los microtemblores.
- Del uso de acelerómetros se recomienda que en su configuración se considere la amplificación máxima, ya que de esta manera el nivel de las amplitudes genera mejores factores de amplificación.
- Se realizaron promedios de las señales medidas para definir un periodo y un factor de amplificación único para el campus, estos valores se toman del nuevo pico de la señal resultante.

BIBLIOGRAFÍA

Aki, K and Richards, P. Quantitative Seismology. Freeman and Co., New York. 1980.

Alfaro, A. Aplicación de los Microtemblores en la Ingeniería Sísmica. XVI Jornadas Estructurales de la Ingeniería en Colombia. (2005)

Alfaro, A. Caracterización Dinámica de Suelos Mediante Microtemblores HVSR y Arreglos. Universidad de la Salle; Oficina de Medios Audiovisuales y Publicaciones. Bogotá D.C. 2006.

Alfaro, A. Estimación del período predominante del suelo a partir de microtemblores. Primera Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, 1998; p. 1-8.

Alfaro, A et al. Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué. En: Red Sismológica Regional Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima. Vol. 6. No. 1. 2001; p. 2-37.

Alfaro, A et al. Measurements of Microtremors in Barcelona: A Tool for Seismic Microzonation. En: Proceedings of Iamg'97, 1997; p. 217-221.

Alfaro, A et al. Microzonificación Sísmica de Barcelona Utilizando el Método de Nakamura, Ventajas y Limitaciones. Memorias del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Asociación Española de Ingeniería Sísmica. Murcia, España, 1999; p. 273-278. Des: http://www.andresalfaro.com/doc_estudios/1999_alfaro_navarro_sanchez_pujades.pdf. 07/11/2007.

Alfaro, A; Egozcue, J y Ugalde, A. Determinación de las Características Dinámicas del Suelo a partir de Microtemblores, 1999. Des: [www.ciees.org/doc_estudios/1999%20_alfaro_egozcue_ugalde.pdf](http://www.ciees.org/doc_estudios/1999%20alfaro_egozcue_ugalde.pdf). 23/10/2006.

Arai, H et al. Seismic Vulnerability Evaluation of Urban Structures in the Metro-Manila. Part 2: Response of Deep Soil Layers. 2004. Des: <http://www.jshis.bosai.go.jp/staff/arai/papers/ACEE04-16.pdf>. 23/10/2006.

Arciniega, A; Valdes, C and Dawsonb, P. Temporal and spectral characteristics of seismicity observed at Popocatepetl volcano, central Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal research. No. 102. 2000; p. 207-216. Des: <http://www.sciencedirect.com>, www.elsevier.com/locate/soildyn. 19/04/2007.

BARD, Pierre-Yves. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation. Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME. 2004. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf. 25/07/2006. Web principal: http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_TechnicalDoc.htm.

Bardet, J; Ichil, K and Lin, C. EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California, departamento de ingeniería civil. 2000.

Benjumea Cadavid, J. Tesis de Pregrado. Vibraciones Causadas por Actividad Humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil. Universidad Del Valle Facultad De Ingenierías. Escuela De Ingeniería Civil. Santiago De Cali. 2003.

Bodin, P et al. Microtremor Observations of Deep Sediment Resonance in Metropolitan Memphis, Tennessee. En: Engineering Geology. 2000; p. 1-19.

Bonnefoy-Claudet, S; Cotton, F and Bard, P. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. En: Earth-Science Reviews. 2006. Des: <http://www.sciencedirect.com>, www.elsevier.com/locate/soildyn. 19/04/2007.

Bour, M et al. On the Use of Microtremor Recordings in Seismic Microzonation. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No.17. 1998; p. 465-474.

Cala, J. y Peña, O. Tesis de Pregrado, Diseño y Construcción de un Sistema de Adquisición de Datos Microsísmicos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2004.

Castillo, A; López, F y Pujades, L. Peligrosidad Sísmica Local para la Ciudad de Mérida, Venezuela. Implementación en Sig. (Sistema De Información Geográfica). 2005. Des:

<http://webdelprofesor.ula.ve/arquitectura/argicast/publicaciones/Peligrosidad%20s%EDsmica%20local%20M%E9rida%20Venezuela.pdf>. 08/07/2007.

Cien Años de Instrumentación Sísmica en México, Sismógrafos de hoy. Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica Universidad Nacional Autónoma de México. Web: <http://www.ssn.unam.mx/SSN/instrumentacion3.html>. Último Acceso: 05/03/2007.

CISMID. Ensayos Sísmicos Downhole en la Presa Tinajones. Chongoyape, Chiclayo, Lambayeque. HIDROENERGIA Consultores en Ingeniería SAC. (2000).

CISMID. Estudio de Refracción Sísmica en el Depósito de Desmonte Rosaura. Chicla, Huarochirí, Lima. CENTROMÍN PERÚ S.A. (2000)

CISMID. Estudio de Refracción Sísmica en el Depósito de Relaves N°5, Mina Recuperada. Castrovirreyña, Huancavelica. NURIVSA. (2000)

Espinoza Barreras, Fortunato. Tesis Doctoral. Determinación de las Características Dinámicas de Estructuras. Universidad Politécnica de Cataluña, BARCELONA. 1999. Des:

http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0731102-151724//02CAPITULO1.pdf. 04/03/2007.

Fallahi, A; Alaghebandian, R & Miyajima, M. Microtremor Measurements and Building Damage during the Changureh-Avaj, Iran Earthquake of June 2002. En: Journal of Natural Disaster Science. Vol. 25. No. 1. 2003; p. 37-46. Des: http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/jsnds/download.cgi?jsdn_25_1-5.pdf. 05/02/2007.

Fernández, L and Brandt, M. The reference spectral noise ratio method to evaluate the seismic response of a site. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 20. 2000; p. 381-388. Des: www.elsevier.com/locate/soildyn. 13/03/2007.

Flores, H; Lomnitz, C y Yussim, S. Estimación De Velocidades De Fase A Partir Del Análisis De Microtremores Con El Método SPAC. En: Geos. Vol. 24. No. 3. 2004; p. 438-445.

Gallego, M y Sarria, A. El Concreto y los Terremotos: Conceptos, Comportamiento, Patología y Rehabilitación. Primera Edición Asocreto, 2006.

Giampiccolo, E et al. Information in subsoil geological structure in city of Catania (Eastern Sicily) from microtremor measurements. *Annali di Geofísica*. Vol. 44. No. 1. 2001; p. 1-11.

Giraldo, V et al. Estimación de Efectos Locales con Movimientos Sísmicos y Microtemblores. XIII. Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia. 1999.

Gitterman, Y et al. Empirical Site Response Evaluations: Case Studies in Israel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. No. 15. 1996; p. 447-463. Des: <http://www.sciencedirect.com>, www.elsevier.com/locate/soildyn.

González, B y Pérez, L. Utilización de los Mapas de Microzonificación Sísmica en el Planeamiento Urbano y la Reducción del Riesgo Sísmico. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Departamento de Sismología de Ciudad de la Habana. 2004.

González, M; Mayer, S y Aguirre, A. Reporte de un enjambre sísmico de febrero-Abril de 2004, en la bahía de la paz, baja California sur, México. En: *GEOS*. Vol. 24, No. 3. 2004; p. 451-456.

Gosar, A. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Engineering Geology*. No. 91. (2007); p. 178-193. Des: www.elsevier.com/locate/soildyn. 14/05/2007.

Goula, X et al. Comparison of Numerical Simulation and Microtremors Measurement for the Analysis of Site Effects in the City of Barcelona (Spain). *European Conference on Earthquake Engineering*. 1998; p. 291-303.

Guéguen, Philippe. Microzonificación de Quito (Ecuador). Orstom e Instituto Geofísico De Quito. 1997. Des: http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/griseli1/010018139.pdf. 07/08/2007.

Hortensia, F y Aguirre, J. SPAC: An alternative method to estimate earthquake site effects in Mexico City. En: *Geofísica Internacional*. Vol. 42. No. 2. 2003; p. 227-236. Des: <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/jorge/spac.pdf>. 23/10/2006.

Ingeominas - Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa Del Área Metropolitana De Bucaramanga. Bogotá, junio de 2001.

Moreno, L y Alfaro, A. De los Microsismos a los Microtemblores. Investigaciones en el Instituto Geofísico. VIII Congreso Colombiano De Geotecnia. 2000. Des: http://www.andresalfaro.com/doc_estudios/2000_moreno_alfaro.pdf. 15/08/2006.

Mucciarelli, M e Gallipoli, M. Misure di vibrazione ambientale e registrazioni accelerometriche sugli edifici ATER Melfi e loro suoli di fondazione. Università Degli Studi della Basilicata, Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata All'ingegneria. 2006. Des: http://www.unibas.it/utenti/mucciarelli/reports/Relazione_Ater_Melfi.pdf. 26/05/2007.

Mucciarelli, M et al. Refining Nakamura's technique: processing techniques and innovative instrumentation. European seismological commission, XXV General Assembly. 1996.

Nakamura, Y. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications. En: System and Data Research Co. Ltd. Vol. 3. No. 25. 2000; p. 1-8.

Nakamura, Y; Sato, T and Nishinaga, M. Local Site Effect of Kobe Based on Microtremor Measurement. 2002. Des: http://www.sdr.co.jp/papers/local_site_effect_on_kobe.pdf. 06/03/2007.

National Instruments, LabVIEW. Graphical Programming for Instrumentation. User Manual. 1996.

Nobile Blanco, J. Caracterización Geofísica de la Cuenca Pull-Apart de Cabudare, Noroccidente de Venezuela. Tesis de Pregrado. Universidad Simón Bolívar, Ingeniería geofísica, Sartenejas, Venezuela. Abril 2005. Des: <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Juan%20Nobile.pdf>

Norma ASTM D4428 / D4428M – 91. Norma para el Ensayo por el Método Crosshole. Curso Taller: Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica, CISMID, Diciembre, 1999.

Norma ASTM D5777–95. Guía Normalizada para el Uso del Método de Refracción Sísmica en la Investigación del Subsuelo. Curso Taller: Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica, CISMID, Diciembre, 1999.

Ojeda, A y Escallon, J. Comparison between Different Techniques for Evaluation of Predominant Periods using Strong Ground Motion Records and Microtremors in Pereira Colombia. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 20. 2000; p. 137-143.

Pachón, S et al. Estimación Del Ts. En El Área Metropolitana De Bucaramanga. Ingeominas, Universidad Nacional de Colombia. 2001.

Panou, A et al. Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment; the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece). En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 25. 2005; p. 261-274.

Proakis, J y Manolakis, D. Tratamiento Digital de Señales. Prentice Hall, 3ª ED. Madrid, España. 1998.

Quintero Oliveros, Anggi. Tesis de Pregrado. Evaluación Bayesiana De Escenarios Eruptivos a través del Procesamiento de Datos Sísmicos. Universidad Simón Bolívar, Facultad De Ingeniería Geofísica. Sartenejas – Venezuela. 2005. Des: <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Anggi%20Quintero.pdf>. 11/10/2006.

Rincón, Orlando. Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores. En: Revista Facultad de Ingeniería. Vol. 14. No. 19. 2005; p. 49-57.

Rocabado, V et al. Caracterización de suelos de Barquisimeto, estado Lara, Venezuela, aplicando métodos geofísicos y geotécnicos. Boletín técnico IMME. Vol. 43. No. 2. (2005); p. 35-48. Des: http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2005000200003&lng=es&nrm=iso. 24/04/2007.

Rodríguez, V y Mirodikawa, S. Applicability of the H/V Spectral Ratio of Microtremors in Assessing Site Effects on Seismic Motion. En: Earthquake Engineering and Structural Dynamics No. 31. 2002; p. 261-279.

Romero, M et al. Caracterización de Suelos con Métodos Geofísicos en la Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, Estado Vargas, Venezuela. Boletín técnico IMME. Vol. 44. No. 1. 2006; p. 16-29. Des: http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2006000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=es. 24/06/2007.

Romo, J. Abril, 2003. Audio Digital, a Ritmo de Ceros y Unos. Recuperado noviembre, 2006. <http://www.enterate.unam.mx/Articulos/dos/abril/audiodig.htm>.

Rosales Climent, Cristina. Tesis de Pregrado. Sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Universidad

del Valle. Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Civil. Santiago de Cali. 2001.

Rosset, P et al. Site Effect Assessment at Small Scales in Urban Areas: A Tool for Preparedness and Mitigation. Groupe de Recherche if. 2002. Des: <http://www.grif.umontreal.ca/pages/i-rec%20papers/philipros.PDF>. 10/11/2006.

Sarria Molina, Alberto. Ingeniería Sísmica. Ediciones Uniandes, Segunda Edición, 1995. Santa Fe de Bogotá, D. C., Colombia.

Teves-Costa, P and Matias, L. Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 15. 1996; p. 201-209. Des: www.elsevier.com/locate/soildyn. 19/04/2007.

Theodulidis, P & Bard, P. Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1). Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 14. 1995; p. 177-197. Des: <http://www.sciencedirect.com>, www.elsevier.com/locate/soildyn. 19/04/2007.

Ventura, C; Thibert, K and Onur, T. Site Period Estimations Using Microtremor Measurements - Experimental and Analytical Studies in British Columbia. 2006; p. 1-10. Des: ftp://ftp.svibs.com/Download/Literature/Papers/2006/2006_4.pdf. 24/07/2007.

Verdugo, R et al. Uso de la Razón Espectral H/V en Superficie para la Caracterización Sísmica de Santiago. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica. No. A1-16. 2005.

ANEXOS

ANEXO A: USO DEL SOFTWARE JSESAME

Para iniciar con la ejecución del software, este se debe instalar en el ordenador usado, los requisitos para tal propósito son:

- La siguiente herramienta tiene que ser instalada en el sistema operativo: Java Runtime Environment (JRE) versión 1.4 (mínimo). Este y los archivos relevantes para su sistema operativo se pueden descargar de la Web site: <http://www.sun.com>
- Para Linux/Unix/Solaris se debe recompilar el código del FORTRAN, así que se necesita el compilador de FORTRAN g77 (o compatible) instalado.
- Requisitos mínimos de Windows: Windows 98, RAM 128MB (configuración sugerida: Windows 2000 o XP, RAM de 256MB)

Para la instalación en Windows se proporciona un programa (Setup). Este programa crea dos directorios en el directorio raíz de C:\, uno para el "hvproc" y otro para el "windowselection", el hvproc es el encargado de procesar los datos y el windowselection el de seleccionar las ventanas. También instala el archivo JAR y sus dependencias en el directorio de los programas, dentro de la carpeta JSesame. Y Crea un acceso directo en el tablero del escritorio.

La instalación en *Unix, Linux, Solaris o Macintosh* es un poco más compleja:

Para compilar las fuentes del FORTRAN vaya a:

.../Hvproc/Src y chequear en el *Makefile_L* el nombre del compilador de FORTRAN que usted ha instalado en su computadora (es decir. f77, g77,...). Hay algunas rutinas que son dependientes del compilador; no obstante los contenidos en el directorio .../Hvproc/Dep_L, que se diseñan para g77, deben trabajar en la mayoría de las plataformas del Unix. Los usuarios del Macintosh deben también copiar el archivo "itw.f_mac" en "itw.f".

Entonces:

\$ makefile - f Makefile_L, inicia el ejecutable. Si usted no utiliza este makefile, el ejecutable debe ser nombrado "hvproc0_1" y su localización está debajo de .../Hvproc.

Después vaya: ... /Windowselection/Src realizan el mismo chequeo descrito arriba y se ejecuta el makefile: \$ makefile - f Makefile_L, si no se utiliza el makefile proporcionado, el ejecutable se debe nombrar "winselection" y su localización está en el directorio de .../WindowSelection.

5.2.1 Creación del archivo de entrada

El archivo de entrada en ASCII del Sesame se organiza en 3 columnas que corresponden a 3 canales tomados de un solo sensor. La primera columna refiere al componente vertical, la segunda y tercera a las horizontales que se suponen ser desplegados en 90 grados entre cada una. La primera sección del archivo ASCII incluye un encabezado que contiene algunos parámetros obligatorios y opcionales. Cada parámetro, solamente uno en una fila, se especifica por medio de una palabra clave seguida por "=" y después por el valor del parámetro de este mismo. (es decir. : ndat = 1234).

Por lo tanto la estructura de tal fichero de datos del Sesame puede ser:

- Primera línea: "SESAME ASCII data format (saf) v. 1"

- Información del encabezado
 - ☞ Se permiten las líneas vacías
 - ☞ Los comentarios pueden ser agregados a condición de que el primer carácter en la fila es “#”
 - ☞ Las palabras claves no son caso sensible
 - ☞ El separador entre las palabras claves y sus valores es “=”
 - ☞ El orden de las palabras claves es inaplicable
 - ☞ Los espacios en blanco se pueden agregar por todas partes
- Los datos comienzan después de esta línea, que será el separador: “####--
-----”
- Los datos se escriben en tres columnas ajustadas a formato libremente
- La columna 1 debe corresponder al canal vertical, las columnas 2 y 3 a las horizontales

Las palabras claves obligatorias son:

- STA_CODE: código de la estación/del sitio (por ejemplo GSE2.0, este parámetro es a lo más 5 caracteres largos)
- START_TIME: fecha del momento en que se tomó el registro seguida de la hora, minuto y segundo. (Ej. 2007 2 23 10 3 44.78)
- SAMP_FREQ: frecuencia de muestreo en Hertz
- NDAT: número de muestras
- CH0_ID: definición del componente 1 - debe ser el canal vertical. Es una etiqueta. (Por ejemplo, este parámetro es 3 caracteres largos)
- CH1_ID: definición del componente 2 – horizontal
- CH2_ID: definición del componente 3 – horizontal
- UNIDADES: etiqueta (e.g. m/s)

Las palabras claves opcionales son:

- NORTH_ROT: es la orientación del primer componente horizontal (canal 1 - columna 2) del norte a la derecha (en grados)
- GAIN: la salida del sensor puede ser recuperada dividiendo los datos por ganancia

Hay más palabras claves opcionales que no se usaran y por ello no se especifican, en el próximo ejemplo se muestran todas estas.

El archivo debe tener extensión especial y es “*.saf”, por ejemplo: Canchamicho.saf.

El siguiente texto es un ejemplo de archivo de entrada para el Jsesame, este archivo fue tomado de las muestras que se copian en el proceso de instalación. Se puede observar la cantidad de parámetros posibilitados, pero no todos son requeridos y algunos son solo información para referenciar. Las palabras claves que no estas precedidas por “#” son aquellas que se reconocen, si se quiere incluir alguna; solo basta borrar el “#” y registrar el valor correspondiente a la palabra clave.

<<

```

SESAME ASCII data format (saf) v. 1    (this line must not be modified)
# The SESAME ASCII Format can contain an arbitrary number of comment
# lines starting with '#' in the header. Parameters are specified on
# lines starting without # character, followed by a keyword separated
# with a '=' sign from the value of the key. The keyword name can be in
# lower or upper case letters, no distinction is made in the interpretation.
# No empty lines are allowed in the header.
# The first line indicates the name of the file format,
# for automatic format identification tools.
#
# Two compulsory parameters have to be specified
# the sampling rate and the number of points.
#
# All other parameters are optional, but the response and saturation
# information is highly recommended.

```

```

#
# Data begin after this line : "####-----"
# Data are organized in colums in this order : Vertical, Horizontal_1,
# Horizontal_2
# Horizontal_1 generally is N-S, for different orientation parameter
# NORTH_ROT can be set.
# Data can be real or integer
#
#
# sampling frequency in Hertz
SAMP_FREQ = 62.5
# number of samples (integer)
NDAT = 25500
# date and time of the first sample, read as 5 integers, one real
START_TIME=2002 09 29 11 02 08.0
# Sensor type (accelerometer, seismometer)
# SENSOR_TYPE = seismometer
# Sensor serial number (character string)
# SENSOR_ID = B086
# Sensor name (character string)
# SENSOR_NAME = LE3D (L1)
# Response file code (name of the file in the response directory)
# RESPFILE =
# Acquisition system (character string)
# ACQ_SYSTEM = MarsLite
# Digitizer serial number (interpreted as character string)
# DIGITIZER_ID = A026
# saturation value of the digitizer in UNITS
# SATURATION = 0
# conversion factor (count/V)
# CONV_FACTOR = 0.000000
# GAIN = 0
# transduction factor (Volts/m/s or Volts/m/s^2)
# TRANS_FACTOR = 0.000000
# Eigen frequency of the sensor
# SENS_EIGFREQ = 1.000000
# Damping factor of the sensor
# SENS_DAMPING = 0.707000
# Code for the site (exactly 6 characters)
STA_CODE= M037
# Station coordinate type, 0= lat/lon, 1= km of local coordinate,
# elevation is always in km

```

```

# STA_COORD_TYPE = 0
# coordinates are one real number: 45 30' -> 45.5
# STA_X = 0.000000
# STA_Y = 0.000000
# STA_Z = 0.000000
# project name
# PROJECT_NAME = Lagos
# Orientation of Horizontal_1 component from North clockwise (degrees)
# NORTH_ROT=0.000000
# units of the values below in the data (label)
UNITS = mV
#
CH0_ID = V
CH1_ID = EW
CH2_ID = Ns
####-----
0.000067      -0.000319      -0.000164
0.000273      -0.000329      -0.00018
0.000351      -0.000224      -0.000168...
>>

```

Los archivos usados por este estudio fueron resumidos al máximo para facilitar su creación y entendimiento. A continuación se muestra un ejemplo de ellos, en el que se resumieron todos los comentarios y solo se anotaron las palabras claves obligatorias:

```

<<
SESAME ASCII data format (saf) v. 1   (this line must not be modified)
SAMP_FREQ = 305.1833
NDAT = 18311
START_TIME = 2007 01 29 10 00 00.0
STA_CODE= diman
UNITS = mV
#
CH0_ID = V
CH1_ID = EW
CH2_ID = NS
####-----

```

```
0.000073    -0.000042    -0.000094
0.000053    0.000003    -0.00003
0.000017    -0.000034    0.000019
0.000014    -0.000055    -0.000024...
```

>>

5.2.2 Ejecución de Jsesame

La interacción del usuario con JSESAME se puede clasificar como: (1) Organizando la información, (2) procesando la información y (3) exhibiendo los resultados. El interfaz tiene una ventana principal donde el usuario puede crear un nuevo proyecto o cargar un proyecto existente, trazar las señales en la pantalla, realizar la selección automática o manual de las ventanas, aplicar los cálculos espectrales del cociente de H/V y ver todos los resultados en una interfaz de uso fácil. Se acepta el formato de solamente dos datos de las formas de onda: GSE y SAF (formato del Sesame ASCII). La extensión de los ficheros de datos se requiere ser una de estas palabras (GSE o SAF).

5.2.2.1 Configuración del programa

JSESAME tiene varias variables de la configuración que se programarán por el usuario. Para configurar las variables, se despliega el menú del apartado <Config> (figura 39). Los parámetros de la configuración se muestran en cinco cajas de diálogo. Primero la opción para selección manual de la ventana (figura 40), el segundo para configurar la selección automática de la ventana (figura 41), el tercero para el módulo que procesa el H/V (figura 42), el cuarto para los parámetros de los filtros (figura 43) y el último para los parámetros generales de la configuración (figura 44). Se debe tener especial cuidado con la configuración de la selección automática de ventanas y el módulo de procesamiento ya que estos son subprogramas llamados por Jsesame.

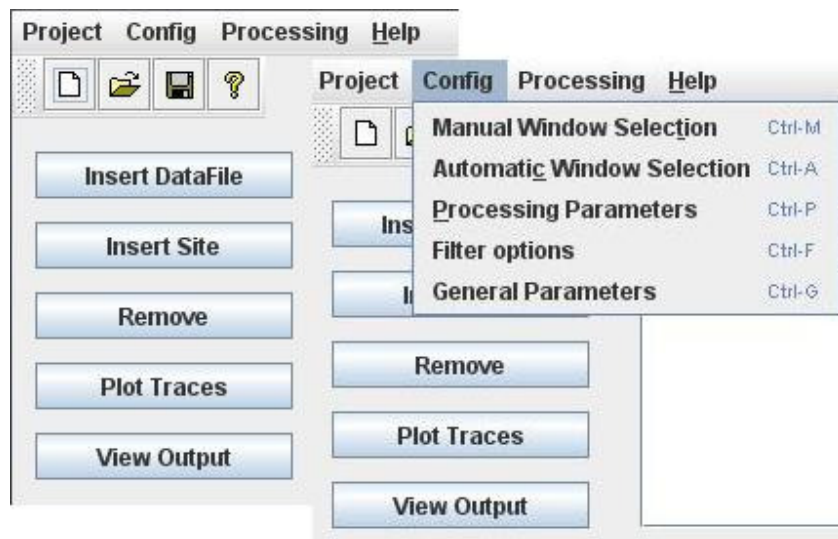


Figura 39. Menú config.

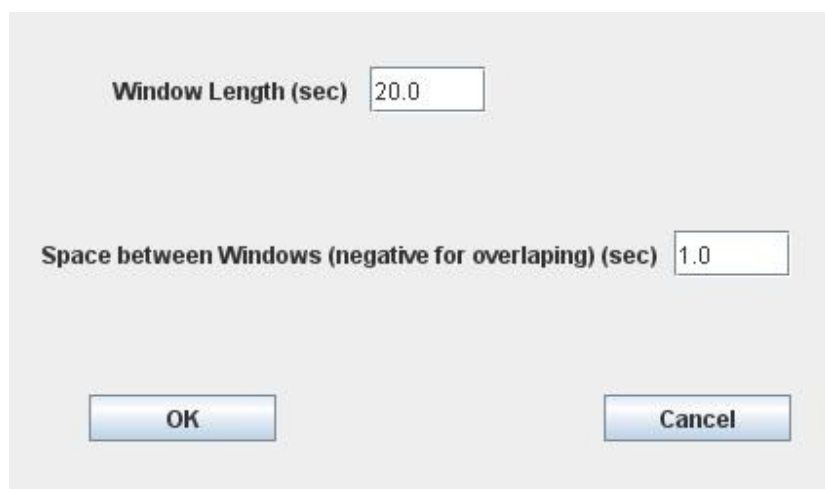


Figura 40. Panel para la configuración manual de la ventana.

| | |
|--|--|
| Window length for the short term (sta) in sec: | <input type="text" value="1.0"/> |
| Window length for the long term (lta) in sec: | <input type="text" value="25.0"/> |
| Minimum level for sta/lta threshold: | <input type="text" value="0.5"/> |
| Maximum level for sta/lta threshold: | <input type="text" value="2.0"/> |
| Window length for selected windows in sec: | <input type="text" value="20.0"/> |
| Overlap percentage for selected windows: | <input type="text" value="10.0"/> |
| Tolerance level for bad points (sec): | <input type="text" value="0.0"/> |
| <input checked="" type="checkbox"/> Saturation check: | <input type="checkbox"/> Removal of very noisy windows: |
| <input type="button" value="OK"/> | <input type="button" value="Cancel"/> |

Figura 41. Panel para la configuración de la selección automática de la ventana.

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| Freq. spacing: | <input type="text" value="fft"/> | <input type="button" value="v"/> |
| Offset removal: | <input type="text" value="r_mean"/> | <input type="button" value="v"/> |
| Tapering: | <input type="text" value="cos"/> | <input type="button" value="v"/> |
| | Perc.: | <input type="text" value="5"/> |
| Smoothing: | <input type="text" value="konno-o..."/> | <input type="button" value="v"/> |
| | Bandwidth: | <input type="text" value="40.0"/> |
| Merging: | <input type="text" value="quadratic"/> | <input type="button" value="v"/> |
| Output single window information: | <input type="text" value="no"/> | <input type="button" value="v"/> |
| <input type="button" value="OK"/> | <input type="button" value="Cancel"/> | |

Figura 42. Módulo que procesa la razón espectral H/V.

High Pass 0.5
 Low Pass 25.0
 Band Pass 0.5 25.0

Figura 43. Configuración de los filtros a usar antes de aplicar la FFT.

Location for Window Selection Program: c:\windowselection\winselection.exe
Location for H/V Processing Module: c:\hvprocess\hvproc0_1.exe
Location for Window Selection Parameters: c:\windowselection\winparameters.inp
Location for H/V Processing Parameters: c:\hvprocess\hvparameters.inp
Location for Window Selection Result: c:\windowselection\winselection.out
Location of datafiles list for Window Selection: c:\windowselection\filelist.inp
Output Directory for H/V results: F:\Resultados Sesame\
Minimum number of windows for a file to be included in the processing: 1
 Show warnings: **Fix the number of windows to process for each file to the minimum**

Figura 44. Configuración de parámetros generales.

5.2.2.2 Crear un nuevo proyecto

Jsesame dispone de una forma para ordenar datos y poder manipularlos fácilmente en un solo archivo general, este haría referencia a todas las muestras tomadas para el mismo estudio. El programa llama a este archivo proyecto. La

estructura del proyecto tiene una forma de árbol (figura 45) donde los ficheros de datos son agrupados por los sitios, cuando varias medidas de ruido se realizan para una sola localización. Los ficheros de datos agrupados en el nodo llamado "Unassigned_files" se tratan independientemente. Esto cuando el usuario tiene solamente un fichero de datos para cada sitio. Cada nodo en el árbol tiene varios parámetros mostrados en el lado derecho del árbol. El "nombre del sitio" y "los parámetros del nombre del archivo de la salida" se pueden modificar por el usuario. Los cambios se aplican después de presionar entrar en teclado. Los nodos del fichero de datos se pueden arrastrar e insertar en otros sitios a través de la estructura arborescente. Para insertar ficheros o sitios nuevos de datos y quitar nodos del proyecto, los usuarios pueden presionar el botón correspondiente mostrado en el sitio izquierdo del árbol (figura 45). La estructura arborescente permite la multi-selección de nodos, que significa que el procesamiento por lotes se puede realizar para varios sitios o ficheros de datos individuales. El proyecto puede ser guardado usando el menú en el apartado <Project> o usando las herramientas de la barra expuestas debajo del menú (figura 45).

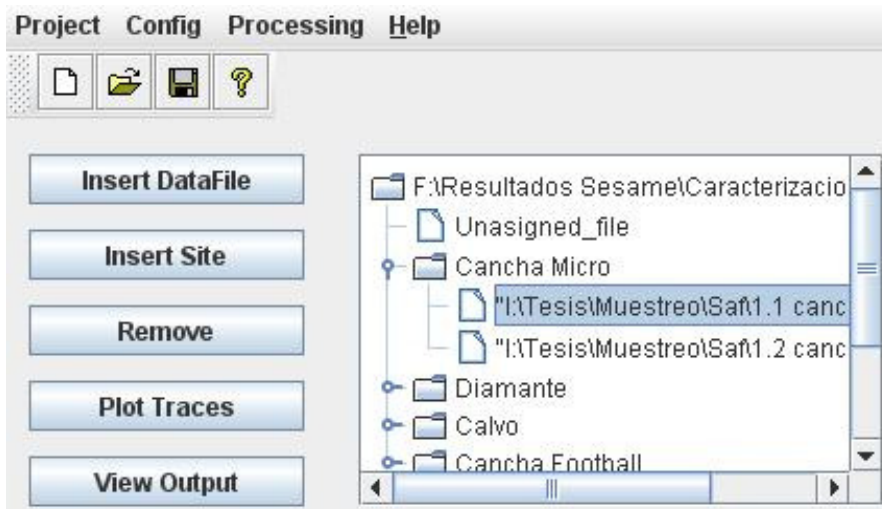


Figura 45. Panel Principal y estructura de los archivos en forma de árbol.

5.2.2.3 Trazar ficheros de datos

El dato-archivo seleccionado puede ser trazado presionando los rastros en el árbol de ficheros y seguido el botón "Plot Traces". Todas las ventanas seleccionadas serán demostradas (figura 47). El zoom de la señal puede ser hecho oprimiendo el botón izquierdo del ratón, arrastrándolo para soltar el botón en el final del periodo seleccionado de la ventana. Oprimir el botón izquierdo del ratón por dondequiera en el diagrama le mostrará de nuevo la imagen original sin enfocar.

5.2.2.4 Seleccionar ventanas

Las ventanas se pueden seleccionar automáticamente o manualmente. La selección manual de la ventana puede ser hecha si la caja de comprobación etiquetada como "Manual Windows Selection" (figura 48) es activada. Se selecciona la ventana usando el mismo procedimiento que la acción de enfoque. Las ventanas individuales pueden ser suprimidas oprimiendo el botón derecho del ratón dos veces: un tecleo para seleccionar la ventana y otro tecleo para la acción de suprimir. La selección automática de la ventana se puede realizar en cuatro diversas maneras (figura 49). La primera opción aplica la selección de ventanas a los rastros originales. La segunda se aplica al rastro filtrado con el filtro seleccionado en la opción en <Config>. La tercera selecciona las ventanas comunes entre la original y los rastros filtrados. La última opción guarda las mismas ventanas seleccionadas del primer archivo para el resto de los archivos seleccionados. Esta opción tiene aplicación cuando se selecciona un grupo de archivos del proyecto.

El objetivo de la selección de ventanas es guardar las partes más inmóviles de vibraciones ambientales, y evitar los transeúntes asociados a menudo a las fuentes específicas (pasos, tráfico cercano). El criterio de selección de ventanas se basa en la comparación entre el parámetro STA (Short Term Average), que es la amplitud de la señal en un período corto de tiempo denominado tsta

(típicamente entre 0.5 y 2.0 seg.) y el parámetro LTA (Long Term Average) que es la amplitud de la señal en un período de tiempo mayor denominado t_{lta} (típicamente entre 20 y 60 seg.). Cuando la razón STA/LTA supera un cierto valor umbral S_{max} , se estima que se está en presencia de un ruido puntual. Mientras la razón STA/LTA no supere S_{max} se estaría en presencia de ruido estacionario.

En el actual caso, se desea seleccionar ventanas sin transeúntes enérgicos: esto significa que quisiéramos que el cociente STA/LTA permaneciera con un valor por debajo de un S_{max} (típicamente alrededor 1.5 - 2) sobre una duración suficientemente larga. Simultáneamente, también deseamos evitar ventanas de vibración ambiental con amplitudes anormalmente bajas: por lo tanto también introducimos un S_{min} , debajo de el cual la señal no debe estar presente durante la ventana seleccionada de la vibración. Por ejemplo, los valores de los parámetros utilizados en este trabajo para la selección automática de ventanas se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de selección de ventanas.

| | |
|-----------|--------|
| Lw | 20 seg |
| S_{max} | 2 |
| S_{min} | 0,5 |
| t_{lta} | 20 seg |
| t_{sta} | 1 seg |

La figura 46 demuestra un ejemplo donde la misma señal se ha procesado con la selección automática de la ventana (que es el retiro transitorio) y la selección manual. Este ejemplo muestra que el pico en la curva de H/V es más explícito cuando se aplica el retiro transitorio, y también que la desviación estándar es más baja, especialmente en las frecuencias bajas.

5.2.2.5 Trazar rastros filtrados

Los datos-archivos seleccionados se pueden filtrar con el filtro elegido anteriormente en la opción del menú <Config> (figura 43) y entonces trazarlos en la pantalla. Esta opción está disponible dentro del menú <Processing> (figura 49). Las ventanas seleccionadas para el dato-archivo trazado originalmente también se muestran. El zoom en los rastros filtrados se puede realizar según lo explicado anteriormente. El filtro utilizado en este estudio es un filtro pasa banda de 0,1 a 10 hz, considerando que este es rango en donde se localizan las ondas de vibración ambiental.

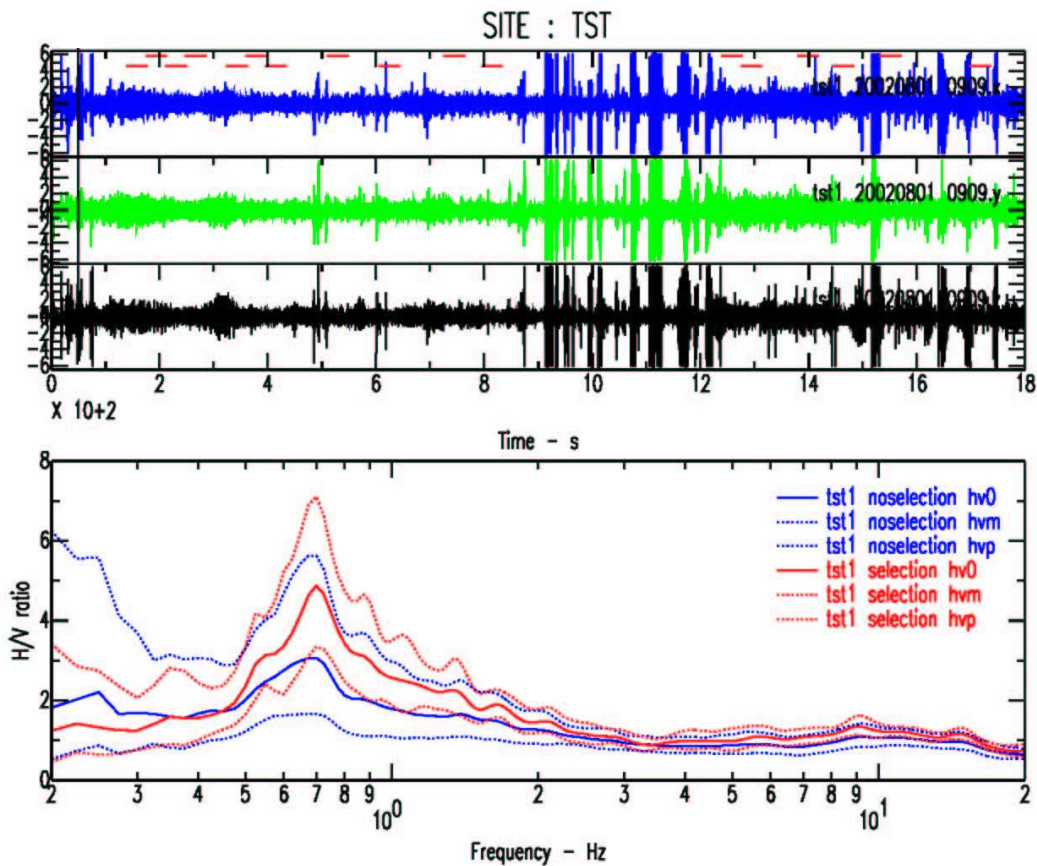


Figura 46. Señal procesada con o sin la selección automática de la ventana.⁶

⁶ El pico en la curva de H/V es mucho mas visible cuando se aplica el retiro transitorio, y también la desviación estándar es más baja, especialmente en las frecuencias bajas. (las ventanas seleccionadas son indicadas por los segmentos rojos en la señal)

5.2.2.6 Computo del cociente espectral de H/V

El módulo de proceso (opción demostrada en la figura 49) se aplica según los nodos seleccionados en el árbol. Si el nodo seleccionado es un sitio, entonces todas las ventanas seleccionadas de los archivos de datos recogidos para este sitio serán utilizadas para computar el cociente espectral medio de H/V. La salida para cada ventana puede también ser obtenida seleccionando la casilla de comprobación "Output single window information" en los parámetros de la configuración del módulo de proceso. El procesamiento por lotes será realizado cuando se seleccionan varios sitios o dato-archivos.

El módulo de procesamiento principal se desarrolla en FORTRAN90. Realiza cálculos espectrales del cociente de H/V y otros procesos asociados, por ejemplo: Corrección de línea base (offset removal), filtrado, Suavizado del espectro (smoothing), combinación de componentes horizontales (merging), arreglo de ventanas (tapering), etc. (figura 49), en las ventanas seleccionadas para los archivos individuales o alternativamente en varios archivos como proceso en grupo. Los pasos principales ejecutados por el código son los siguientes:

1. Lectura de las historias del tiempo de la entrada
2. Retiro compensado o corrección de línea base
3. Filtrado de la señal
4. Para cada ventana seleccionada:
 - a. El Tapering
 - b. FFT
 - c. El suavizado de los espectros de Fourier
 - d. Combinación de componentes horizontales
 - e. Cociente de H/V
 - f. Salida opcional de las ventana H/V y espectros individuales
5. Salida opcional del promedio espectros
6. Promedio de H/V

7. Cómputo de F_0
8. Salida general

Las funcionalidades principales del módulo de proceso se describen en el capítulo 3 del documento al que fue anexado este manual.

5.2.2.7 Ver resultados del Jsesame

Presionando <View Output> (figura 47) es posible navegar a través de tres cajas de diálogo. La primera caja de diálogo muestra a H/V el cociente espectral de los componentes horizontales combinados. La segunda caja de diálogo muestra a H/V el cociente espectral para cada uno de los componentes del NS y del EW. La tercera caja muestra el cociente espectral del H/V combinado, de los componentes horizontales NS y EW en una misma gráfica, y de los espectros de frecuencia de los tres canales NS, EW y V.

La acción de enfoque se puede hacer sobre el espectro usando el mismo procedimiento ya explicado. Los valores individuales del espectro pueden ser mostrados chascando el botón medio del ratón sobre la curva espectral. Sin embargo, estas dos funcionalidades trabajan solamente cuando los espectros se representan en una escala lineal. Para este trabajo no se usaron estos resultados gráficos, los resultados también son almacenados en la carpeta de salida configurada en los parámetros generales en archivos de datos y se emplearon hojas de cálculo para graficar y manipular los datos resultantes.

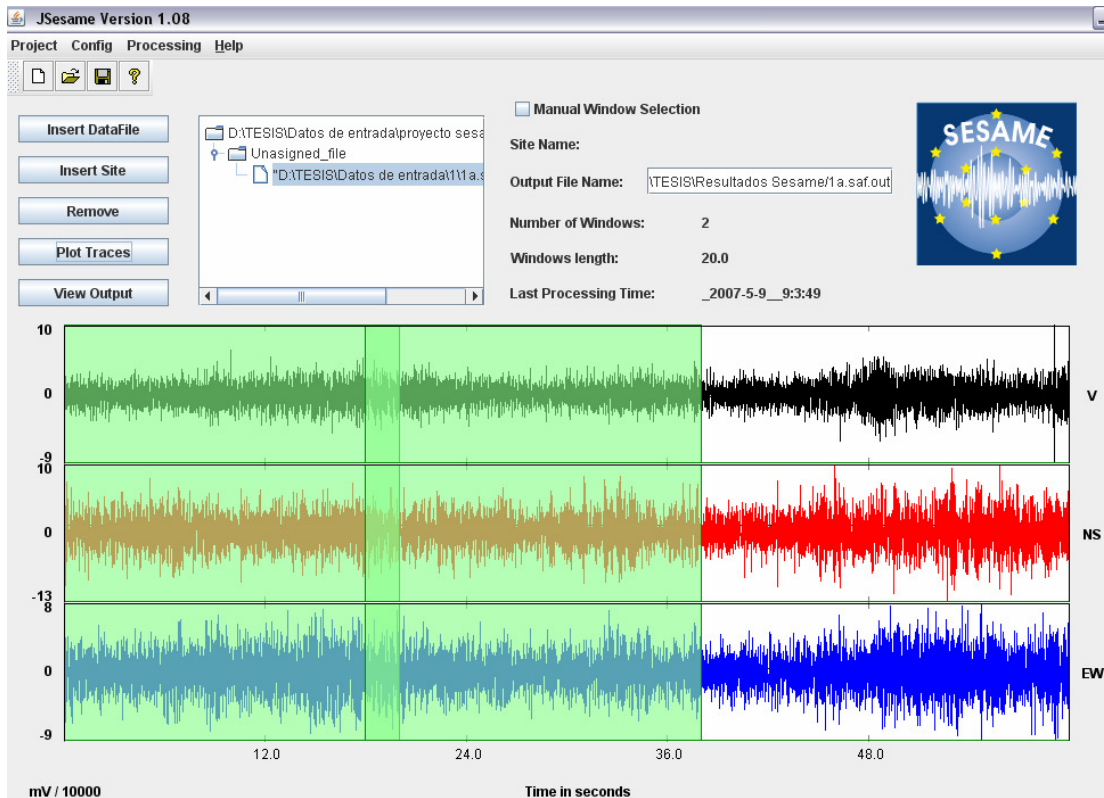


Figura 47. Panel principal y señales graficadas.

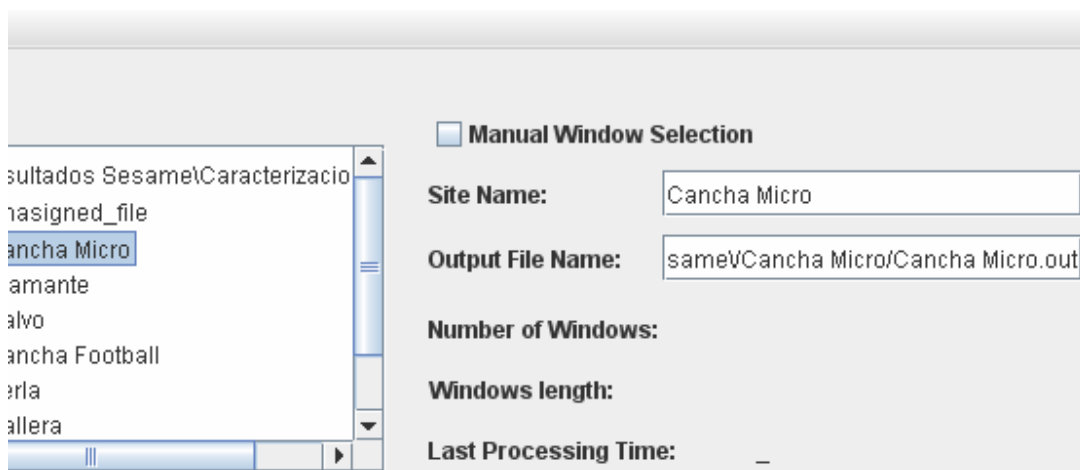


Figura 48. Ubicación de la caja de comprobación "Manual Windows Selection"

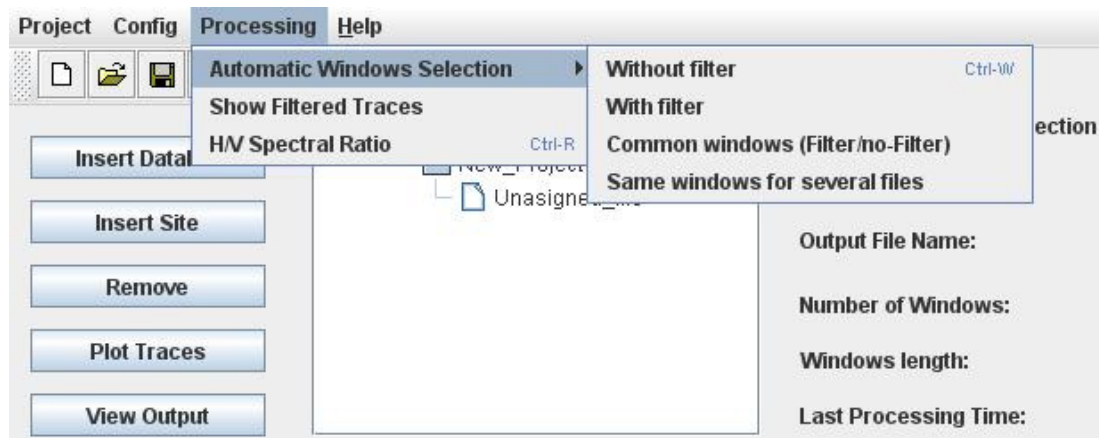


Figura 49. Opciones para la selección automática de ventanas.

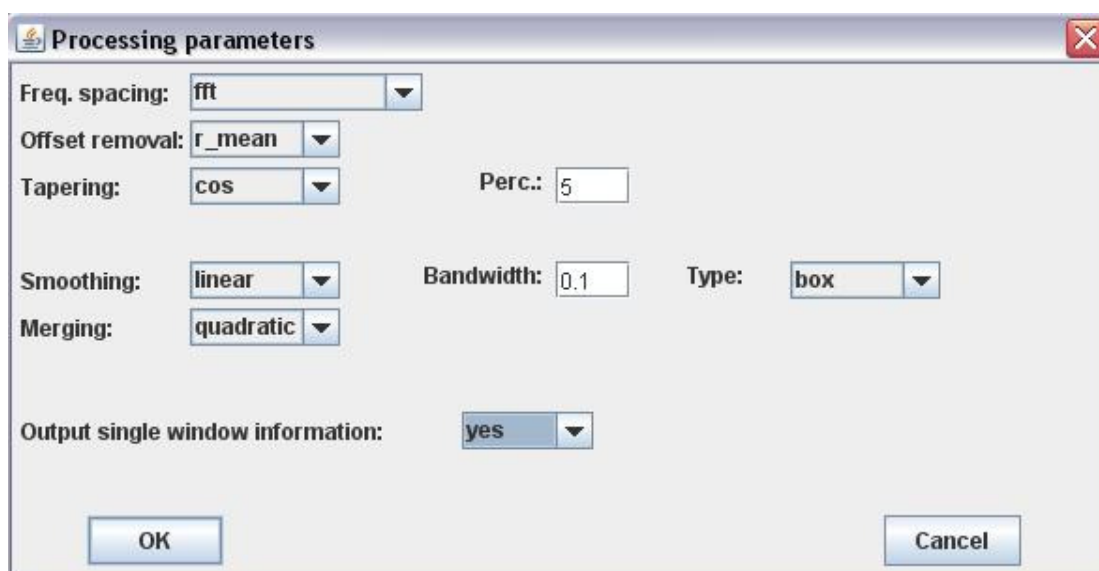


Figura 50. Configuración de parámetros para el cálculo de la razón espectral H/V.

El software J-SESAME es proporcionado gratuitamente para propósitos científicos. No se proporciona ninguna garantía de la exactitud y la confiabilidad del software. Las conclusiones generadas, o las acciones emprendidas en base a este software son responsabilidad única del usuario.

¡No se permite ningún uso comercial del software original y de todos los textos relacionados!

ANEXO B: USO DE LA HOJA DE CÁLCULO EERA

EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis) es una moderna implementación del concepto lineal equivalente para análisis de respuesta de sitio, que fue previamente fundada en la original y subsecuente versión de SHAKE (Schnabel et al., 1972; and Idriss and Sun, 1991).

La Figura 51 define cuatro términos usados en el análisis de la respuesta de sitio. La “free surface motion” es el movimiento en la superficie del deposito de suelo. El “bedrock motion” el movimiento en la base del deposito de suelo. El “rock outcropping motion” es el movimiento en una localización donde el basamiento rocoso es expuesto en la superficie.

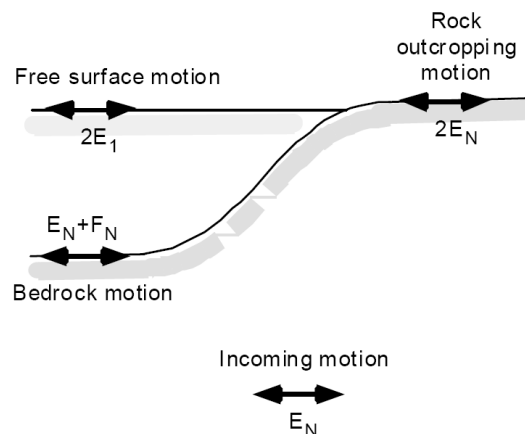


Figura 51. Terminología usada en el análisis de respuesta de sitio.

Requerimientos del Sistema, Distribución de Archivos y Descarga de EERA

EERA requiere Windows 95/98/NT y EXCEL 97 o superiores. EERA no trabaja para otros sistemas operativos. Todos los archivos requeridos por EERA pueden

ser descargados de <http://geoinfo.usc.edu/gees> en un archivo comprimido en zip llamado EERA.zip, que contiene los siguientes archivos:

- EERA.xla (389 kB), Microsoft Excel Add-in
- EERAM.xls (4627 kB), archivo de inicio (metric units)
- EERA.xls (3988kB), archivo de inicio (British units)
- EERA.dll (97kB), link de la librería dinámica de EERA
- Diam.acc (21kB), archivo de ejemplo de las aceleraciones del terremoto de entrada

Instalación y Remoción de EERA

Es recomendado para la instalación de EERA en su computador lo siguiente:

1. Copie los archivos distribuidos en un Nuevo directorio en su disco duro.
2. Mueva EERA.dll y EERA.xla en el mismo directorio de su elección. Este es un paso clave ya que estos no podrán ser movidos después.
3. En EXCEL, instale el Add-in EERA.xla. usando el menú herramientas y complementos... como se muestra en la Figura 52, use la opción examinar para localizar el archivo EERA.xla. No mueva EERA.xla después de instalado.
4. Cuando EERA este propiamente instalado, el menú de EERA podrá ser localizado a la derecha de los menús desplegables de EXCEL (Figura 53).

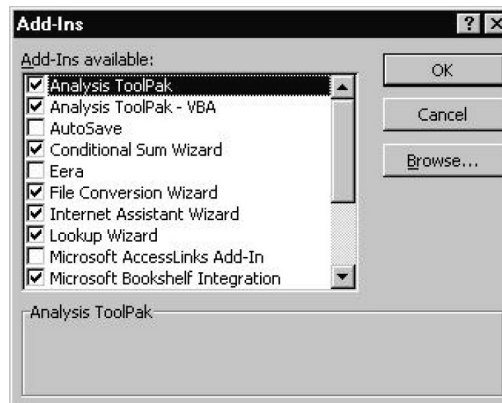


Figura 52. Menú de complementos de EXCEL.

EERA puede ser desinstalado por el uso del comando “Remove EERA” en el menú desplegable EERA.

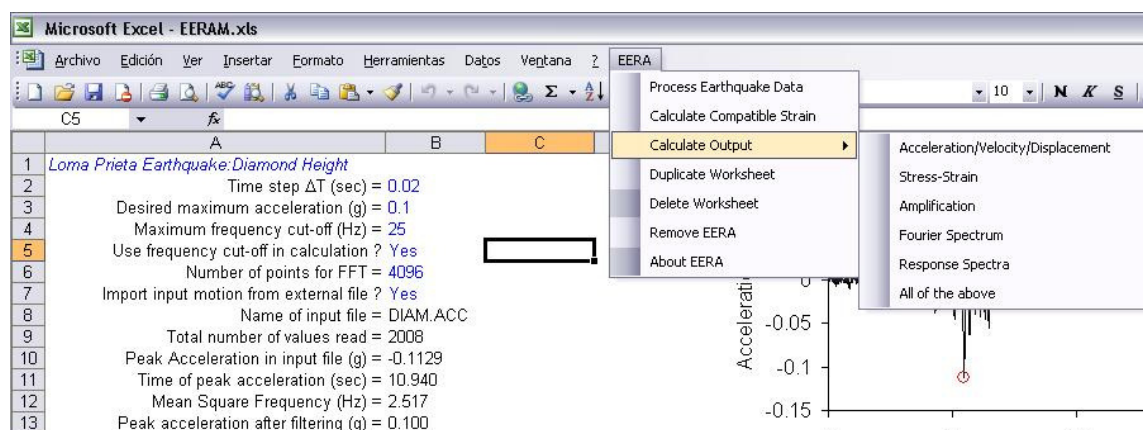


Figura 53. Menú desplegable de EERA.⁷

Contenido General

El programa EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses) está integrado en microsoft Excel y aparece en el menú principal al lado del item Help (Figura 53). Consta de los siguientes comandos:

1. Process Earthquake Data
2. Calculate Compatible Strain
 - Acceleration/Velocity/Displacement
 - Stress/Strain
 - Amplification
 - Fourier Spectrum
 - Response Spectrum
 - All of the above
3. Calculate Output
4. Duplicate Worksheet

⁷ Después de la instalación satisfactoria de EERA, su menú aparece en los menús desplegables.

5. Delete Worksheet
6. Remove EERA
7. About EERA

Este programa esta formado por una serie de hojas de cálculo que son llamadas según sus contenidos, y se señalan a continuación:

1. Earthquake
2. Profile
3. Mat i
4. Iteration
5. Acceleration
6. Strain
7. Ampli
8. Fourier
9. Spectra

Comandos de EERA

Process Earthquake Data: Lee y procesa el movimiento de entrada o terremoto. Esta información se encuentra en la pestaña Earthquake, pero también puede importarse de un archivo externo.

Calculate Compatible Strain: Lee la información contenida en la pestaña *Profile* y *Mat i* y ejecuta el cálculo iterativo que está en la pestaña *Iteration*.

Calculate Output: Calcula los siguientes resultados:

Acceleration/Velocity/Displacement: Calcula la historia de aceleraciones, velocidades relativas y desplazamientos en el techo de los estratos seleccionados. Se muestran los resultados en la pestaña *Acceleration*.

Stress/Strain: Calcula el estado tensional y la deformación en el medio de los estratos seleccionados. Se muestran los resultados en la pestaña *Strain*.

Amplification: Calcula los factores de amplificación entre dos estratos. Se muestran los resultados en la pestaña *Amplification*.

Fourier Spectrum: Calcula el espectro de amplitudes de Fourier en el techo del estrato seleccionado. Se muestran los resultados en la pestaña *Fourier*.

Response Spectrum: Calcula todos los espectros de respuesta en el techo de los estratos seleccionados. Se muestran los resultados en la pestaña *Spectra*.

All of the above: Calcula todos los resultados anteriores en un solo paso.

Duplicate Worksheet: Duplica la pestaña seleccionada por si se requiere definir nuevas curvas de material y añadir resultados nuevos. No se pueden duplicar las hojas *Earthquake*, *Profile* e *Iteration*.

Delete Worksheet: Borra la pestaña seleccionada y creada por el usuario.

Remove EERA: Desinstala el programa EERA de EXCEL.

About EERA: Muestra el número de la versión de EERA

Hojas de EERA

Las celdas que aparecen en las distintas hojas del programa con caracteres azules se pueden modificar por el usuario.

Earthquake: Esta hoja se utiliza para definir el movimiento o sacudida de entrada. A continuación se indica la información que contienen las celdas:

- Celda A1: nombre del terremoto (opcional).
- Celda B2: paso de tiempo ΔT que es el intervalo de tiempo entre dos puntos equiespaciados en el movimiento de entrada. Este se verá reflejado en los resultados de la hoja *Acceleration* en la columna A.
- Celda B3: máxima frecuencia deseada. Se utiliza para escalar la amplitud de pico de la aceleración de entrada.
- Celda B4: f_{max} es un valor que se puede utilizar para filtrar las altas frecuencias de la aceleración de entrada.
- Celda B5: Yes indica que se muestran todas las frecuencias entre 0 y f_{max} .
- Celda B6: Número de puntos que se utiliza para el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Este valor m debe ser mayor que el número de puntos n que aparecen en la entrada *Acceleration*.
- Celda B7: Si se indica Yes la entrada *Acceleration* se lee desde un archivo externo.

Profile: En esta hoja se define la geometría y las propiedades de la columna litológica. A continuación se indica la información que contienen las celdas:

- Celda A1: Nombre de la columna litológica (opcional).
- Celda C6: Tipo de material para cada estrato. Cada material i se define en una hoja *Mat i*.
- Celda D6: Permite subdividir cada capa en varios estratos. Esta característica es interesante para cálculos muy precisos.
- Celda E6: Se indica espesor en metros para cada estrato.
- Celda F6: Se puede indicar el valor del módulo de corte para pequeñas deformaciones. Si esta celda se deja en blanco, el programa calcula este valor a partir de la velocidad de las ondas sísmicas de cizalla (celda I6).

- Celda G6: Se indica el valor inicial del amortiguamiento crítico, es 1 sólo cuando el tipo de material es $i = 0$.
- Celda H6: Se indica el peso específico total para cada estrato en kN/m³.
- Celda I6: Velocidad de las ondas sísmicas de cizalla en m/s. Si esta celda se deja en blanco entonces el programa calcula el valor de Gmax en la celda F6.
- Celda J6: Localización y tipo de sacudida. Se indicará Outcrop o Inside.
- Celda K6: Profundidad del nivel freático en metros si se desea calcular las tensiones iniciales verticales efectivas (opcional).
- Celda E3: Calcula el valor de la velocidad sísmica de cizalla media de la columna litológica, según:

$$V = \frac{1}{\sum_{i=1}^N h_i} \sum_{i=1}^N h_i v_i$$

Donde h_i y v_i son la potencia y la velocidad sísmica de cizalla para cada estrato, respectivamente y N es el número total de estratos.

- Celda E2: Calcula el período fundamental T de la columna litológica, según:

$$T = \frac{4H}{V}$$

Donde H es la potencia total de la columna litológica y V es el valor calculado en la celda E3.

Mat i: Con esta hoja se definen las relaciones deformación vs módulo de corte y deformación vs razón de amortiguamiento para un determinado material i ($i = 0$ corresponde a un sustrato rocoso, $i = 1$ corresponde a una arcilla, $i = 2$ es una arena e $i = 3$ es una roca blanda, estos son valores iniciales por defecto de la hoja, pero pueden ser modificados). Estas relaciones se pueden comprobar mediante el gráfico que aparece al lado de los datos

A continuación se indica la información que contienen las celdas:

- Celda A1: Tipo de material (opcional).
- Celda A3: Valores de deformación en %.
- Celda B3: Razón G/G_{max} correspondiente a los valores de deformación especificados en la celda A3.
- Celda C3: Valores de deformación en %.
- Celda D3: Razón de amortiguamiento crítico correspondiente a los valores de deformación especificados en la celda C3.

Iteration: En esta hoja se realizan los cálculos y consta de las siguientes entradas:

- Celda E1: Se especifica el número de iteraciones. Normalmente con ocho iteraciones se alcanza convergencia satisfactoriamente.
- Celda E2: Se especifica la razón de deformación uniforme equivalente, R_y que se utiliza para multiplicar a la deformación de corte máxima y así obtener la deformación de corte efectiva. Este valor varía de 0.4 a 0.75 en función del movimiento de entrada y de la magnitud del terremoto que quiere representar según la ecuación 3.R. A partir de la deformación de corte efectiva se calcula la razón de amortiguamiento y el módulo de corte.
- Celda E3: Se selecciona el tipo de modelo equivalente lineal. La opción 1 corresponde al modelo del programa SHAKE original y la opción 2 al modelo del SHAKE91.

Acceleration: Esta hoja define la historia temporal de aceleración, velocidad y desplazamiento relativo del estrato seleccionado. Consta de las siguientes entradas:

- Celda D1: se selecciona el número del estrato.
- Celda D2: se selecciona el tipo de estrato por medio de outcrop o inside.

Strain: Esta hoja define la historia temporal de tensiones, deformaciones, energía disipada y curvas tensión-deformación del estrato seleccionado. Consta de la siguiente entrada:

Celda D1: Se especifica el número del estrato seleccionado.

Ampli: Esta hoja define el factor de amplificación entre dos estratos. Contiene las siguientes entradas:

- Celda D1: Número del primer estrato.
- Celda D2: Tipo del primer estrato (Outcrop/Inside).
- Celda D3: Número del segundo estrato.
- Celda D4: Tipo del segundo estrato (Outcrop/Inside).
- Celda D5: Máxima amplificación.
- Celda D6: Frecuencia asociada a la máxima amplificación, en hercios.

Fourier: Esta hoja define el espectro de Fourier para el estrato seleccionado. Contiene las siguientes entradas:

- Celda D1: Número del estrato seleccionado.
- Celda D2: Tipo del primer estrato.
- Celda D3: Número de veces que el espectro de Fourier se ha de suavizar aplicando una media.

Spectra: Esta hoja define el espectro de respuesta para el estrato seleccionado. Contiene las siguientes entradas:

- Celda D1: Número del estrato.
- Celda D2: Tipo de movimiento en el primer estrato.

- Celda D3: Valor seleccionado para la razón de amortiguamiento crítica para el espectro de respuesta.

Por último, para la ejecución del programa EERA se realizan los siguientes pasos:

1. Process Earthquake Data
2. Calculate Compatible Strain
3. Calculate Output

La comparación de resultados de EERA y de SHAKE: Los resultados de EERA y de SHAKE91 son encontrados prácticamente iguales. Las Figuras 54 y 55 muestran la diferencia relativa en resultados de EERA con respecto a los de SHAKE91, incluyendo la tensión máxima del esquiileo, la aceleración máxima y la aceleración espectral.

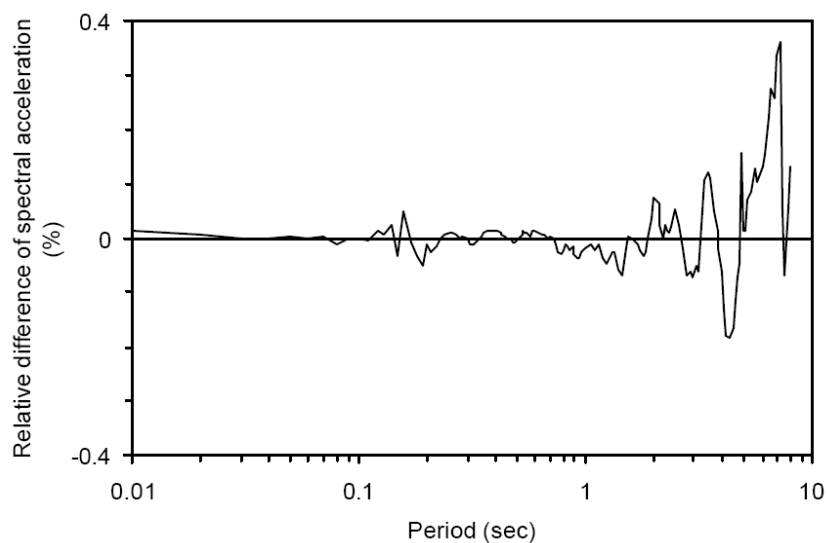


Figura 54. Diferencia relativa de la aceleración calculada por EERA and SHAKE91.

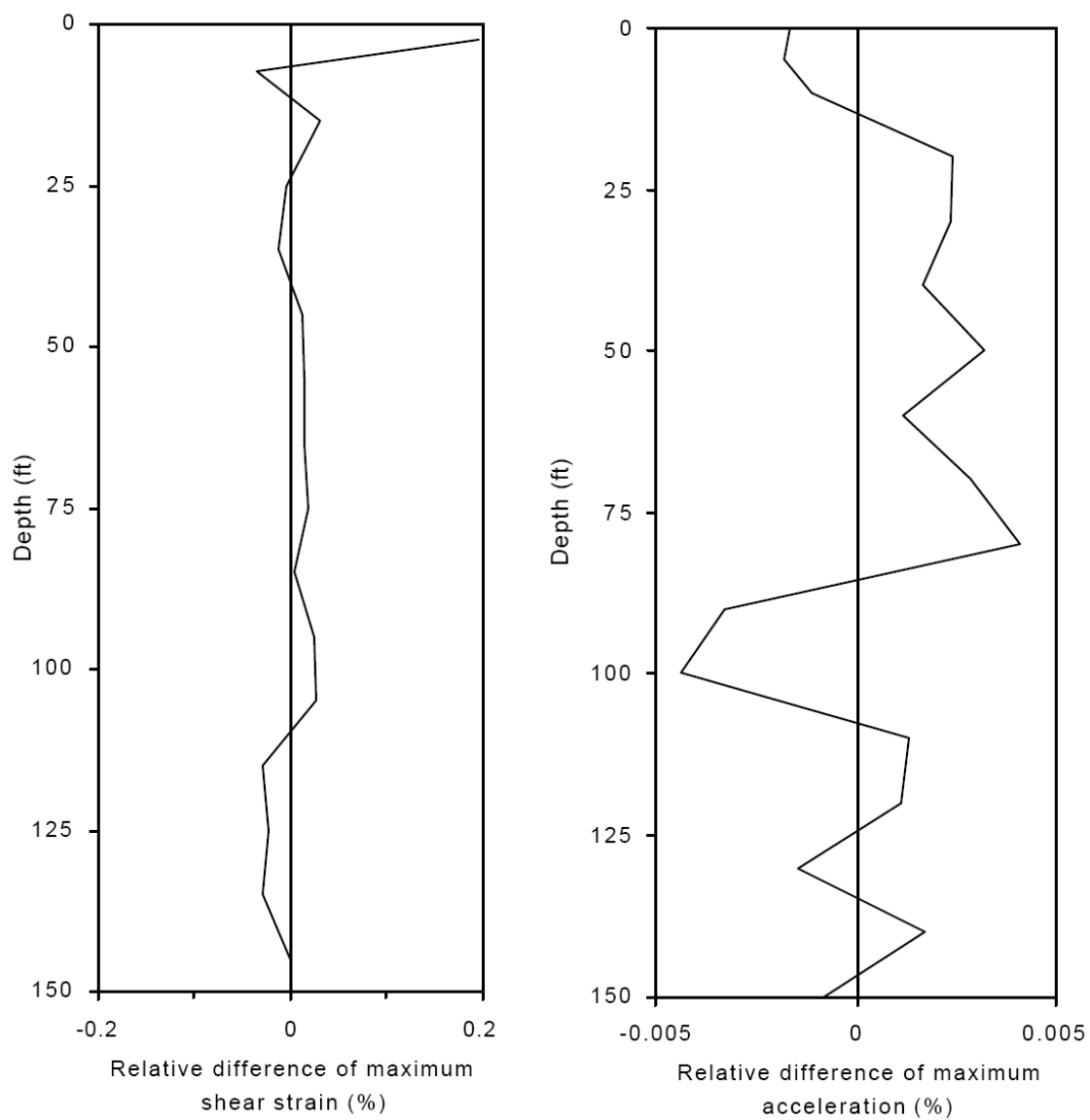


Figura 55. Diferencia relativa del esfuerzo cortante máximo y la máxima aceleración entre SHAKE91 y EERA.

ANEXO C: TABLAS RESUMEN DE LOS ESTUDIOS CONSULTADOS

Se presenta en tablas información recopilada de la bibliografía consultada en este estudio. Estas contienen objetivos generales, parámetros de adquisición de datos, equipo empleado y referenciación de los estudios que emplearon el software Jsesame o SHAKE91.

OBJETIVOS PROPUESTOS EN OTROS ESTUDIOS.

| Proyecto | Objetivo | Referenciación |
|--|--|---------------------------|
| Reporte de un enjambre sísmico de febrero-Abril de 2004, en la bahía de la paz, baja California sur, México. | Observar si hay presencia de amplificaciones en el depósito de suelo de la bahía de La Paz, baja California. | M. González, et al. 2004 |
| USO DE LA RAZÓN ESPECTRAL H/V EN SUPERFICIE PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO | Determinar los periodos fundamentales y generar el mapa de isoperiodos de la ciudad de Santiago de Chile. | R. Verdugo, et al. 2005 |
| MEASUREMENTS OF MICROTREMORS IN BARCELONA: A TOOL FOR SEISMIC MICROZONATION | Determinar periodos fundamentales y Factor de amplificación de los depósitos de suelo en Barcelona con medición de microtemblores. | A. Alfaro, et al. 1997 |
| APORTES PARA LA MICROZONIFICACION SÍSMICA DE IBAGUÉ | Definir la función de transferencia del suelo de Ibagué por medio de modelación numérica. | A. Alfaro, et al. 2001 |
| APPLICABILITY OF THE H/V SPECTRAL RATIO OF MICROTREMORS IN ASSESSING SITE EFFECTS ON SEISMIC MOTION | Examinar la validez del método de las razones espectrales de Nakamura para evaluar la función de transferencia en la ciudad de Yokohama. | V. Rodríguez, et al. 2002 |
| COMPARISON BETWEEN DIFERENT TECHNIQUES FOR EVALUATION OF PREDOMINANT PERIODS USING STRONG GROUND MOTION RECORDS AND MICROTREMORS IN PEREIRA COLOMBIA | Comparar diferentes técnicas para la evaluación de periodos predominantes en suelos de Pereira Colombia | A. Ojeda ey al. 2000 |

| | | |
|---|---|--------------------------|
| CARACTERIZACION GEOFISICA DE LA CUENCA PULL-APART DE CABUDARE, NOROCCIDENTE DE VENEZUELA | Caracterizar geofísicamente la cuenca de Pull-Apart de Cabudare, Venezuela. Incluye medición de vibraciones ambientales. | J. Nobile. 2005 |
| Caracterización de suelos de Barquisimeto -estado Lara, Venezuela-, aplicando métodos geofísicos y geotécnico | Caracterizar el depósito de suelos de Barquisimeto, Venezuela. Empleando métodos geofísicos y geotécnicos. | V. Rocabado, et al. 2005 |
| LOCAL SITE EFFECT OF KOBE BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT | Determinar el efecto de sitio local de Kobe Japón, basado en medición de microtremors. | Y. Nakamura, et al. 2002 |
| MICROTREMOR OBSERVATIONS OF DEEP SEDIMENT RESONANCE IN METROPOLITAN MEMPHIS, TENNESSEE | Evaluar la frecuencia de resonancia del depósito de suelo en el área metropolitana de Memphis, Tennessee. | P. Bodin, et al. 2000 |
| Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores | Determinar los periodos fundamentales de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso con el uso de la técnica de Nakamura y microtemblores. | O. Rincón. 2005 |
| Site Period Estimations Using Microtremor Measurements- Experimental and Analytical Studies in British Columbia | Conocer los valores de periodo fundamental de la zona por medio de los microtremores y compararlos con modelos lineales. | C. Ventura, et al. 2006 |
| SITE EFFECT ASSESSMENT AT SMALL SCALES IN URBAN AREAS: A TOOL FOR PREPAREDNESS AND MITIGATION | Determinar la eficacia del análisis de microtremores medidos en superficie para definir la respuesta de sitio y el periodo fundamental para aplicarlos en la microzonificación de Montreal, Canadá. | P. Rosset. 2002 |
| Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes | Complementar estudios geológicos de caracterización sísmica con HVSr y medición de microtemblores. | A. Gosar. 2007 |
| SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELOS DEL ÁREA DE CAÑAVERALEJO, CALI, COLOMBIA | Resolver el problema del uso de técnicas directas puntuales mediante aplicaciones de metodologías de evaluación histórica geológica y la aplicación de técnicas indirectas. | C. Isabel. 2001 |
| Microzonificación de Quito (Ecuador) | Realizar los estudios de comportamiento del suelo ante movimientos sísmicos dentro de los límites de Quito, capital del Ecuador utilizando ruido ambiental y movimientos fuertes. | P. Guéguen. 1997 |
| ZONIFICACIÓN SISMOGEO TÉCNICA INDICATIVA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA | Definir parámetros iniciales para el diseño y construcción sísmo resistente de acuerdo con la respuesta sísmica local del subsuelo. Caracterización dinámica del subsuelo. | Ingeominas. 2001 |

EQUIPO UTILIZADO EN OTROS ESTUDIOS.

| Proyecto | Equipo | Referenciación |
|--|---|--------------------------|
| ZONIFICACIÓN SISMOGEOTÉCNICA INDICATIVA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA | Acelerómetro Kinematics modelo ETNA con tres sensores FBA 23 triaxiales con rango dinámico de 108 dB y 24 bits de resolución. | Ingeominas. 2001 |
| Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment; the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece) | Digitalizador Cityshark de 24 bits con un sensor de velocidad Lennartz 3D/5s | A. Panou, et al. 2005 |
| MEASUREMENTS OF MICROTREMORS IN BARCELONA: A TOOL FOR SEISMIC MICROZONATION | Kinematics K2, acelerómetro interno con frecuencia natural de 50 Hz. | A. Alfaro, et al. 1997 |
| Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes | Sismógrafo Tromino (Micromed) | Andrej Gosar. 2007 |
| Site Period Estimations Using Microtremor Measurements- Experimental and Analytical Studies in British Columbia | Transductor de Velocidad con periodo de 1 seg. | C. Ventura, et al. 2006 |
| SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELOS DEL ÁREA DE CAÑAVERALEJO, CALI, COLOMBIA | Sensor de velocidad Mark Products, Modelo L4C-3D. Digitalizador Nanometrics modelo: RD3, 1989. | C. Rosales. 2001 |
| On the use of microtremor recordings in seismic microzonation | Digitalizador Lennartz Mars88 conectado a un acelerómetro triaxial Güralp CMG-5T . | M. Bour. 1998 |
| CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CON MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA GUAIRA, MACUTO, CARABALLEDA Y TANAGUARENA, ESTADO VARGAS, VENEZUELA | Nanometrics modelo Orion-3S y un sensor Güralp modelo CMG-T40-0008 | M. Romero, et al. 2006 |
| Reporte de un enjambre sísmico de febrero-Abril de 2004, en la bahía de la paz, Baja California Sur, México. | Kinematics Altus K2 con acelerómetros internos de tipo FBA-23 y Acelerómetros Episensor adicionales de frecuencia natural de 50 y 200 Hz. | M. González, et al. 2004 |
| Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores | Acelerómetro (no indica marca y tipo) | O. Rincón. 2005 |
| MICROTREMOR OBSERVATIONS OF DEEP SEDIMENT RESONANCE IN METROPOLITAN MEMPHIS, TENNESSEE | Sismómetro Güralp CMG-40TD de 3-componentes. | Paul Bodin, et al. 2000 |
| Microzonificación de Quito (Ecuador) | Sismómetro de 3 componentes L4-3D Mark Products (Fo = 1 Hz). | P. Guéguen. 1997 |
| USO DE LA RAZÓN ESPECTRAL H/V EN SUPERFICIE PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO | Sismómetro Lennartz de tres componentes con periodo natural de 5 segundos y un digitalizador marca CityShark. | R. Verdugo, et al. 2005 |

| | | |
|---|---|-------------------------|
| Caracterización de suelos de Barquisimeto -estado Lara, Venezuela-, aplicando métodos geofísicos y geotécnico | sismógrafo portátil Orion-Nanometrics y un sensor Güralp de 3 componentes | V. Rocabado, et al 2005 |
|---|---|-------------------------|

PARÁMETROS DE MEDICIÓN EMPLEADOS EN OTROS ESTUDIOS.

| Proyecto | Longitud de Medición (Minutos) | Densidad de las Muestras (Muestras/Km2) | Frecuencia de Muestreo (muestras/seg) | Uso de Software | Referencia |
|--|--------------------------------|---|---------------------------------------|------------------|--------------------------|
| Reporte de un enjambre sísmico de febrero-Abril de 2004, en la bahía de la paz, baja California sur, México. | - | - | 200 | - | M. González, et al. 2004 |
| USO DE LA RAZÓN ESPECTRAL H/V EN SUPERFICIE PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO | 15 | 0,11 | 125 | Jsesame | R. Verdugo, et al. 2005 |
| MEASUREMENTS OF MICROTREMORS IN BARCELONA: A TOOL FOR SEISMIC MICROZONATION | 3 | 0,11 | 100 | - | A. Alfaro, et al. 1997 |
| Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment; the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece) | 20 | 83 | 100 | Jsesame | A. Panou, et al. 2005 |
| On the use of microtremor recordings in seismic microzonation | 10 | 2,28 | 100 | Jsesame, Shake91 | M. Bour, et al. 1998 |
| CARACTERIZACION GEOFISICA DE LA CUENCA PULL-APART DE CABUDARE, NOROCCIDENTE DE VENEZUELA | 10 | 3,92 | 100 | Jsesame | J. Nobile. 2005 |
| Caracterización de suelos de Barquisimeto -estado Lara, Venezuela-, aplicando métodos geofísicos y geotécnico | 5 | 4 | 100 | - | V. Rocabado, et al. 2005 |

| | | | | | |
|---|------|-------|-----|---------|--------------------------|
| LOCAL SITE EFFECT OF KOBE BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT | 0,68 | 25 | 100 | - | Y. Nakamura, et al. 2002 |
| MICROTREMOR OBSERVATIONS OF DEEP SEDIMENT RESONANCE IN METROPOLITAN MEMPHIS, TENNESSEE | 15 | 0,17 | 100 | - | P. Bodin, et al. 2000 |
| Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores | 3 | - | - | - | O. Rincón. 2005 |
| Site Period Estimations Using Microtremor Measurements- Experimental and Analytical Studies in British Columbia | 30 | 1 | 100 | Shake | C. Ventura, et al. 2006 |
| SITE EFFECT ASSESSMENT AT SMALL SCALES IN URBAN AREAS: A TOOL FOR PREPAREDNESS AND MITIGATION | 15 | 17,5 | 100 | - | P. Rosset, et al. 2002 |
| Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes | 20 | 17,71 | 100 | Jsesame | A. Gosar. 2007 |
| SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELOS DEL ÁREA DE CAÑAVERALEJO, CALI, COLOMBIA | 10 | 0,3 | 25 | - | C. Rosales. 2001 |
| Microzonificación de Quito (Ecuador) | 2 | 2,32 | 50 | - | P. Guéguen. 1997 |
| ZONIFICACIÓN SISMOGEO TÉCNICA INDICATIVA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA | 1 | - | 200 | - | Ingeominas. 2001 |