

**CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO UTILIZANDO EL MÉTODO GEOFÍSICO  
DE REFRACCIÓN POR MICROTREMORES ReMi PARA SEGMENTO DE LA  
AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLIVAR**

**JESSICA PAOLA PULIDO VÁSQUEZ  
MARIA DANIELA RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA  
BOGOTÁ  
2015**

**CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO UTILIZANDO EL MÉTODO GEOFÍSICO  
DE REFRACCIÓN POR MICROTREMORES ReMi PARA SEGMENTO DE LA  
AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLIVAR**

**JESSICA PAOLA PULIDO VÁSQUEZ  
MARIA DANIELA RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**

**Proyecto de Grado**

**Andrés Cárdenas Contreras  
Magister en Ciencias – Geofísica**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA  
BOGOTÁ  
2015**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 29 de Septiembre de 2015

*A nuestras familias, que siempre nos han apoyado.*

Para la realización de este trabajo de grado damos las gracias al profesor y director Andrés Cárdenas, Magister en ciencias, quien nos asesoró y nos contactó con Subsuelo 3D.

A la empresa Subsuelo 3D liderada por Germán Yury Ojeda Bueno - Doctor en Geociencias, damos gracias por la disposición de los equipos de práctica y el software necesario para la adquisición y la interpretación de la información adquirida y ante todo, por brindarnos su conocimiento y el de todo su equipo de trabajo. A Oscar Arrubla - Geólogo, por su ayuda en la interpretación geológica de los datos y en el manejo del software. A Héctor Fabio Giraldo - Ingeniero Electrónico, Mariano Carreño León - Ingeniero Electrónico y demás por su ayuda en el alistamiento de los equipos, en la captura de los datos y en el pre-procesamiento de la información obtenida.

Al Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD), en especial al funcionario Darío Riveros Anzola - Arquitecto, por brindarnos la información requerida para la interpretación de la información del Parque Central Simón Bolívar.

A John Camilo Matiz - Ingeniero Catastral y Geodesta por su ayuda en el manejo del software Voxler.

A todos nuestros compañeros de estudio, Ana Lorena Barrueto, Henry Esteban Toledo, Jorge Alexander Castro y José Ricardo Castillo, estudiantes de Ingeniería Catastral y Geodesia, por su apoyo en el trabajo de campo en la adquisición de datos de la Avenida Circunvalar.

## CONTENIDO

pag.

INTRODUCCIÓN .....	18
CAPITULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 General.....	19
1.2.2 Específicos .....	19
1.3 ANTECEDENTES .....	19
1.3.1 Antecedentes en Colombia.....	20
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	21
1.5 JUSTIFICACION.....	22
1.6 ALCANCE DEL PROYECTO .....	23
CAPITULO 2. ZONA DE ESTUDIO.....	24
2.1 LOCALIZACION.....	24
2.2 GEOLOGÍA .....	26
2.2.1 Geología Regional .....	26
2.2.2 Geología local .....	28
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.....	34
3.1 ONDAS SÍSMICAS .....	34
3.1.1 Ondas de cuerpo .....	34
3.1.2 Ondas superficiales .....	35
3.2 DISPERSION DE ONDAS RAYLEIGH .....	36
3.3 VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE (Vs).....	37
3.4 MICROTREMORES.....	38

3.5 MÉTODOS DE ONDAS DE CUERPO .....	39
3.5.1 Métodos activos .....	39
3.6 MÉTODOS DE ONDAS SUPERFICIALES .....	45
3.6.1 Métodos activos .....	46
3.6.2 Métodos pasivos .....	47
3.6.3 Métodos híbridos .....	47
CAPITULO 4. METODOLOGÍA.....	54
4.1 FASE DE TRABAJO DE OFICINA.....	54
4.1.1 Análisis de la información .....	54
4.1.2 Selección del Sitio de Medición .....	57
4.2 FASE DE CAMPO.....	57
4.2.1 Equipos.....	57
4.2.2 Adquisición .....	59
4.2.3 Procesamiento .....	61
CAPITULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	82
5.1 Avenida Circunvalar .....	82
5.1.1 ReMi Muestra 1-2-3 .....	82
5.1.2 ReMi Muestra 4-5-6 .....	84
5.1.3 Refracción.....	86
5.2 Parque Central Simón Bolívar .....	87
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES .....	92
BIBLIOGRAFIA .....	93
ANEXOS .....	97
ANEXO A. RESULTADOS AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLÍVAR .....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de muestras.....	61
Tabla 2. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 1.....	70
Tabla 3. Rangos usuales de velocidades para los materiales geológicos.....	82
Tabla 5. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 2.....	100
Tabla 6. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 3.....	103
Tabla 7. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 4.....	107
Tabla 8. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 5.....	110
Tabla 9. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 6.....	113
Tabla 10. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.....	117
Tabla 11. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.....	120
Tabla 12. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.....	122
Tabla 13. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.....	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Columna levantada en las coordenadas Gauus Kruger Datum WGS84 N: 1.039567 y E: 1.028.895. ....	29
Figura 2. Columna levantada en la Quebrada el Mochuelo .....	32
Figura 3. Ondas "S" y ondas "P" .....	35
Figura 4. Ondas Love y ondas Rayleigh. ....	36
Figura 5. Dispersión en la transmisión de ondas Rayleigh.....	37
Figura 6. Fuentes de ruido sísmico .....	38
Figura 7. Relación entre la distancia crítica y la profundidad .....	42
Figura 8. Ley de velocidades aparentes.....	44
Figura 9. Tendido de geófonos.....	48
Figura 10. Diagrama de flujo de fases.....	54
Figura 11. Computador portátil.....	58
Figura 12. Cables .....	58
Figura 13. Geófono RT-Clark .....	58
Figura 14. Decámetro.....	59
Figura 15. Dispositivo GPS .....	59
Figura 16. Prueba de geófonos en Avenida Circunvalar .....	60
Figura 17. Lugar de estudio. Avenida Circunvalar.....	61
Figura 18. Datos .LVM en Interpex- IXSeg2egy. Avenida Circunvalar- Muestra 1	62
Figura 19. Configuración de datos. Avenida Circunvalar- Muestra 1 .....	62
Figura 20. Datos sin remover DC. Avenida Circunvalar- Muestra 1 .....	63
Figura 21. Datos después de remover DC. Avenida Circunvalar-Muestra 1 .....	63
Figura 22. Pasos de RemiVspect .....	64
Figura 23. Parámetros Avenida Circunvalar -Muestra 1 .....	65
Figura 24. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 1 .....	66
Figura 25. Imagen Apilada Avenida Circunvalar – Muestra 1 .....	67
Figura 26. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 1 .....	68
Figura 27. Avenida Circunvalar - Muestra 1 .....	70
Figura 28. Asignación de columnas. ....	71
Figura 29. Flujo de funciones. ....	72
Figura 30. Flujo de procesamiento de refracción .....	72
Figura 31. Proceso de conversión de datos. ....	73
Figura 32. Datos de cada disparo-Fuente al final.....	74
Figura 33. Apilado de datos en Matlab.....	74
Figura 34. Apilado sin remover niveles DC – Fuente al final.....	75
Figura 35. Apilado después de remover los niveles de DC- Fuente al final. ....	75
Figura 36. Parámetros de geometría de refracción.....	76
Figura 37. Identificación de la onda "S"- Fuente al final.....	76
Figura 38. Datos de cada disparo-Fuente al inicio.....	77

Figura 39. Apilado de datos en MatLab.....	77
Figura 40. Apilado sin remover niveles DC – Fuente al final.....	78
Figura 41. Apilado después de remover los niveles de DC- Fuente al inicio.....	78
Figura 42. Identificación de la onda "S"- Fuente al inicio.....	78
Figura 43. Tendido con fuente al final. ....	79
Figura 44. Tendido con fuente al inicio.....	80
Figura 45. Modelo de refracción.....	80
Figura 46. Parámetros para generar tomografía. ....	81
Figura 47. Modelo 2D - Muestras 1-2-3.....	83
Figura 48. Comparación de tendidos (Muestras 1-2-3 vs Muestras 4-5-6) .....	84
Figura 49. Parámetros del modelo 2D. Avenida Circunvalar –Muestras 4, 5 y 6. .	85
Figura 50. Modelo 2D. Avenida Circunvalar- Muestras 4, 5 y 6 .....	85
Figura 51. Tomografía con capas delineadas. ....	86
Figura 52. Tomografía sin capas delineadas.....	86
Figura 53. Modelo 2D - Parque Central Simón Bolívar. Muestra 1y 2.....	87
Figura 54. Modelo 2D –Parque Central Simón Bolívar. Muestra 3 y 4. ....	88
Figura 55. Modelo 3D.....	89
Figura 56. Parámetros Avenida Circunvalar- Muestra 2.....	97
Figura 57. Imágenes Avenida Circunvalar – Muestra 2.....	98
Figura 58. Imagen Apilada Avenida Circunvalar- Muestra 2 .....	99
Figura 59. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 2 .....	99
Figura 60. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 2.....	100
Figura 61. Parámetros Avenida Circunvalar - Muestra 3.....	101
Figura 62. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 3 .....	101
Figura 63. Imagen Apilada Avenida Circunvalar - Muestra 3 .....	102
Figura 64. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 3 .....	103
Figura 65. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 3.....	103
Figura 66. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 4 .....	104
Figura 67. Imagen apilada Avenida Circunvalar- Muestra 4.....	105
Figura 68. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 4 .....	106
Figura 69. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 4.....	106
Figura 70. Impulso sísmico.....	107
Figura 71. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 5 .....	108
Figura 72. Imagen apilada Avenida Circunvalar- Muestra 5.....	109
Figura 73. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 5 .....	109
Figura 74. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 5.....	110
Figura 75. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 5. ....	110
Figura 76. Imagen apilada Avenida Circunvalar- Muestra 6.....	111
Figura 77. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 6.....	112
Figura 78. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 6.....	112
Figura 79. Lugar de estudio. Parque Central Simón Bolívar. ....	113
Figura 80. Datos sin remover DC. Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1...	114
Figura 81. Datos después de remover DC. Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1. ....	114
Figura 82. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1. ....	114

Figura 83. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1. ....	115
Figura 84. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1. ....	116
Figura 85. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.....	116
Figura 86. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2. ....	117
Figura 87. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2. ....	118
Figura 88. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2. ....	119
Figura 90. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3. ....	120
Figura 89. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.....	119
Figura 91. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3. ....	121
Figura 92. Grafico picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3. ....	121
Figura 93. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.....	122
Figura 94. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4. ....	122
Figura 95. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4. ....	123
Figura 96. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4. ....	124
Figura 97. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4.....	124

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Avenida Circunvalar. ....	24
Mapa 2. Parque Central Simón Bolívar. ....	25
Mapa 3. Mapa Geológico de Bogotá. ....	27
Mapa 4. Mapa de Zonas Geotecnicas.....	55
Mapa 5. Mapa de Zonas de Respuesta Sísmica.....	56

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLÍVAR.....	90
--------------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>“S”</i>	<i>Onda S</i>
<i>“P”</i>	<i>Onda P</i>
$V_s$	<i>Velocidad de onda “S”</i>
$f$	<i>Frecuencia de onda</i>
$\lambda$	<i>Longitud de onda</i>
$x$	<i>Distancia</i>
$t$	<i>Tiempo</i>
$k$	<i>Numero de onda</i>
$p$	<i>Lentitud</i>

## GLOSARIO

**ARCILLOLITA:** Es una roca compacta, sin la propiedad de poderse dividir en capas y formada por partículas del tamaño de la arcilla.

**ARENA:** Es una roca sedimentaria constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados, minerales que forman las rocas, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespatos.

**ARENISCA:** Es una roca sedimentaria compuesta de fragmentos de tamaño arena, de color variable.

**CONGLOMERADO:** Es una roca sedimentaria de tipo detrítico formada mayoritariamente por clastos redondeados tamaño grava o mayor (>2 mm).

**ERROR MEDIO CUADRATICO:** Es una función de riesgo, correspondiente al valor esperado de la pérdida del error al cuadrado o pérdida cuadrática. La diferencia se produce debido a la aleatoriedad o porque el estimador no tiene en cuenta la información que podría producir una estimación más precisa.

**ESTRATIFICACION:** Es la propiedad que tienen las rocas sedimentarias de disponerse en capas o estratos, uno sobre otros en una secuencia vertical.

**ISOPERIODO:** Representan la distribución de valores de períodos del suelo en el lugar de la zona de estudio.

**LAMINACION:** Es una secuencia a pequeña escala de capas delgadas (las llamadas láminas) que se produce en las rocas sedimentarias.

**LIMOLITA:** Es una roca sedimentaria que tiene un tamaño de grano en el rango de limo más fino que la arenisca y más grueso que arcillas.

**PERIODO FUNDAMENTAL:** Es una medida de todos los objetos o estructuras que poseen una tendencia natural a vibrar.

**PICK:** Cuando se observa la imagen combinada, se escoge un punto que tenga la tendencia de dispersión, la cual se encuentra representada por los valores bajos de lentitud y frecuencia. La acción de seleccionar varios *picks*, se denomina *picking*.

**REFRACCION DE SISMICA CONVENCIONAL:** Tiene algunas limitaciones, sobre todo en ambientes urbanos, dificultan su aplicación:

- Se necesita un ambiente sin ruidos, cosa imposible en áreas urbanas.
- Se asume que existe un aumento de velocidad en profundidad, que aunque en general es un principio valido, cuando existen capas de baja velocidad, no se detectan.
- Para determinar  $V_s$ , es preciso realizar ensayos especiales que son complejos, caros y lentos.

**REGISTRO SÍSMICO:** Corresponde a la respuesta electromagnética registrada por varios geófonos por la energía acústica liberada por un disparo (o ruido ambiental) y contiene las interfaces de interés en una sección en tiempo o profundidad.

**.LVM:** El formato LabVIEW Measurement (.lvm) es un formato de archivo basado en texto para los datos de una dimensión que desea utilizar. El archivo .lvm está diseñado de modo que es fácil de analizar y fácil de leer cuando se importan en un programa de hoja de cálculo, como Microsoft Excel o un editor de texto, como el Bloc de notas. Es compatible con múltiples conjuntos de datos, agrupación de conjuntos de datos, y la adición de conjuntos de datos a los archivos existentes. El formato de archivo no está diseñado para alto rendimiento o para conjuntos de datos muy grandes, como es el caso con todos los formatos basados en texto.

**.SGY:** Archivo de datos sísmicos universal aceptado para la industria de la exploración desde 1975 para el análisis y el procesamiento de datos.

**.SEG2:** Formato de archivo de datos para poco trabajo de datos de radar sísmicos o digitales en el entorno de una computadora pequeña.

**.VS :** Este tipo de archivo se emite desde *Pickwin*. Es simplemente un archivo de texto delimitado por espacios. El texto entre describe cada valor.

## RESUMEN

Este trabajo de investigación, tuvo como propósito identificar las características del subsuelo en dos lugares de la ciudad de Bogotá, un tramo de la Avenida Circunvalar y una zona del Parque Central Simón Bolívar, con el método de refracción por microtemores ReMi.

En el desarrollo se utilizó la metodología descrita por Louie en el 2001, la cual consiste en capturar ruido ambiental e interpretar las ondas superficiales para los dos lugares de estudio, con el equipo de sismica elaborado por la empresa Subsuelos3D en colaboración de Colciencias y la colaboración del personal experto de esta empresa. Para comparar la utilidad y la eficiencia de esta metodología se hicieron modificaciones en la distancia entre los geófonos, un aporte que se realizó en este proyecto y corresponde con un valor agregado con respecto a otros estudios realizados por la compañía. Además, en este proyecto se realizaron perfiles 1D, modelos 2D y un modelo 3D en un sector del Parque Central Simón Bolívar, utilizando una geometría de líneas ortogonales en la zona de adquisición. Dada la facilidad para realizar el método de refracción que se practica usualmente, se realiza una comparación de este método y el método ReMi en la Avenida Circunvalar con el fin de revisar la utilidad y observar las diferencias entre los métodos.

Con los resultados y la información geológica y litológica previa de cada uno de los lugares de estudio, se concluye que el método de refracción por microtemores es adecuado a las necesidades de investigación en ambientes urbanos como Bogotá y además presenta una facilidad en la adquisición de los datos, lo cual es óptimo para realizar estudios a gran escala.

## INTRODUCCIÓN

En geofísica hay métodos de prospección somera no invasivos que permiten la caracterización del subsuelo con diferentes fines como la construcción de edificaciones o definir el riesgo sísmico en el caso de la ocurrencia de eventos de gran magnitud.

En el 2001, Louie realizó una nueva técnica para el estudio del subsuelo en geotecnia, el cual utiliza geometría y equipos de registro de refracción sísmica convencional. Como fuente de energía se utiliza la proveniente de la actividad humana (microtremores). Esta técnica, constituye en la actualidad una de las más avanzadas, rápidas y eficaces para la caracterización del subsuelo de una zona urbana o de gran actividad humana, por tal motivo la ciudad de Bogotá, es adecuada para realizar este tipo de estudios.

Considerando que la ciudad de Bogotá siendo la capital del país, constituye un nodo principal de desarrollo económico y administrativo, con actividad: comercial, residencial, industrial u otras, es la ciudad con mayor población, con un estimativo de 7.776.845 habitantes, según el Departamento encargado de las estadísticas en Colombia (DANE) en su estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020. A pesar de que existe la norma Colombiana sismo resistente, esta no se cumple en todas las construcciones y en el caso del suceso de un evento sísmico significativo superior a 5.0 grados en escala de magnitud de Richter antes de parte de las autoridades locales a través de la oficina de gestión de riesgo de la capital, aun es necesario fortalecer los planes de contingencia y las medidas para mitigar y disminuir los riesgos ante un posible evento de gran magnitud.

Con el propósito de aportar al conocimiento de las características geotécnicas del subsuelo en la ciudad de Bogotá, este proyecto de grado se basa en el estudio de la velocidad "S" para dos zonas de la ciudad, una localizada en la Avenida Circunvalar en límite con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas- Sede Macarena A de la Universidad Distrital y la otra en un predio del parque Central Simón Bolívar en la intersección de la Carrera 68 y la Calle 53. A través de la refracción por microtremores (ReMi) se logra identificar las interfaces del subsuelo a cierta profundidad, de acuerdo a cada tendido sísmico, con el fin de clasificar las condiciones locales del suelo a partir de la adquisición de perfiles ReMi e información geológica, y así, aportar al conocimiento sísmico de la ciudad.

# **CAPITULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

## **1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

En el capítulo 1 se presentan los objetivos, estado del arte, planteamiento del problema, justificación y alcances del proyecto. En el capítulo 2 se mencionan la ubicación y la geología de las zonas de estudio. En el capítulo 3 se muestra el desarrollo teórico asociado con el método de refracción por microtremores y la refracción. En el capítulo 4 se muestra el procedimiento. En el capítulo 5 se presenta el análisis y resultados.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Caracterizar el subsuelo somero de acuerdo a las velocidades de ondas de corte y el espesor de sedimentos mediante la aplicación del método de refracción por microtremores (ReMi) en un segmento de la Avenida Circunvalar y Parque Central Simón Bolívar.

### **1.2.2 Específicos**

- Comparar del método de refracción y el método de refracción por microtremores en el segmento de la Avenida Circunvalar.
- Comparar diversas configuraciones de los tendidos para la interpretación de los datos.
- Generar un modelo 3D en la zona de estudio Parque Central Simón Bolívar.

## **1.3 ANTECEDENTES**

Louie (2001) propone el método de refracción por microtremores (ReMi) con la finalidad de obtener modelos de velocidad de onda "S" en un sitio específico, a través de un análisis y dispersión de ondas superficiales, específicamente ondas Rayleigh.

Mendes (2004), presenta una caracterización geofísica del subsuelo de la parte Oeste de Barcelona, capital del Estado de Anzoátegui, con aplicación de métodos sísmicos, gravimétricos y de ruido ambiental concluyó, con respecto a la gravimetría: que los valores de anomalías de Bouguer se ubican entre los -40.5 y 31.9 miligales, estando asociados los valores mínimos a zonas que presentan mayor acumulación de sedimentos, que correspondió a las zonas cercanas a la costa. Con respecto al ruido sísmico, la zona de estudio presenta valores de periodos fundamentales del suelo que oscilan entre los 0.3 y los 1.4 s, ubicándose los valores más altos, entre los 0.7 y 1.4 s, hacia el norte del área de estudio, específicamente en los sitios cercanos a la costa, lo cual evidencia una mayor

cantidad de sedimentos, mientras valores bajos, entre 0.5 y 0.7 s se ubican al pie de la montaña. Los datos sísmicos permiten interpretar que en capas superficiales, que se ubica entre los 4 m y 9 m caracterizando litológicamente por arenas sueltas, la velocidades de onda "P" se ubican entre los 250 y 500 m/s y de onda "S" entre 150 y 250 m/s, en capas más profundas, entre los 25 y 60 m la onda "P" tiene velocidades que oscilan entre los 1700 y 1900 m/s, mientras que para las ondas "S" va desde los 400 hasta los 900 m/s, la información es muy variable debido a que en algunos casos se observan junto a las fases superficiales de la onda "S", por último, a más de 100 m de profundidad las velocidades de onda "P" van entre 2000 y 2500 m/s.

Boeiro y De Gouveia (2005) obtuvieron velocidades de onda de corte en el Área Metropolitana del norte del Estado Anzoategui, a través del número de golpes (Registro Sistema de Puesta a Tierra), este tipo de pruebas son fundamentales para la realización de estudios geotécnicos.

Gascón (2009), caracterizó el Área Metropolitana del Estado de Anzoategui a través de ruido ambiental, donde concluyó que los mayores valores de periodo (hasta 1.53 s) se ubicaban en el Municipio Urbaneja (Lechería), lo cual indica una mayor cantidad de sedimentos blandos, así mismo, los lugares cercanos a la cuenca del Rio Neverí en el centro del Municipio Simón Bolívar (Barcelona) presentan valores elevados de periodo (1.3 s); en sentido contrario, el Municipio Sotillo (Puerto La Cruz) presenta los menores valores de periodos de la zona de estudio (0.95 s) con tendencia a disminuir hacia el este, debido a la proximidad a un gran macizo rocoso, perteneciente al Grupo Guayata de Venezuela.

Vernaes (2011), presenta el mapa preliminar de microzonas para la conurbación del Área Metropolitana del Norte del Estado de Anzoategui, el cual es determinado a través de estudios de isoperiodos a partir de mediciones de ruido ambiental y de valores de  $V_s$  (relacionado con registro de numero de golpes Standard Penetration Test), estimando el valor del espesor de sedimentos a partir de la relación entre el periodo y la velocidad de onda "S".

Padrón (2012) estima los valores de velocidad de onda "S" para los primeros 30 m en el Área Metropolitana del Norte de Anzoategui, con lo cual concluye que lo menores valores de  $V_s$  (menores a 185 m/s) se ubican en las zonas norte de Lechería y Barcelona, cercano a la costa, valores intermedios (entre 185 y 325 m/s) se obtienen en las zonas más alejadas de la costa en Barcelona, Lechería y Puerto Cruz, mientras que los mayores valores (más de 325 m/s) se ubican hacia el este de Puerto Cruz y en Guanta.

### **1.3.1 Antecedentes en Colombia**

En el marco de la utilización del método ReMi, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) implemento el desarrollo la zonificación de la ciudad de Pasto, ubicada al sur occidente de Colombia. Se realizaron 157 mediciones de microtemores dentro

del perímetro urbano. Estimaron los perfiles de velocidad de onda de corte, espesor de los depósitos sedimentarios y los factores de amplificación sísmica, también se llevó a cabo la clasificación de la mayor parte de la ciudad como suelos con alto potencial de amplificación (Eraso et al, 2013).

Dentro de las implementaciones del Método ReMi en la ciudad de Bogotá se encuentra la desarrollada por la empresa Geotecnia Especializada JEOPROBE LTDA, cuyo propósito es determinar en el Humedal Jaboque los perfiles del subsuelo a partir de los valores de velocidad de onda superficial ( $V_s$ ) en las profundidades del mismo. Se realizaron dos líneas geofísicas en el sector de cruce del humedal, con el fin de identificar las condiciones naturales del terreno. Los análisis realizados permiten establecer un perfil aproximado de velocidad de onda de corte del terreno en el área el cual está directamente relacionado con la rigidez del suelo.

#### **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Alrededor del mundo se ha evidenciado como la energía liberada por sismos con grandes magnitudes y sus efectos inducidos, afectan a ciudades enteras, traduciéndose esto en pérdidas humanas y materiales, por ejemplo: Haití en 2010, con magnitud de 7<sup>º</sup> y grado X en escala de Mercalli, 316.000 muertos; Bio-Bio, Chile en 2010, con magnitud 8,8<sup>º</sup> y grado IX en escala de Mercalli, 525 muertos y Honshu, Japón 2011, con magnitud de 9,2<sup>º</sup> y grado IX en escala de Mercalli, 20896 muertos. Esto se debe a que la mayoría de las ciudades afectadas, se encuentran ubicadas sobre márgenes de placas continentales que liberan energía de forma imprevista y que a su vez, dependiendo del tipo de suelo y tipo de construcción la intensidad de los daños puede variar. Debido a esta razón, en los últimos años, se han desarrollado técnicas de investigación de suelo que buscan disminuir el riesgo sísmico a través de la caracterización de sitios y a la evaluación del terreno en ciudades actuales y por desarrollar.

Colombia se encuentra en el llamado “cinturón de fuego” del pacífico un lugar con gran actividad sísmica debido a que la Placa Nazca subduce la placa Suramericana. De hecho recientemente se han presentado eventos en la zona Orinoquia colombiana, como el terremoto de El Calvario (Meta) el 24 de Mayo de 2008 y el terremoto de la Mesa de los Santos el 10 de Marzo de 2015. Específicamente el borde de la cordillera oriental es una zona de alta amenaza sísmica debido a la falla frontal de la cordillera que la delimita geológicamente del piedemonte llanero (Dimate, 2006).

El suelo que constituye el territorio de la ciudad de Bogotá es principalmente proveniente del periodo cuaternario y antiguamente fue un lago. Esto genero las formaciones Cacho, Bogotá y Sabana.

La formación Cacho y la formación Bogotá constituyen la falda de los cerros que circundan la Sabana de Bogotá, dado que es una zona muy consolidada desde el

punto de vista geológico, se definió como un lugar de interés para realizar la adquisición de datos en un segmento de la Avenida Circunvalar, en frente de la sede Macarena A, de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.

La formación Sabana representa la parte superior del relleno lacustre del gran lago de la Sabana de Bogotá (Hubach, 1957), por lo cual se determinó una segunda adquisición de datos mediante perfiles ortogonales en una zona Parque Central Simón Bolívar.

Teniendo en cuenta que Bogotá es una ciudad con una actividad sísmica moderada, con áreas densamente pobladas, fuerte ruido ambiental y con deficiencias en la infraestructura, como hundimientos y deterioro permanente de los pavimentos, se determina realizar el método geofísico de refracción de microtremores ReMi en los lugares mencionados anteriormente.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

Debido a la necesidad de realizar estudios geofísicos en ciudades que están rodeadas de vías y de ruido ambiental en todo el casco urbano, como Bogotá, los métodos tradicionales de sísmica no son adecuados por la imposibilidad de realizar una liberación de energía así sea con fuentes tan sofisticadas como el indugel o seismigel, dado que está establecido en la norma de adquisición de datos sísmicos que no es posible realizar estos estudios en zonas urbanas.

El método de refracción de microtremores ReMi está iniciando a ser un objeto de estudio en Bogotá, con fines de brindar soluciones geofísicas en diversos sectores. Hay que tener en cuenta, que este método solo se ha practicado bajo los mismos parámetros establecidos por Louie en el 2001, sin experimentar diversos tipos de geometría, configuraciones y equipos.

De acuerdo a la diversidad de suelos que se encuentran en Bogotá se analiza una configuración tradicional y una modificada para verificar si es posible obtener mejor calidad en los resultados del método y comparar diferentes perfiles. Además, teniendo en cuenta la posibilidad utilizar otros métodos geofísicos, como refracción, se genera una comparación para validar los resultados obtenidos en la zona de estudio de la Avenida Circunvalar.

Así, se verifica si bajo las modificaciones mencionadas, el método de refracción por microtremores es más eficiente, dando facilidad en tiempo y en recursos técnicos, humanos y económicos para la realización de proyectos a gran escala como podría ser la microzonificación sísmica de la ciudad, realizando al menos un registro en cada Unidad de Planeamiento Zonal (UPZ), con lo cual se pueda inferir sobre el comportamiento del subsuelo en Bogotá con la información obtenida con esta técnica geofísica y dar un soporte para una mejor planeación urbanística de la ciudad y los estudios con propósito académico que se puedan realizar con dichos resultados que permita aunar al conocimiento que se tiene de los suelos y

subsuelos sobre la ciudad para que las decisiones por parte de las entidades responsables en la gestión de riesgo sísmico sean más precisas a la realidad geológica de la capital.

### **1.6 ALCANCE DEL PROYECTO**

El propósito fundamental del proyecto consiste en aplicar el método de refracción por micro tremores en dos zonas específicas de Bogotá, las cuales se diferencian por su formación geológica y por ende, de su composición estratigráfica. Mediante el desarrollo del proyecto de grado se busca generar inquietudes académicas respecto a las condiciones iniciales requeridas por el método ReMi, por lo cual se modifican y se hace su debida comparación.

En el modelamiento de los datos de ReMi se utiliza el software SeisOpt Remi, en especial sus módulos ReMi Vspect y ReMi Disper, con los cuales se realizan los modelos 1D y 2D de la información. Para el modelamiento de los datos de refracción se utiliza el software Matlab y seisimager.

Los resultados del proyecto muestran que la aplicación de esta técnica geofísica permite obtener información de manera óptima en tiempo y en recursos. En los sitios de estudio se realizaron los procedimientos indicados y, se realizaron otras pruebas con diferente configuración.

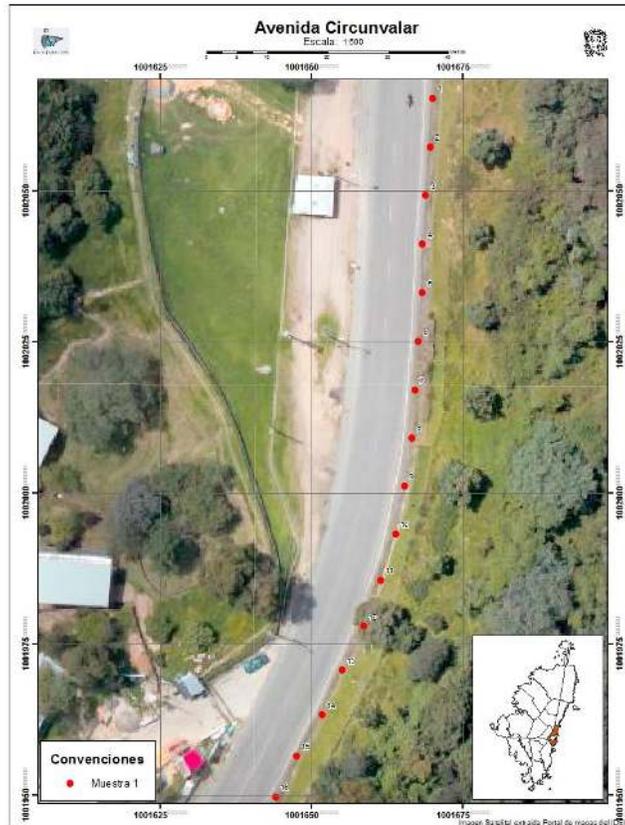
## CAPITULO 2. ZONA DE ESTUDIO.

### 2.1 LOCALIZACIÓN

La determinación de la zona de estudio se realizó con base a características importantes para la efectividad de la aplicación y análisis del método, la primordial es una zona donde los niveles de ruido sean altos, por esto se revisaron las vías con mayor flujo vehicular y el ancho vía; además se consideración los tipos de suelo presentes en la sabana de Bogotá.

Teniendo en cuenta estos criterios se realizó la adquisición en dos zonas de estudio en las cuales se analizaron las condiciones específicas de cada perfil geológico obtenido. Una zona de estudio está ubicada en la localidad Santa Fe, es un segmento de la Avenida Circunvalar al costado nororiental de la sede Macarena A, este lugar se encuentra ubicado dentro del suelo de protección establecido por la Resolución 1141 de 2006. Por la formación del relieve son suelos consolidados con edificaciones que oscilan de 2 a 15 pisos y estratos 2 a 5 (Mapa 1).

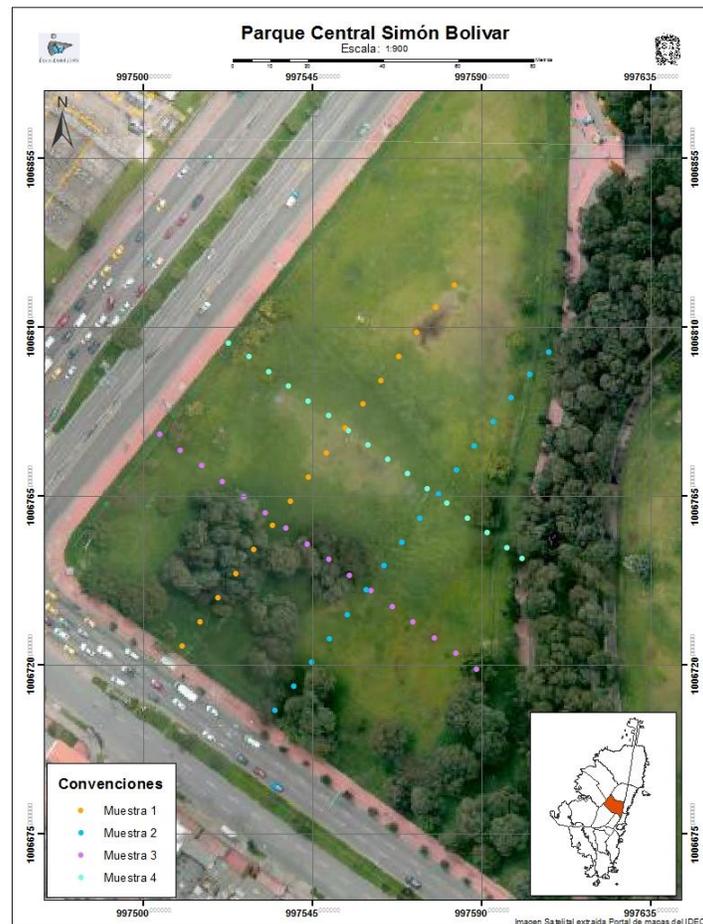
Mapa 1. Avenida Circunvalar.



Fuente: La investigación.

La segunda zona de estudio, se encuentra ubicada en la zona central de Bogotá, en la localidad de Teusaquillo, en la Unidad de Planeamiento Zonal del Parque Simón Bolívar-CAN. Para la toma de datos se escoge la intersección de la Avenida 68 con Calle 53 (Mapa 2). En general estos suelos son blandos y presentan edificaciones de alturas que van de 2 pisos a 20 pisos. Alrededor se observa un gran flujo vehicular por ser una zona neurálgica para la ciudad con estratos de 3 a 6.

Mapa 2. Parque Central Simón Bolívar.



Fuente: La investigación.

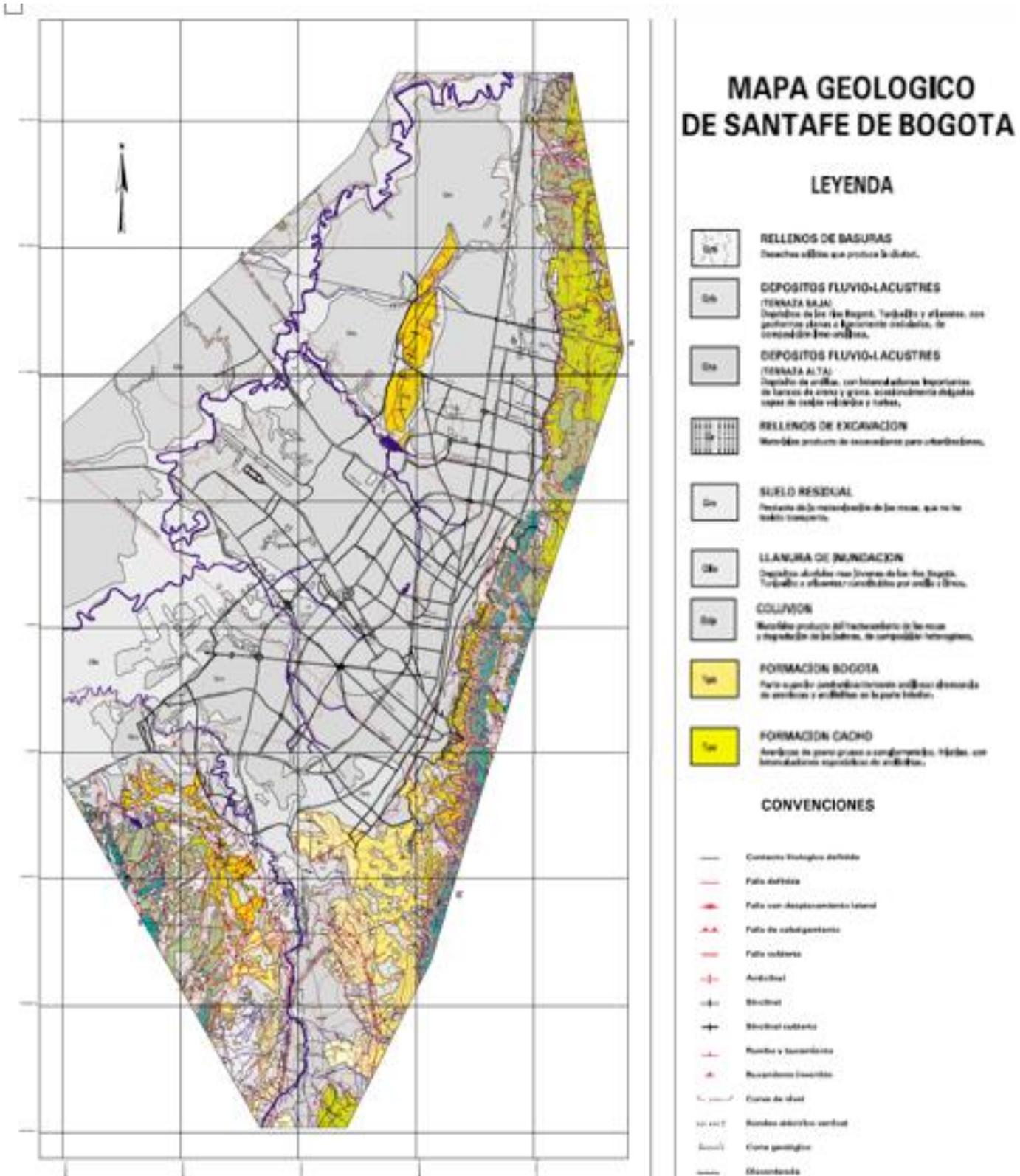
El propósito de realizar dos zonas de investigación corresponde con un criterio geológico en el cual como se mencionó se busca comparar la respuesta en dos sitios de características geológicas diferentes para entender el comportamiento de los suelos entre una zona consolidada como es la localizada en el piedemonte de los cerros orientales y en una zona aluvial lacustre como es la localizada en el Parque Central Simón Bolívar, con esto se busca caracterizar los suelos presentes en estas dos áreas de interés.

## **2.2 GEOLOGÍA**

### **2.2.1 Geología Regional**

La altiplanicie de la Sabana de Bogotá, situada en la parte central de la Cordillera Oriental, es un amplio sinclinorio con orientación SSW-NNE, en rocas sedimentarias del Cretáceo Medio hasta el Cuaternario (Hubach, E., 1957). El Mapa Geológico de Bogotá (Mapa 3) presenta las principales unidades estratigráficas y sus estructuras. Las rocas del Grupo Villeta y las Formaciones Guadalupe, Guaduas, Cacho y Bogotá, se encuentran hoy fuertemente plegadas, falladas y diaclasadas (Cretáceo Medio a Terciario Inferior). Estas fueron peneplanadas y recubiertas, en el borde oriental de la cuenca, por las Formaciones Regadera y Usme (Terciario Inferior). Durante las Orogenias Protoandina y Andina (Mioceno Inferior a Plioceno Medio; 16.5 a 3 millones de años), los pliegues y fallas del Cretáceo y del Terciario Inferior se acentuaron y la región, ya continental, con valles y montañas inicialmente en un clima tropical húmedo a escasa elevación sobre el nivel del mar, sufrió los rigores normales de la erosión subarea mientras paulatinamente se elevaba 30000 m para constituir la Cordillera Oriental. Esto obviamente trajo consigo una profunda modificación en el régimen climático, los patrones de erosión, las cuencas hidrográficas y los ecosistemas. Las Formaciones Tiltá, Sabana y Tunjuelo son depósitos sedimentados en el centro y los bordes de grandes lagos interandinos cerca de la cumbre de la Cordillera, a los cuales llegaban los materiales fluviales y fluvio-glaciares del Plioceno y Pleistoceno. Durante los últimos 10000 años de vida geológica se llegó a la colmatación final de los lagos de la Sabana, el proceso de desecación de los mismos, la integración de la red hidrográfica actual del Río Bogotá y la erosión de la altiplanicie. En los últimos 50 años la acción antrópica está influyendo notablemente, por la explotación de materiales pétreos, los cambios en la cobertura vegetal, los cambios climáticos, la expansión urbana, el desgaste en masa relacionado con los asentamientos humanos de ladera, los cambios en el uso del agua superficial y la sobreexplotación de aguas subterránea (Lobo-Guerrero, A., 1992).

Mapa 3. Mapa Geológico de Bogotá.



Fuente: Ingeominas, (1997)

## 2.2.2 Geología local

**2.2.2.1 Parque Central Simón Bolívar** El área está situada dentro de la planicie de la Sabana de Bogotá, sobre la formación Sabana, y está compuesto de depósitos fluvio lacustres del relleno del gran lago de la Sabana de Bogotá (Hubach, E., 1957), paludales en arcillas grises y verdes, y en menor proporción arcillas turbosas, arenas finas a medias, limos, restos de madera y capas de diatomita, incluyendo numerosas capas de cenizas volcánicas. (Plan Maestro del Parque Simón Bolívar). Los depósitos lacustres del pleistoceno están conformados por turbas y cenizas volcánicas (presentes hasta 30m de profundidad). Adicionalmente el depósito es relativamente joven, se formó durante el último millón de años y por supuesto las capas más superficiales, los primeros 20 m del depósito se formaron durante los últimos 100.000 años. Sobre esta formación se encuentra sobre suelos más permeables de las formaciones Subachoque y Guadalupe, y tiene un espesor cercano a 240 m en buena parte de la zona plana de suelos blandos cubierta por urbanizaciones (Instituto Distrital de Cultura y Turismo, 2003).

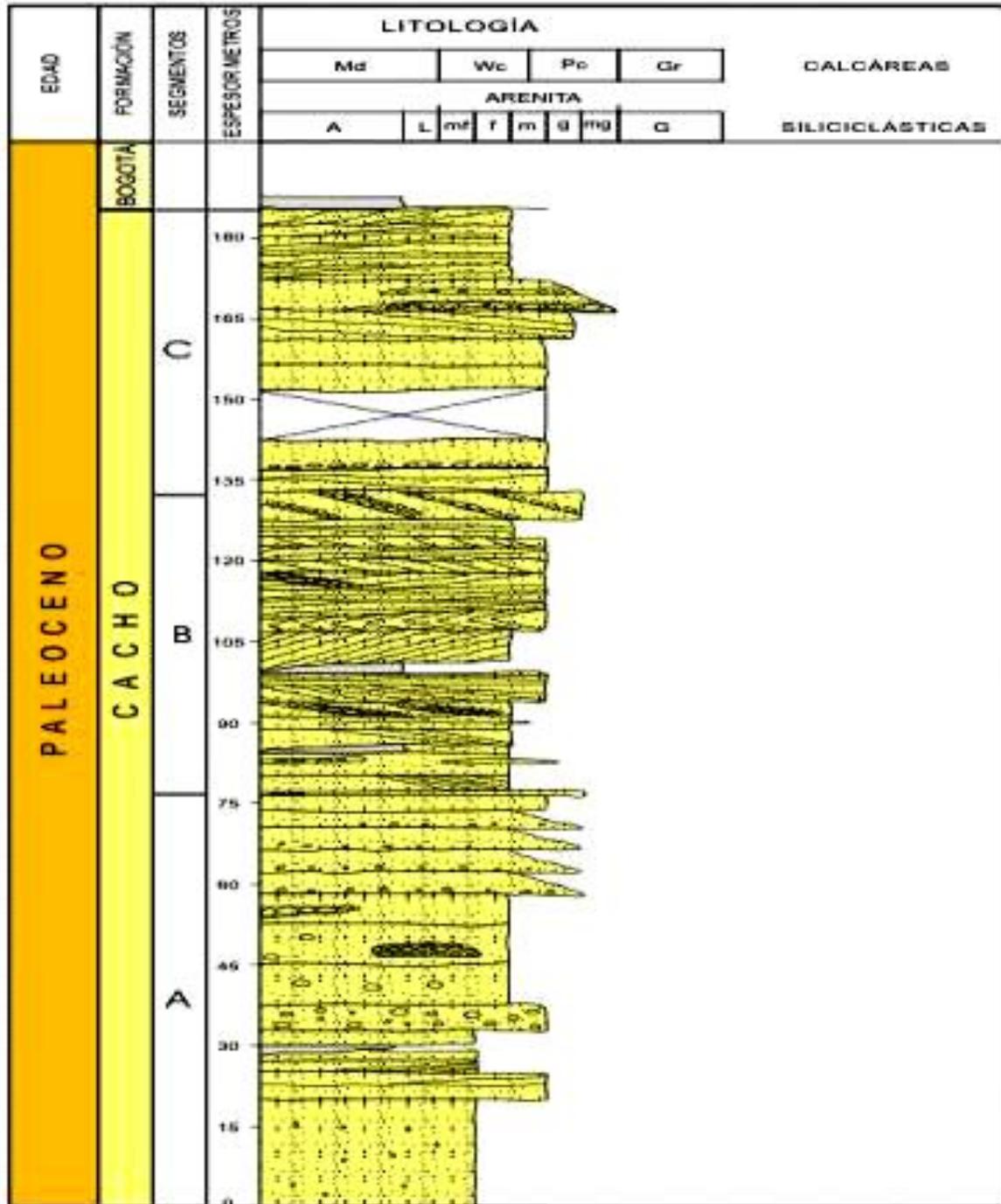
Teniendo en cuenta el estudio realizado para la construcción del complejo acuático Simón Bolívar en la zona existen rellenos en arcillas, tierras y escombros, con espesores que varían entre 2.9 y 11 m y que seguramente fueron colocados cuando se reconfirmó el terreno. Los mayores espesores de relleno se encuentran en la zona oriental, no sólo por la existencia del terraplén en tierra sino porque la superficie era aún más baja que el terreno periférico (Arias Serna y Saravia S.A.).

**2.2.2.2 Avenida Circunvalar** De acuerdo al mapa de Geología de Bogotá del 2010 (Mapa 3), se determina que la zona de estudio se encuentra en una zona de intersección entre las siguientes formaciones:

### **Formación Cacho**

Hubach, (1931) denomina Horizonte del Cacho al conjunto inferior ubicado en el Piso Bogotá, el cual tiene una naturaleza “arenisco-ripioso” y está constituido por areniscas granulosas, tiernas, de colores amarillos hasta ocre o rosado, con algunos bancos de arcillas abigarradas. Julivert (1963) para este Horizonte, utiliza el nombre de Formación Cacho, adoptada por la *Colombian Society Petroleum Geologists and Geophysicists* (1961, en Julivert, 1963). En el área de estudio, aflora a lo largo de los sinclinales de Sisga, Siecha, Sesquilé, Teusacá, Usme, Checua-Lenguazaque, Río Frío, Subachoque y anticlinal de Guatavita. Esta unidad forma un relieve pronunciado por lo cual es fácilmente cartografiable; se reconoce en ella una sola secuencia arenosa o como dos niveles arenosos separados por uno arcilloso (Figura 1).

Figura 1. Columna levantada en las coordenadas Gauss Kruger Datum WGS84 N: 1.039567 y E: 1.028.895.



**CONVENCIONES LITOLOGIA**



ARCILLOLITAS  
ARENISCAS  
ARENISCAS CONGLOMERADAS



LAMINACIÓN LEVEMENTE INCLINADA PLANAR  
LAMINACION INCLINADA PLANAR  
ESTRATIFICACION CRUZADA GRADADA

Fuente: Montoya, D., Reyes, G. (2005)

Segmento A. Le corresponden 77 m de espesor, la secuencia empieza con 7 m de areniscas friables, de grano medio en capas muy gruesas, hacia arriba se presenta un intervalo de 10 m de areniscas de grano fino, en capas medias, algunas son cuneiformes, con laminación levemente inclinada y luego 21 m de areniscas de grano medio, de mala selección, en ocasiones conglomeráticas dispuestas en bancos. Para terminar en un intervalo de 14 m de areniscas de grano grueso decreciente a fino, dispuestas en capas gruesas.

Segmento B. Con un espesor de 55 m, los primeros 22 m están representados por capas muy gruesas y bancos de areniscas de grano medio, de buena selección o en ocasiones conglomeráticas (hasta gránulo) que definen lentes, algunas capas son cuneiformes y pueden o no estar separadas por arcillolitas en capas de hasta 1 m. Los 52,8 m restantes están dispuestos en capas muy gruesas de areniscas de grano medio con grano de crecimiento que define la laminación inclinada; también se observa laminación cruzada asintótica.

Segmento C. Son 40,6 m de espesor representados por capas gruesas y medias en menor proporción bancos, tabulares ocasionalmente cuneiformes, son areniscas de grano medio con decrecimiento a fino, son cuarzo-areniscas, friables, blanco amarillentas, con buena a mala selección.

Esta unidad es suprayacida por la Formación Bogotá, en contacto neto y concordante, pasa de una capa muy gruesa de areniscas a un nivel de arcillolitas y el contacto inferior se discutió en la Formación Guaduas.

La edad de la Formación Cacho según MacLaughlin & Arce (1972), es Paleoceno con base en paleoflora estudiada por Van der Hammen (1957); Sarmiento (1994) hace más precisión al discutir el contacto de la Formación Guaduas con la Formación Cacho y le asigna a esta última una edad de Paleoceno Superior.

Guerrero & Sarmiento (1996) plantean para las formaciones Cacho, Socha Inferior y Barco una posición estratigráfica y una composición litológica similar, ya que para estos autores existe una discordancia en el Paleoceno Inferior y a las unidades de la misma edad (Paleoceno Superior), Cacho, Socha inferior y Barco, tienen un mismo origen y están sobre esta discordancia entre el Paleoceno inferior y superior.

## **Formación Bogotá**

Hubach (1931), denominó piso de Bogotá a la secuencia del terciario medio que está constituido por tres conjuntos, el inferior, es arenoso y arcilloso e incluía el Horizonte de Cacho en la parte basal; el conjunto medio conformado por arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos gruesos de areniscas y areniscas arcillosas y el conjunto superior, formado por bancos de areniscas de grano grueso, blandas que alternan con arcillolitas abigarradas.

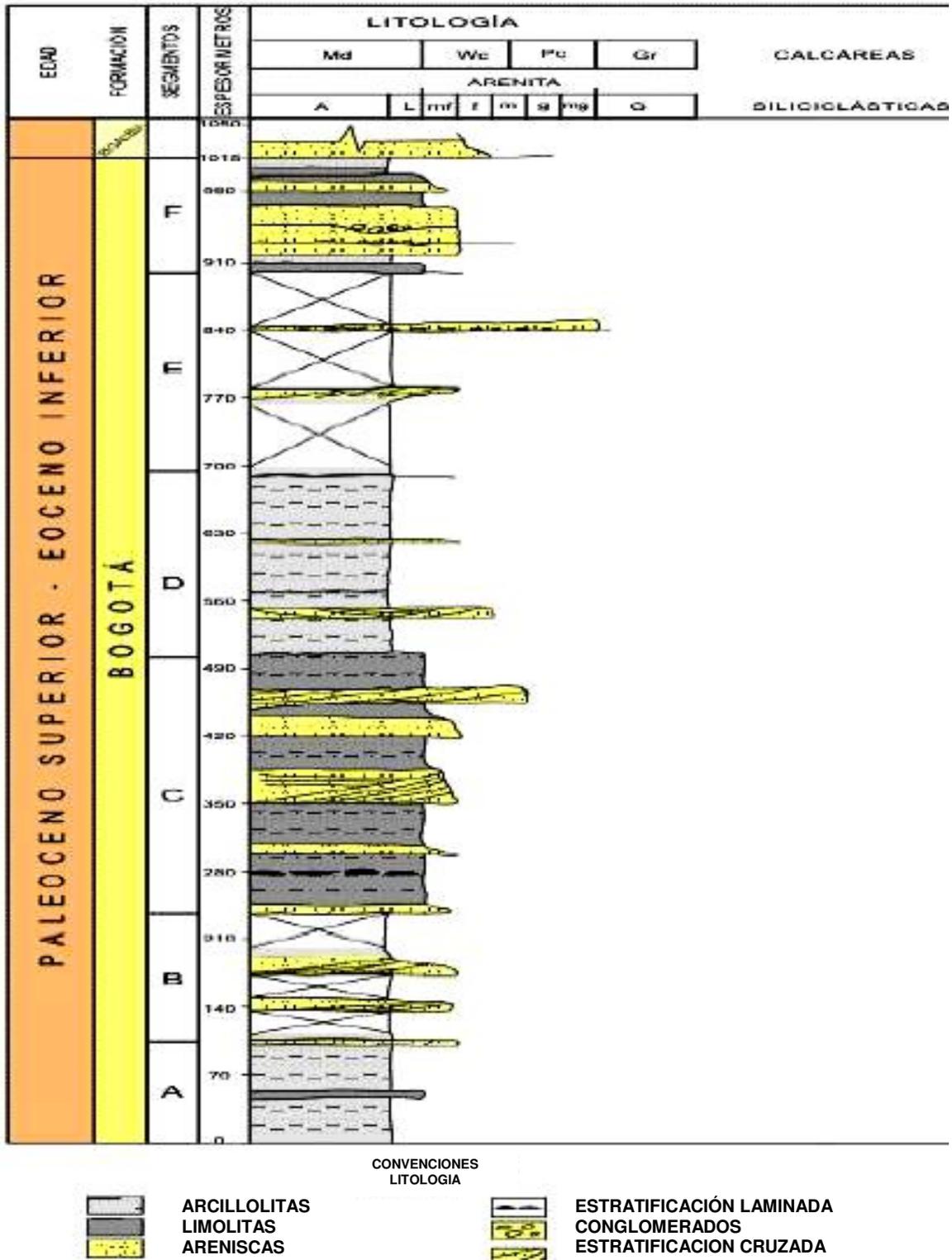
Julivert (1963), determina como localidad tipo de la Formación Bogotá la sección ubicada en la quebrada Zo Grande (flanco occidental del Sinclinal de Usme), la cual suprayace a la Formación Cacho e infrayace la Formación Regadera.

La Formación Bogotá en el área de trabajo aflora en los núcleos de los sinclinales de Río Frío, Checua-Lenguazaque, Subachoque, Teusacá, Sesquilé y Sisga; en el sinclinal de Sisga suprayace a la Formación Cacho e infrayace a la Formación Regadera mientras que en las otras estructuras mencionadas no aflora el techo. La litología de esta formación genera una morfología suave de valles, constituida por intercalaciones de bancos de arcillolitas de variados colores con esporádicas crestas formadas por areniscas.

Julivert (1963), determina un contacto neto y concordante entre las Formaciones Bogotá y Regadera en la sección tipo de la Formación Bogotá (Quebrada Zo Grande) pero hacia el norte plantea para la zona de Tunjuelito una discordancia angular que corta niveles más bajos hasta colocar a la Formación Regadera en contacto con capas de la Formación Guaduas, sin embargo en este mismo sector, Acosta & Ulloa (1998), cartografiaron una falla que pone en contacto estas dos unidades, desvirtuando la presencia de una discordancia (Figura 2).

Ulloa & Rodríguez (1979), en la llamada cuenca del Sogamoso, dentro del cuadrángulo K12 (Guateque), reportan una unidad denominada Arcillas de Socha, correlacionable por posición estratigráfica y edad con la Formación Bogotá; lo mismo ocurre con la unidad Arcillas del Limbo que aflora en el piedemonte llanero (Ulloa & Rodríguez, 1979).

Figura 2. Columna levantada en la Quebrada el Mochuelo



Montoya, D., Reyes, G. (2005)

Segmento A. Son 100 m de rocas de grano fino, los 250 m inferiores están compuestos por secuencias grano crecientes, con la base en areniscas consolidadas y pasan a arcillolitas y limolitas de colores violeta y gris (Hoorn, 1988).

Segmento B. Son 135 m de espesor, las rocas son de grano más grueso que las del segmento A. Se intercalan tres intervalos grano decrecientes desde bancos de areniscas friables de grano medio y fino a arcillolitas; las areniscas presentan estructuras internas como laminación inclinada, paralela y cruzada; en las arcillolitas se presentan concreciones (Hoorn, 1988).

Segmento C. Son 270 m, están representados por intervalos grano decrecientes desde areniscas muy finas a limolitas. Las areniscas son de colores verdes y grises y tienen estratificación cruzada; las limolitas son de colores rojos y violetas, tienen concreciones de arcillolita y niveles de arcillolita negra (Hoorn, 1988).

Segmento D. Le corresponden 195 m. En los primeros 100 m se presentan dos intervalos grano decrecientes, desde arenisca de grano medio a fino a limolitas y arcillolitas, las areniscas presentan estratificación cruzada y paralela, y bases erosivas y las arcillolitas y limolitas son de color violeta a gris (Hoorn, 1988).

Segmento E. Son 200 m, en gran parte cubiertos, en la base son secuencias de areniscas de grano medio a fino que decrecen a arcillolitas limosas, es común el desarrollo de estructuras en las areniscas como estratificación cruzada, laminación y canales (Hoorn, 1988).

Segmento F. Con 115 m, la base está representada por bancos de areniscas (10 m) con lentes de gravas y contactos erosivos, estas areniscas gradan de tamaño grueso a muy fino, y tienen laminación cruzada y paralela. Le siguen secuencias grano decrecientes desde areniscas muy finas hasta arcillolitas (Hoorn, 1988).

### **Depósitos coluviales**

Se incluyen en esta denominación a los depósitos de pendientes de origen local, siendo de los más notorios, los observados en el piedemonte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá. Los depósitos forman unidades de conos coluviales, conos de taluds, lóbulos de solifluxión y flujos torrenciales.

## CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.

### 3.1 ONDAS SÍSMICAS

Los movimientos telúricos que ocurren en la Tierra nos indican que en el interior del planeta se propagan ondas que son las causantes de dichas vibraciones; se puede definir las ondas como perturbaciones que se propagan en el espacio y el tiempo manteniendo ciertas características discernibles, tales como el periodo (T), que es el tiempo en el que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente; la frecuencia (f), número de repeticiones de la vibración por cada unidad de tiempo; la longitud de onda ( $\lambda$ ), distancia existente entre dos puntos idénticos en ondulaciones consecutivas y la amplitud (A), distancia vertical entre el punto medio de la onda y su cresta. Entre la gran cantidad de ondas que se propagan por el interior del planeta, podríamos diferenciarlas a grandes rasgos en dos grupos importantes (Espindola & Jiménez, 1992).

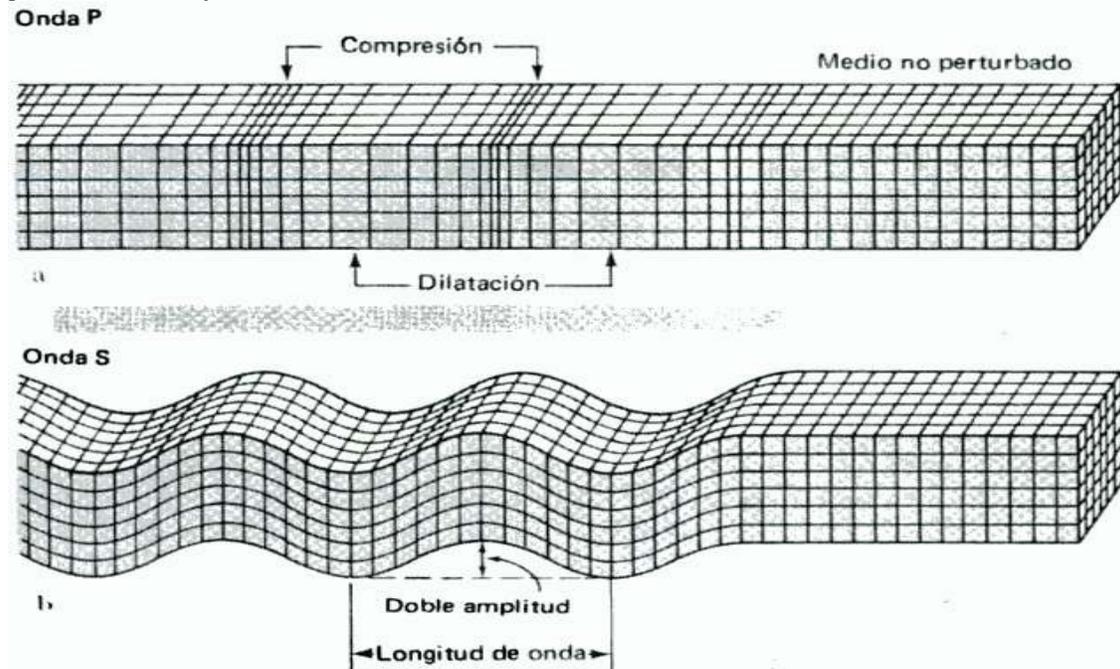
#### 3.1.1 Ondas de cuerpo

La alta cantidad de energía que tienen puede hacerlas viajar a grandes profundidades (Figura 3).

**3.1.1.1 Ondas compresionales** También son conocidas como ondas “P” o primarias, son las que viajan a mayor velocidad y tiene la capacidad de hacer vibrar a las partículas del suelo alternadamente, compactando o dilatando en la dirección de propagación de la onda. Las ondas “P” son muy similares a las ondas sonoras, ya que el movimiento que sufren las rocas, es muy similar al que sufre al aire (empujar y jalar). Las velocidades pueden estar los 5 km/s (en rocas graníticas cercana a la superficie terrestre) y los 11 km/s (en el interior de la Tierra).

**3.1.1.2 Ondas de cizalla** También son conocidas como ondas “S”, de corte o secundarias, el movimiento de las partículas que son alteradas a través de estas ondas es perpendicular a la dirección de propagación por lo que están asociadas con deformaciones del terreno de tipo cizalla. Las ondas “S” viajan exclusivamente a través de sólidos, ya que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte, posee aproximadamente un 58% de la velocidad de las ondas “P”, pero su amplitud es mayor, lo cual hace de suma importancia la determinación su velocidad en zonas de alto riesgo sísmico.

Figura 3. Ondas "S" y ondas "P"



Fuente: Bolt, A. (1976)

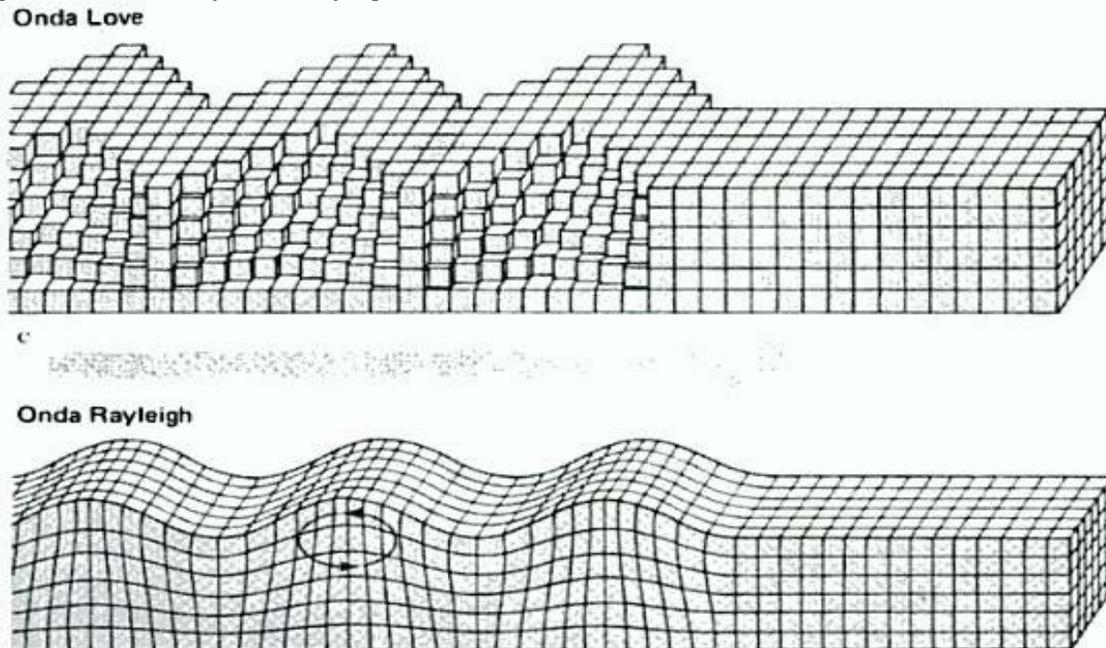
### 3.1.2 Ondas superficiales

Como su nombre lo indica, estas ondas viajan por la superficie de terreno, tienen la característica de ser más lentas que las ondas de cuerpo, pero por el contrario, son las que causan más daño cuando hay ocurrencia de terremotos. La existencia de este tipo de vibraciones, se explica a través de la interferencia que ocurre entre las ondas sísmicas de compresión y cizalla que viajan en diferentes direcciones (Figura 4).

**3.1.2.1 Ondas Love** Se generan solo cuando un medio elástico se encuentra estratificado en diferentes capas con diferentes características físicas y químicas. Se propagan con un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación (similar a las ondas "S"), pero las mismas están polarizadas al plano de la superficie de la Tierra, solo poseen una componente horizontal, este hecho las hace imperceptible a los sensores verticales y su velocidad oscila de 1 a 4.5 km/s.

**3.1.2.2 Ondas Rayleigh** Se forman en la superficie de la Tierra y hacen que las partículas se desplacen según una trayectoria elíptica retrograda. Sin embargo, como las propiedades de las ondas Rayleigh son dependientes de la frecuencia en medios verticales heterogéneos, estos tipos de ondas son utilizadas para representar y caracterizar el subsuelo superficial.

Figura 4. Ondas Love y ondas Rayleigh.



Fuente: Bolt, A. (1976)

### 3.2 DISPERSION DE ONDAS RAYLEIGH

Las ondas de cuerpo se mueven a través de medios infinitos, homogéneos e isotrópicos, sin embargo, en interfaces o capas intermedias se generan otros tipos de ondas, que son llamadas ondas guiadas, y ocurren debido a la interacción entre las ondas compresionales "P" y de cizalla "S". La propagación de estas es conocida como ondas superficiales. La fase de velocidad de propagación horizontal de estas ondas en capas intermedias son dependientes de la frecuencia, y la relación entre estos dos parámetros es definida como una dispersión.

Esta dispersión se representa por medio de la definición de la velocidad de fase de cada componente armónico de las ondas; esta representación se relaciona a través de (1).

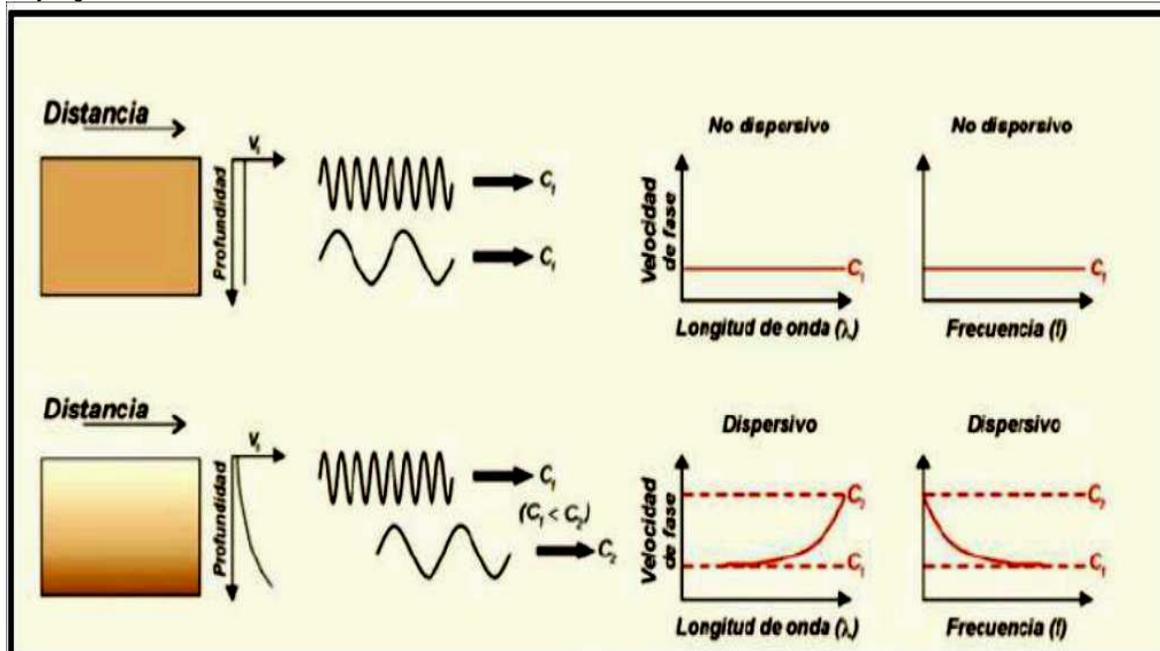
$$v = f\lambda \quad (1)$$

Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de  $V_s$  según la vertical. (Granda et al, 2005). Es importante destacar que más de una velocidad de fase puede estar asociada con una frecuencia de onda Rayleigh, simplemente porque estas ondas pueden viajar a diferentes velocidades para una frecuencia dada. La velocidad más baja es llamada velocidad del modo fundamental (o primer modo) (Xia et al., 1999).

La velocidad de onda "S" puede ser obtenida invirtiendo la velocidad de fase dispersiva de la onda superficial (Rayleigh o Love). En el caso de un semi-espacio sólido y homogéneo, la onda Rayleigh no es dispersiva y viaja a una velocidad aproximada de  $0.9194v_r$ , cuando el módulo de Poisson es igual a 0.25, y donde  $v_r$  es la velocidad de la onda "S" en el semi-espacio) (Xia et al., 1999). Sin embargo, en el caso que exista una capa sobre ese semi-espacio, las ondas Rayleigh se convierten en dispersivas, cuando sus longitudes de ondas están en el rango de 1-30 veces el espesor de la capa. Por tanto, mediante la inversión de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh de altas frecuencias, se pueden obtener velocidades confiables de ondas "S" cercanas a la superficie (Xia et al., 1999).

Las mayores longitudes de onda iluminan, sísmicamente hablando, profundidades mayores, por lo general, también muestran velocidades de fase mayores y son más sensibles a las propiedades elásticas de las capas más profundas. Por el contrario, las longitudes de onda más cortas son sensibles a las propiedades físicas de las capas superficiales. Debido a esto, un modo particular de las ondas superficiales poseerá una velocidad de fase única para cada longitud, produciendo así la dispersión de la señal sísmica (Figura 5).

Figura 5. Dispersión en la transmisión de ondas Rayleigh



Fuente: Granada et al (2005)

### 3.3 VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ )

La velocidad de las ondas "S" puede ser obtenida a través de mediciones in-situ como la sísmica de onda "S", técnicas de *DownHole* y *CrossHole*, o a través de

ondas superficiales con estaciones simples o arreglos. Por lo general, las mediciones de *DownHole* y *CrossHole* son muy costosas y requieren mucho tiempo.

La sismica empleada para encontrar la estructura de las ondas "S" incluye ondas corpóreas en un rango mayor de los 30 Hz, esto permite graficar interfaces presentes en el subsuelo, pero el rango de frecuencia se encuentra por encima del rango de interés para la ingeniería sísmica. Otros de los principales problemas de la sismica de onda "S" es el acoplamiento de la fuente en el suelo, lo cual produce una limitación en la profundidad de penetración de la onda "S".

Los métodos de ondas superficiales brindan la ventaja que son métodos no invasivos y que varios de estos métodos pueden ser empleados en entornos urbanos e industriales sin ninguna dificultad y de forma bastante rápida y económica.

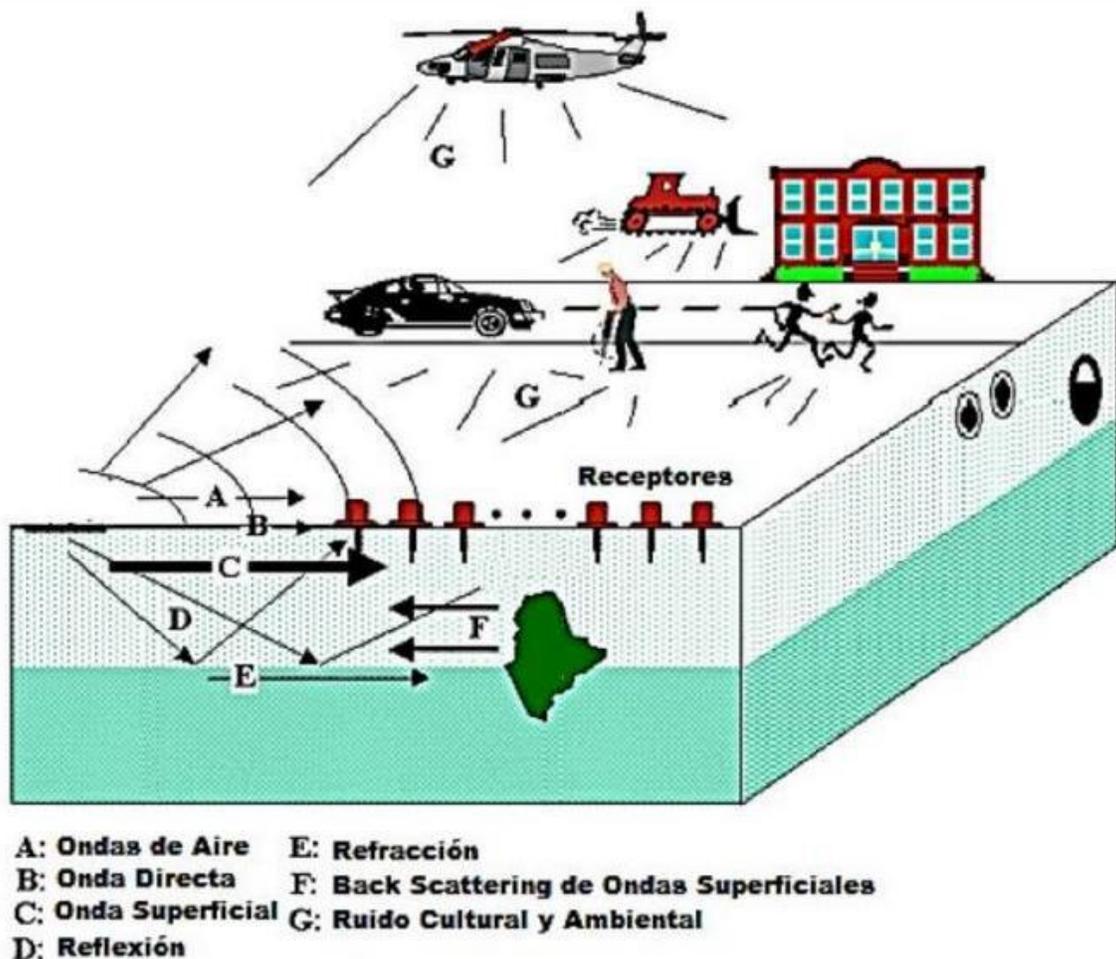
### **3.4 MICROTREMORES**

Los microtembroles, microtemblores, microtrepidaciones o microsismos son ondas sísmicas de una energía relativamente baja. En general, las ondas generadas por microtembroles son un compendio entre ondas de cuerpo y movimientos de ondas superficiales del tipo Rayleigh y Love (Aki, 1957). En una primera aproximación, los microtembroles con una frecuencia superior a 1 Hz son producidos por fuentes culturales, las cuales pueden ser trenes, tráfico en carreteras o maquinaria pesada; mientras que frecuencias menores a 1 Hz las producen fenómenos naturales como la acción de las olas del mar en las costas, viento y variaciones atmosféricas.

Los microtembroles se han utilizado desde finales del siglo XX como una técnica que nos ha permitido realizar una mejor caracterización dinámica de los suelos, en el caso de las estructuras, la técnica es relativamente fácil de ejecutar, el principio básico es tomar registros de microtembroles simultáneamente en el nivel y cimentación y en diferentes niveles de la estructura, hasta alcanzar la parte superior de la misma.

Una de las características de los microtembroles es que se presentan en un rango de frecuencia que oscila entre 0.01 a 30 Hz, sin embargo, la banda de interés sísmico se encuentra entre 2 a 26 Hz, ya que es en este rango, la energía se transmite por ondas Rayleigh y cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales para conocer las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre. En general, las características espectrales de los microtembroles pueden correlacionarse con las condiciones geológicas locales. (Tokimatsu, 1997) (Figura 6).

Figura 6. Fuentes de ruido sísmico



Fuente: Kansas Geological Survey (2014)

### 3.5 MÉTODOS DE ONDAS DE CUERPO

#### 3.5.1 Métodos activos

Los métodos activos estudian el subsuelo a partir del análisis de la propagación de las ondas sísmicas producidas artificialmente sobre el terreno. Por tanto, estas técnicas implican la generación (fuente sísmica), la transmisión y la detección de señales sísmicas (sensores sísmicos).

Las técnicas sísmicas activas pueden clasificarse en:

**3.5.1.1 Refracción** Esta técnica utiliza la refracción de las ondas sísmicas (“P” o “S”) a lo largo de los contactos entre las capas del subsuelo para obtener un modelo de velocidad sísmica. Los datos utilizados para obtener este modelo son los tiempos de llegada de estas ondas en función de la distancia receptor-fuente sísmica. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias

conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción sísmica. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, con la ayuda de perturbaciones artificiales instantáneas o impulsos sísmicos - como un martillo o la detonación de explosivos-, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido (Rosales, 2001). Existen tres tipos de impulsos sísmicos:

### **Fuentes de impacto**

Generalmente son martillos o porras. Como la energía transmitida al suelo por este tipo de fuente no es muy grande, se apilan varias decenas de golpes para modelar mejor las llegadas y suprimir el ruido. También se utilizan otros medios mecánicos, por ejemplo dejando caer un gran peso de una altura de 2 – 3 metros. La energía asociada con cada uno de los golpes depende la energía cinética (**E**) que relaciona la masa del martillo (**m**) y la velocidad aplicada al martillo (**v**), obteniendo  $E = m * v^2$ .

### **Cargas explosivas**

De mayor energía, son usadas especialmente para prospección petrolera. La explosión puede ocurrir en un tiempo de micro a milisegundos, dependiendo de la naturaleza y cantidad del explosivo y, del material que rodea sitio de explosión (Cantos, 1980).

### **Disparos**

Se utilizan balas o cartuchos de fogeo. La energía es mayor que la generada por martillo.

Los registros de cada sensor tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas. Estos son analizados en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sensor desde el punto de disparo, y en la reflexión para obtener información de las ondas que son reflejadas en las diferentes interfaces de suelo, para lo cual es estudiado el sismograma completo.

La refracción permite la detección de la profundidad a basamento y de su relieve, dependiendo de variables como longitud del tendido, energía de la fuente sísmica, velocidades de los suelos.

Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción, son las mismas que se utilizan en óptica:

- Principio de *Huygens*
- Principio de Fermat
- Ley de refracción (o de *Snell*)

Como consecuencia del principio de Huygens y del principio de Fermat, la ley de refracción dice que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada. Para explicar la trayectoria de las ondas en el método de la refracción sísmica, se considera un medio, con velocidad  $c_1$ , que suprayace un medio seminfinito, con velocidad  $c_2$ , mayor que  $c_1$ . Una vez se han generado las ondas en el punto de disparo, éstas empiezan a viajar por el medio superior conformando unos frentes de onda en el espacio.

El frente de ondas refractadas hacia el medio superior se genera cuando los rayos provenientes de la fuente alcanzan en ángulo crítico,  $i_c$ , la interfaz entre los medios. El ángulo refractado tiene  $90^\circ$  con respecto a la normal, de tal manera que el  $\sin i_2 = \sin 90^\circ = 1$ . La refracción a  $90^\circ$  del ángulo crítico, implica que las ondas no se propagan por la capa inferior, sino por el contacto entre ambas capas – es decir por la superficie de refracción - con la velocidad  $v_2$  de la capa inferior, siguiendo la ley de los recorridos mínimos o Principio de Fermat (Boyd, 1999; Masuda, 1981).

La parte de la física que trata los rayos como líneas es llamada óptica geométrica, y está basada en las siguientes suposiciones (Masuda, 1981):

- Los rayos viajan en líneas rectas por el vacío o por un medio homogéneo.
- En el caso hipotético que un rayo se devolviera, lo haría siguiendo la misma trayectoria hasta llegar al punto de origen.
- No hay interacción entre rayos. Los rayos pueden avanzar independientemente.
- Los rayos siguen las leyes de la refracción. Las ondas sísmicas se propagan como un conjunto de rayos a través de las rocas, los suelos, o la litosfera en general.

La suposición general del método de refracción sísmica es:

Las velocidades aumentan con la profundidad: el método no permite identificar capas o estratos de suelo con velocidades inferiores a la superior (“inversiones de velocidad”).

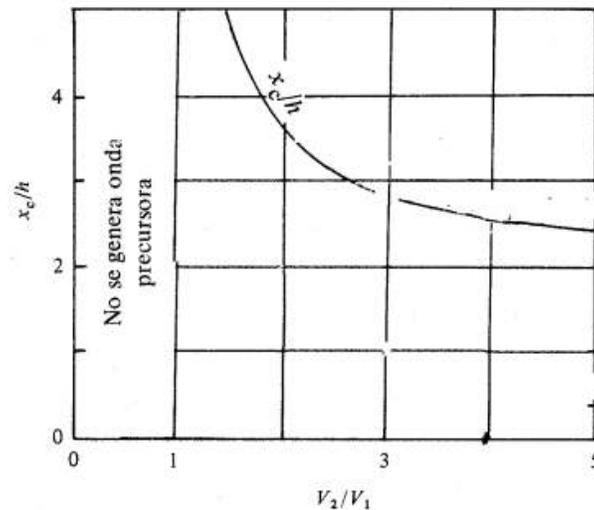
Las curvas tiempo distancia se construyen con los tiempos de llegada de las ondas “P” o “S” a cada uno de los sensores, y la distancia de cada sensor al punto de disparo. Los tiempos de llegada pueden ser leídos directamente en la pantalla de la unidad de adquisición, (o de una impresión realizada desde dicha unidad), o en la computadora; una vez los datos hayan sido transferidos de la unidad de adquisición al computador. Para tener información más detallada del subsuelo a analizar, se realizan tendidos de refracción conjugados, llamados tendido directo, reverso e intermedio. En el primero el punto de disparo se ubica en un extremo del

tendido a una distancia conocida, mientras que en el segundo el punto de disparo se ubica al otro extremo del tendido; en el tendido intermedio, el punto de disparo es colocado usualmente hacia el centro del tendido. Cuando se van a estudiar terrenos muy extensos, o cuando se necesita información muy detallada, se acostumbra hacer tendidos traslapados que permiten modelar mejor la topografía de las discontinuidades.

La distancia crítica  $x_c$ , es aquella medida entre el punto disparo y el sitio donde emerge la primera onda refractada en superficie. Dependiendo de las velocidades de la capa superior, y del refractor – o capa inferior -, y de la profundidad a éste, la distancia crítica puede ser o no menor que la longitud del tendido en observación.

En la Figura 7 se muestra la relación entre el contraste de velocidades de la primera capa  $v_1$  y del refractor  $v_2$ , versus la relación entre la distancia crítica  $x_c$  y la profundidad  $h$ .

Figura 7. Relación entre la distancia crítica y la profundidad



Fuente: Sheriff & Geldart (1991)

A medida que aumenta la relación  $\frac{v_2}{v_1}$  la relación  $\frac{x_c}{h}$  disminuye. Como regla práctica, las longitudes de los tendidos de refracción deben ser mayores que el doble de la profundidad al refractor para observar refracciones sin interferencias indebidas de las ondas “P” o “S” originales (Sheriff & Geldart, 1991).

Una vez construidas las curvas tiempo-distancia ( $t - x$ ) se procede a su interpretación. La tarea principal es identificar las secciones de las curvas que pertenecen a un mismo refractor. El conjunto de puntos que pertenecen a un refractor conforma lo que se conoce como dromocrona. La identificación de las dromocronas es la parte más importante de la interpretación de los datos de refracción sísmica.

Hay algunas características del subsuelo que se pueden prestar para inadecuadas interpretaciones, a saber:

- Un cambio de pendiente de la curva  $t - x$  no significa necesariamente un cambio de refractor, sino que puede significar un cambio de pendiente del primer refractor. (Cantos, 1989).
- Cuando existe un estrato o una capa delgada de suelo cuya velocidad es menor que la de la capa superior, no hay refracción crítica, de tal manera que no habría indicios de su presencia en las primeras llegadas en cada punto de la línea de sísmica. (Sheriff & Geldart, 1991:282).
- Cuando existe una capa demasiado delgada, a pesar de tener velocidades mayores no alcanza a producir primeros arribos por el hecho mismo de ser tan delgada (Sheriff & Geldart, 1991:283, Sarria, 1996).

Cuando por el medio se propagan las ondas sísmicas no es homogéneo, se producen los fenómenos de difracción, dispersión y *scattering* (Cantos, 1973):

- Difracción  
Desvío de los rayos, en cierta extensión, ocurrido cuando se limita parte del frente de ondas (Tipler, 1990).
- Dispersión  
Es la variación de la velocidad de una onda con el cambio de frecuencia. En un medio elástico homogéneo no hay dispersión, pero si la hay en un medio imperfectamente elástico como en la tierra. En refracción sísmica no hay evidencia de que exista dispersión apreciable (Cantos, 1973), excepto cuando se usan explosivos en inmediaciones de la explosión.
- Scattering  
Corresponde a la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas las direcciones. Se produce cuando un frente de ondas choca (Boyd, 1999). Este fenómeno no es mayor para frecuencias altas. Parte de lo que se considera "ruido" en un registro puede deberse a este fenómeno ya que produce energía distribuida al azar en superficie (Cantos, 1973). La disminución de la energía sísmica con la distancia, causada por los tres fenómenos explicados anteriormente, va acompañada de pérdidas debidas a la absorción de la energía, produciendo amortiguamiento. Cuando el impulso sísmico viaja a través de las diferentes capas las altas frecuencias son absorbidas más rápidamente que las bajas frecuencias.

Hay 5 principios generales que conforman la base para la interpretación de un conjunto de datos de refracción sísmica. Dichos principios que se explican a continuación:

- Ley de las velocidades aparentes.

La ley de las velocidades aparentes dice que la velocidad con que aparenta transmitirse una onda en un cierto punto de la superficie del suelo es igual al cociente entre la velocidad superficial y el seno del ángulo de emergencia tomados ambos en dicho punto. Donde el ángulo de emergencia es formado por la onda emergente con la superficie (Cantos, 1973).

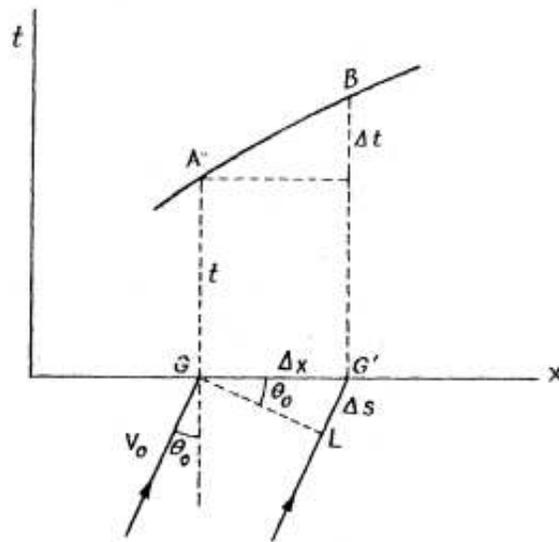
Sea un corte vertical del terreno (Figura 8) y un frente de ondas  $GL$  llegando a la superficie en  $G$ . Considérese dos rayos infinitamente próximos llegando a dos geófonos  $G$  y  $G'$  separados una distancia  $\Delta x$ . Sean  $GA$  y  $G'B$  los tiempos de llegada. La velocidad con que aparente transmitirse los rayos  $G$  y  $G'$  será  $v_a = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ; consideremos adicionalmente que el frente de ondas se desplaza de  $L$  a  $G'$  con su velocidad superficial  $v_0$ , donde  $v_0 = \frac{\Delta s}{\Delta t}$  y como  $\Delta s = \Delta x * \sin \theta_0$ , se obtiene la velocidad aparente  $v_a$  (2)

$$v_a = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\sin \theta_0 \Delta t} = \frac{v_0}{\sin \theta_0} \quad \text{con } v_a > v_0 \quad (2)$$

La velocidad aparente en el punto  $A$ , será la tangente a la dromocrona  $AB$  en el punto  $A$ , ya que  $v_a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , teniendo finalmente que (3):

$$v_a = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Figura 8. Ley de velocidades aparentes



Fuente: Cantos (1973).

- Principios de reciprocidad.

Este principio establece que el tiempo de propagación de una onda sísmica del punto *A* al *B*, es el mismo que el de *B* al *A*. Esto es una consecuencia directa del Principio de Fermat, o del recorrido de tiempo mínimo (Cantos, 1980).

- Principio del tiempo de intercepto en el origen.

Sea un refractor inclinado y supóngase que desde la superficie se efectúan dos tiros y que se registran las ondas en dos puntos; el principio del tiempo de intercepto en el origen dice que si se prolongan las domocronas hasta que cortan el eje de tiempo, los tiempo de intercepto en el origen son iguales (Cantos, 1980).

- Principio de paralelismo.

Este principio permite deducir las domocronas relacionadas con puntos de disparo intermedios entre dos puntos de disparo en los extremos del tendido; o deducir una domocrona con un punto de disparo por fuera de dos puntos de disparo complementarios. Este principio funciona idealmente para refractores horizontales o planos inclinados (Cantos, 1980).

**3.5.1.2 Reflexión** Los métodos de sísmica de reflexión implican el uso de las ondas sísmicas que viajan desde la fuente en la superficie hasta las discontinuidades del subsuelo y vuelven, una vez reflejadas, a los receptores localizados en la superficie (ondas reflejadas). El aislamiento de estas señales reflejadas de otro tipo de ondas y del ruido así como su procesado, permiten obtener una imagen de las principales discontinuidades del subsuelo llamada sección sísmica.

### **3.6 MÉTODOS DE ONDAS SUPERFICIALES**

En los últimos 50 años las mediciones sísmicas de propagación de ondas superficiales han sido muy utilizadas en la ingeniería geotécnica. Anteriormente se empleaban fuentes estacionarias y métodos simples de cálculo para estimar las velocidades de ondas superficiales. Durante el decenio de 1970 hasta 1980, con la llegada de analizadores de señales dinámicas y portátiles, capaces de desarrollar análisis de Fourier, permitieron el uso de fuentes transitorias que redujeron considerablemente el tiempo de estudio, de esta creciente disponibilidad de algoritmos computarizados resulto, entre otros, el avance del método de Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW).

Por medio de la aplicación de métodos de multicanales es posible la combinación de fuentes activas y pasivas, de esta manera, se podría obtener una curva de

dispersión que abarque un espectro mucho mayor de frecuencias. Por otro lado, al utilizar fuentes pasivas, como microtemores, las frecuencias tienden a ser mucho menores y permiten realizar perfiles a profundidades mayores.

### **3.6.1 Métodos activos**

Gracias a estos se registran ondas Rayleigh inducidas con una fuente que oscila con movimientos verticales armónicos, cuando se realizan registros a través de estos métodos, los sensores son ubicados en la superficie, co-lineal a la fuente; la velocidad de la fase se calcula a partir del análisis espectral, son útiles para explorar profundidades de 10 a 20 metros aproximadamente. Para lograr caracterizar mayores profundidades se necesita una fuente con mayor alcance.

Los principales métodos activos son:

#### **3.6.1.1 Técnica de Análisis Espectral de ondas Superficiales (SAWS)**

Este método fue descrito inicialmente para la comunidad de ingeniería de terremotos en 1984. SAWS utiliza una fuente activa, grabando repetidamente por una par de sismómetros de 1 Hz. Los sismómetros son sensores de velocidad vertical, así los perfiles de velocidad de cizalla son analizados en base a la velocidad de fase de la ondas Rayleigh interpretados desde la grabaciones. Las velocidades de fase son derivados puramente de la comparación desde el osciloscopio de amplitud y el espectro diferencial de fase computado desde cada sismómetro activado en la fuente, con una transformada rápida de Fourier.

Mientras los sismógrafos originales no guardan la información y toda la interpretación es hecha en el dominio de la frecuencia, el método SAWS asume que las llegadas más energéticas grabadas son las ondas Rayleigh. Donde el ruido carga la potencia de una fuente artificial, como es común en áreas urbanas, o donde la fase de las ondas de cuerpo, son más energéticas que las ondas de Rayleigh, SAWS no obtendrá resultados confiables.

La velocidad de las ondas Rayleigh no pueden ser separadas de otro tipo de ondas en el dominio de la frecuencia.

#### **3.6.1.2 Técnica de Análisis de múltiples canales de ondas superficiales (MASW)**

Esta técnica fue desarrollada en respuesta a las cortas llegadas de SAWS en presencia del ruido. Las grabaciones simultaneas de 12 o más receptores (1-2 m) para distancias (50 – 100 m) desde un impulso o fuente vibratoria da redundancia estadística para medir la velocidad de fase. Los datos de los múltiples canales se visualizan en un formato de frecuencia variable en el tiempo, lo cual permite la identificación y el rechazo del modo no fundamental las ondas Rayleigh y otro ruido coherente desde el análisis. Es posible adquirir grabaciones donde prevalece el modo fundamental de Rayleigh. Además, intenta realizar dos perfiles para

anomalías laterales en la velocidad de cizalla, invirtiendo muchas grabaciones a través del perfil. Como un perfil representa mucho esfuerzo y costos altos, similar al que se necesita para realizar reflexión de alta resolución, como una fuente larga que será movida a través de toda la traza. La técnica se basa en la propiedad de dispersión de las ondas de superficie para calcular la velocidad de fase de estas ondas a distintas frecuencias.

### **3.6.2 Métodos pasivos**

Son métodos geofísicos que se basan fundamentalmente en el análisis de señales provenientes de microtemblores, no se requieren de explosiones y el objetivo principal es evaluar indirectamente la conformación del suelo. Generalmente se usan arreglos bidimensionales sobre la superficie. Puede ser solo la componente vertical o los tres componentes. El análisis de estos datos se puede realizar con métodos de dispersión de ondas superficiales, o bien características de las capas más superficiales como son: la frecuencia fundamental y la amplificación asociada (Flores-Estrella et al, 2004). Los principales métodos pasivos:

#### **3.6.2.1 Técnica de Nakamura H/V**

El método propuesto por Nakamura en 1989 para estimar la función de transferencia aproximada de las capas superficiales del suelo supone que el ruido de los microtemblores está compuesto por varios tipos de ondas. El método pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que los microtemblores en la base rocosa son similares horizontal y verticalmente.

#### **3.6.2.2 Técnica de auto correlación espacial (SPAC)**

Esta técnica está basada en la teoría desarrollada por Aki (1957) para comprender la relación entre la correlación temporal y espacial de las ondas sísmicas. Usando esta técnica se logra obtener la estimación cuantitativa de la velocidad de la onda "S", siendo compatible con información previa sobre la profundidad de la roca y la geología del área geográfica considerada.

### **3.6.3 Métodos híbridos**

Resultan de una combinación entre los métodos Activos y Pasivos.

**3.6.3.1 Sísmica de Microtemblores (ReMi)** El método de refracción por microtemblores (ReMi) fue propuesto por Louie en el 2001 y es un método de altísimo potencial en aplicaciones urbanas e industriales para la aplicación en la caracterización de sitios y evaluación de terreno ya que combina la actividad urbana y la facilidad de adquirir microtemblores con la simplicidad operacional de la técnica SAWS y la exactitud de la técnica MAWS. Para grabar microtemblores en áreas urbanas en un arreglo lineal por medio de geófonos, el método logra

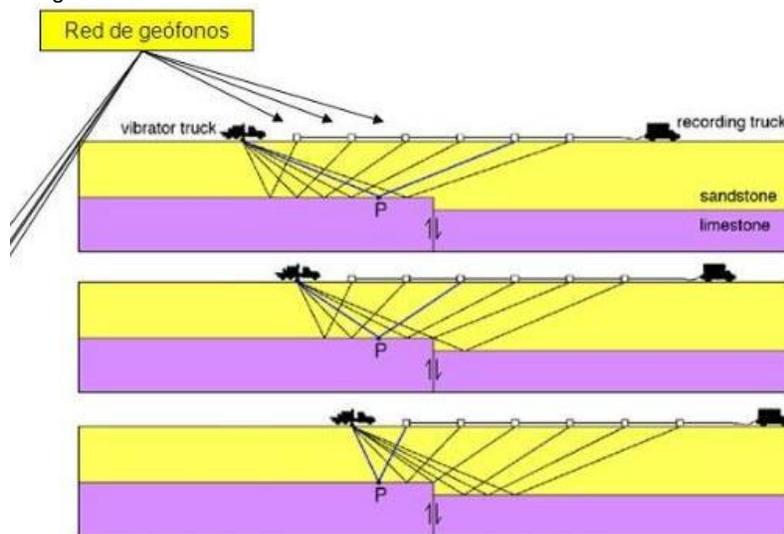
colectar los datos rápida y fácilmente sin necesidad de consumir tiempo en fuentes fuertes como en SAWS y MAWS. También es particularmente útil en áreas donde no se puede usar explosivo o donde inversiones de velocidades limitan la aplicación de métodos tradicionales como refracción convencional y reflexión. Utiliza como fuente pasiva el ruido ambiental, pero en los lugares en los cuales no hay suficiente ruido, se emplean técnicas como correr a lo largo de la línea de geófonos, lanzar y recoger objetos pesados al principio, el medio y el fin de la línea.

ReMi es un nuevo método para mediciones in situ de perfiles de velocidad de ondas de corte  $V_s$  usando registros de ruido ambiental. Para la adquisición de datos se usa el mismo sismógrafo convencional y geófonos verticales de onda "S" usado en estudios de refracción. Las ondas "S" pueden ser estimadas matemáticamente en función de un mínimo conocimiento del sitio a investigar o medidas de refracción hechas con el mismo arreglo.

Las ventajas de ReMi, desde un punto de vista de adquisición sísmica son: requiere solamente de equipos estándar de refracción, no requiere de una fuente de energía de onda específica o fuerte y trabaja mejor en ambientes con fuerte ruido superficial, elemento de disturbio en sísmica estándar (Figura 9).

La técnica de refracción por microtremores (ReMi) usa un tendido y equipo de registro, similar al de la prueba de refracción sísmica, se analizan las ondas superficiales con un amplio rango de frecuencias con una transformada en 2D de lentitud - frecuencia (p-f), este hecho separa las ondas Rayleigh de otras ondas sísmicas y permitir el reconocimiento de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes.

Figura 9. Tendido de geófonos



Fuente: Cantos (1973)

## Adquisición de datos y equipos

En la adquisición de datos de ondas superficiales, se debe tener en cuenta el uso de geófonos individuales y la implementación de tendidos lineales de 12, 24 o 48 canales. Los geófonos más utilizados tienen una configuración vertical y una frecuencia de resonancia entre 8-12 Hz, para abarcar un rango de velocidades de fase de ondas superficiales, la configuración frecuencial debe estar entre 2-26 Hz. Dependiendo de los fines del estudio, el espaciamiento entre los geófonos puede llegar hasta los 20 m, es decir, mientras mayor sea la distancia de separación, mayor será la profundidad del estudio hasta un máximo de 100 m, pero la resolución será de menor calidad; por otro lado, si la separación es corta, la penetración sísmica será menor, pero la resolución será alta. De forma general se emplean sismógrafos de 24 bit, adquiriendo de 5 a 10 registros con una duración de 15 a 30 segundos cada uno.

## Procesamiento

El procesamiento de datos ReMi involucra tres pasos fundamentales:

### 1. Análisis Espectral de Velocidades (p-f)

El primer paso del método ReMi, en cuanto al procesamiento de datos, esta observación se basa en la transformada bidimensional lentitud-frecuencia  $p - \tau$  a los registros de campo, que permitirá la separación de las ondas de cuerpo, aire y ruido de las ondas Rayleigh, además, la identificación y la selección de la curva de dispersión de la onda Rayleigh (con velocidades de fase verdadera), la cual se obtiene de la combinación de muchas llegadas durante un largo periodo de tiempo. (Louie, 2001). Esta toma una sección de registros grabada a partir de sismologías múltiples en función de la distancia y el tiempo  $(x, t)$ , transformándolas en amplitudes relacionadas estrechamente con el parámetro de rayo  $p$  (el inverso de la velocidad aparente) y con una intercepción de tiempo  $\tau$ . Con objetivos similares a un espectro de Fourier bidimensional o un análisis de frecuencia - numero de onda  $(f-k)$ . La transformada  $p - \tau$  fue utilizada, como paso inicial al análisis de velocidades de las ondas "S" refractadas. (Louie, 2001)

La transformada  $p - \tau$ , es una integral de línea de un registro sísmico  $A(x, t)$  en una distancia  $x$  y un tiempo  $t$  determinado (4).

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, t = \tau + px) dx \quad (4)$$

donde la pendiente de la línea  $p = \frac{dx}{dt}$  es el inverso de la velocidad aparente  $V_s$  en la dirección de  $x$ . En la práctica,  $x$  es discretizada en intervalos de  $\Delta x$  en un espacio finito  $dx$ , siendo  $x = jdx$  ( $j$  es un entero). Igualmente, el tiempo es discretizado con  $t = idt$ , obteniendo una forma discreta de la transformada  $p - \tau$  para negativos y positivos  $p = p_0 + 1$  y  $\tau = kdt$  llamado *slanstack* (5)

$$A(p = p_0 + \Delta p, \tau = k \Delta t) = \sum_{j=0}^{nx-1} A(x = j \Delta x, t = \Delta t = \tau + p x) \quad (5)$$

Comenzando con un  $p_0 = -p_{\max}$ , donde  $p_{\max}$  se define el inverso de la velocidad mínima que podría encontrarse, usualmente configuraba a 200 m/s, pero, en suelos particularmente blandos se pueden apreciar valores de 100 m/s o menos  $\Delta p$  es efectivamente llamada una o dos veces  $n \Delta p$ , aquí  $\Delta p$  puede variar de 0,0001 a 0,0005 s/m y se establece para cubrir el intervalo desde  $-p_{\max}$  hasta  $p_{\max}$  en  $2np$  eslabones de lentitud. Esto analizaría la energía de propagación en ambas direcciones, a lo largo de la línea de receptores de refracción. Las amplitudes de tiempo de  $t = \tau + p x$  que disminuyen entre los puntos de tiempo muestreados, son estimados mediante una interpolación lineal (Louie, 2001). Los tiempos de intercepción después de aplicar la transformada son simplemente tiempos de llegada a uno de los extremos del tendido.

El siguiente paso toma cada una de las trazas  $p - \tau$  en  $A(p, \tau)$  y calcula su transformada de Fourier compleja  $F_a(p, f)$  en la dirección de  $\tau$  o tiempo de interceptado (Louie, 2001) (6).

$$F_a(p, f) = \int_{\tau} A(p, \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (6)$$

siendo la transformada de Fourier discreta con  $f = m \Delta f$  (7)

$$F_a(p, f = m \Delta f) = \sum_{k=0}^{nt-1} A(p, \tau = k \Delta t) e^{-i2\pi m \Delta f k \Delta t} \quad (7)$$

A su vez, en la práctica la transformada de Fourier rápida (FFT) es matemáticamente equivalente, pero más eficiente. Es de hacer notar que la ecuación anterior, representa una transformada en una sola dimensión y por lo tanto no afecta la lentitud  $p$ . Para desarrollar una buena resolución en la frecuencia se requieren tiempos de grabación menores a los que son implicados típicamente en un trabajo de sismica de refracción (Louie, 2001).

El espectro de potencia  $S_a(p, f)$  es la magnitud cuadrada de la transformada de Fourier compleja (Louie, 2001) (8):

$$S_a(p, f) = F_a(p, f) * F_a(p, f) \quad (8)$$

donde "\*", representa la conjugada compleja. Este método agrupa dos transformadas  $p - \tau$  del registro, pertenecientes a las dos direcciones de adquisición, tanto el disparo (hacia adelante), como el contra disparo (inverso). Para sumar la energía de ambas direcciones en un eje de lentitud, representativo del valor absoluto de  $p$ ,  $|p|$ , la lentitud del eje se dobla y se suma cercano a  $p = 0$  (Louie, 2001) (9):

$$S_a(|p|, f) = [S_a(p, f)]_{p \geq 0} + [S_a(-p, f)]_{p < 0} \quad (9)$$

Ello finaliza la transformada de distancia-tiempo ( $x, t$ ) al espacio p-frecuencia ( $p - f$ ). El parámetro de rayo  $p$  es la componente horizontal de la lentitud. En el análisis de varias grabaciones de refracción mediante el uso de microtremores, la fórmula de los registros  $pf$  individuales, son sumados punto por punto en la siguiente función resumida (10):

$$S_{\text{total}}(|p|, f) = \sum_n S_{\text{an}}(|p|, f) \quad (10)$$

En consecuencia, el análisis lentitud-frecuencia produjo un registro de la potencia espectral total en todas las grabaciones de un sitio, graficando en los ejes de  $p - f$  pueden ubicarse las tendencias donde la fase tiene una potencia significativa, entonces la selección de los *picks* de lentitud-frecuencia, podrían ser graficados en un diagrama típico de periodo-velocidad para los análisis de dispersión (Louie, 2001).

En el resultado al aplicar la transformada, las fases dispersivas muestran la curva de los modelos normales en capas superficiales de baja velocidad: descendiendo desde las velocidades más altas (que indican menor lentitud) ubicadas en zonas de baja frecuencia, hasta velocidad bajas (que indican mayor lentitud) en frecuencias más altas. La pendiente, representa el análisis de los espectros de lentitud-frecuencia, ya que otros tipos de ondas generadas a raíz de los registros de microtremores (como de cuerpo o de aire), no crean tal pendiente. Incluso, si la mayoría de la energía en un registro sísmica es otra fase diferente a las ondas Rayleigh, el análisis  $p - f$  mostrara dicha energía (Louie, 2001).

## 2. Selección de la dispersión de la fase-velocidad Rayleigh

Este análisis únicamente agrega un cálculo espectral de la relación de la potencia a la técnica de McMechan y Yedlin (1981), en tal sentido se da una normalización espectral de los registros de ruido (Louie, 2001). Ellos desarrollaron otro enfoque para el análisis de las ondas superficiales, que consiste en transformar los campos de ondas de los datos, al dominio lentitud-frecuencia ( $p - f$ ), donde la curva de dispersión puede ser escogida directamente. El proceso envuelve dos transformaciones lineales: un slant-stack, seguido de una transformada de Fourier en una dimensión (1-D) (McMechan y Yedlin, 1981)

La potencia promedio sobre las lentitudes puede ser diferente en ordenes de magnitudes de una frecuencia a otra (Louie, 2001). Este método toma una tasa espectral  $R(|p|f)$  de la potencia de cada combinación ( $p - f$ ) en contra de la potencia promedio alrededor de todas las lentitudes, en frecuencias con imágenes ( $p - f$ ) individuales  $S_A(|p|f)$  o en una imagen total (11), así que:

$$R_a(|p|f) = \frac{S(|p|f)_{np}}{\sum_{l=0}^{np-1} S(|p|=ldp, f)} \quad (11)$$

Donde  $np$  es la mitad del número original de pasos de lentitud  $2np$ . En la mayoría de los casos, la imagen de la tasa espectral, claramente localiza la curva de

dispersión. Los *picks* no se hacen en frecuencias sin un pico definido en la tasa espectral, o en donde no aparezca una onda superficial dispersiva identificable, frecuentemente por debajo de 4 Hz, y por arriba de 14 Hz. Comúnmente, las imágenes *p – f* muestran directamente la velocidad promedio a 30 m de profundidad, a partir de las velocidades de fase de la tasa de un pico fuerte a los 4 Hz, sitios suaves, o más cerca de 8 Hz, áreas más rígidas (Louie, 2001).

La selección se hace a lo largo de una envolvente de baja velocidad, bordeando la energía que aparece en la imagen de *p – f*. Para limitar la envolvente en las velocidades de fase, es necesario hacer tres "picks" o puntos en cada frecuencia: Primero, en una velocidad de fase baja, donde la tasa espectral comienza a separarse de las tasas bajas de ruido incoherente; en segundo, en la velocidad que mejor considere conveniente el intérprete, en la cual la proporción sea mucho mayor, y tercero, en una zona de alta velocidad en la cima del pico de la tasa espectral, que puede estar centrada en una velocidad aparente por encima de una velocidad de fase verdadera (Louie, 2001).

Como el mayor modo de las ondas Rayleigh posee velocidades de fase por encima de las que tienen modo fundamental, la técnica de sismica de microtemores produce las velocidades con modos fundamentales. Los modos mayores pueden aparecer como tenencias de dispersión separadas en las imágenes *p – f*, si son lo cercanamente energéticas, como las fundamentales (Louie, 2001).

El *aliasing* espectral contribuirá a la apariencia de artefactos en las imágenes de tasa espectral lentitud-frecuencia. La pendiente de artefactos en las imágenes *p-f*, está en una dirección opuesta a la dispersión del modo normal (Louie, 2001). Este punto es clave a la hora de realizar una correcta selección de la curva de dispersión.

### 3. Modelado de la velocidad de la onda de cizalla

El método de sismica de microtemores sigue modelos interactivos de los datos de dispersión de modo normal, escogidos de las imágenes *p – f*, con un código adaptado de Saito por Yuehua Zeng, dicho código produce resultados idénticos a los códigos del modelo que siguió Xia et al (1991), dentro de sus procedimientos de inversión. El modelo itera sobre la velocidad de fase de cada periodo, reporta cuando una solución no ha sido encontrada dentro de los parámetros de iteración, y puede modelar inversiones de la velocidad con la profundidad (Louie, 2001).

Un intérprete puede interactivamente estimar, además, la máxima profundidad de la velocidad, y si los datos pueden excluir las transiciones de la grandes velocidades justo por debajo de esta profundidad. Debido a que el método de sismica de microtemores no depende de una inversión de las dispersiones escogidas para la estructura de la velocidad, la parte de la técnica del modelo seguido es la más subjetiva, de acuerdo con las habilidades y experiencias del intérprete (Louie, 2011).

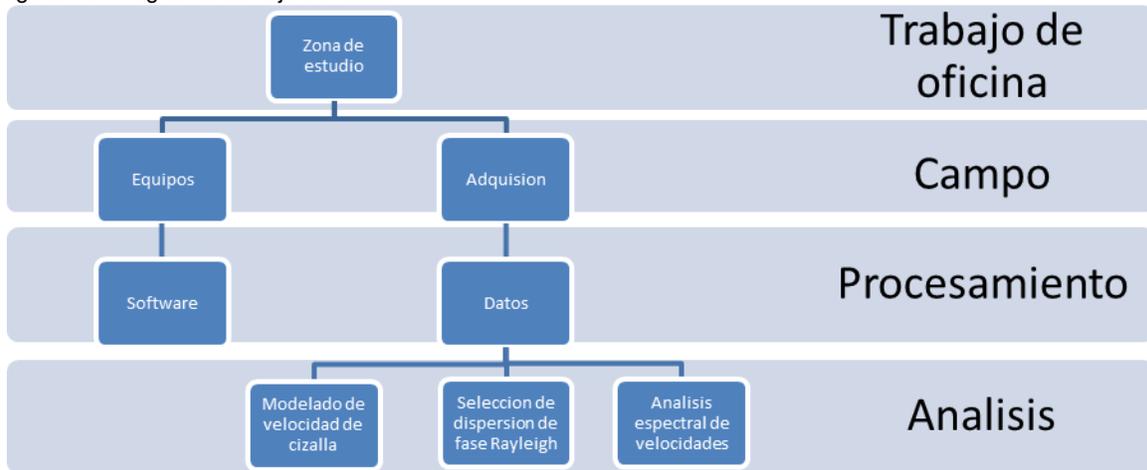
Un método sencillo, que es más independiente del observador que el desarrollado de una serie de modelos canónicos, es ajustar los modelos a las velocidades altas y bajas de los *picks* de dispersión. Este procedimiento generara perfiles de velocidad extremas en los límites de velocidad permitidos por los datos de dispersión (Louie, 2011).

Si se realizaron *picks* de dispersión en los modos más altos de la onda de Rayleigh, entonces estos se pueden modelar con los códigos empleados. Otro problema para modelar las curvas de dispersión de Rayleigh, es la falta de información de las velocidades de onda "P" o las densidades. Cuando esto ocurre, se asume la relación de Poisson de 0.25, el cual es incierto en los primeros metros del subsuelo. No obstante, los experimentos que se han realizado usando la herramienta de modelado interactiva, muestran que aunque hayan grandes cambios en el módulo de Poisson o en la densidad, las velocidades de cizalla modeladas solo cambiaran menos de un 10% en el proceso de ajuste del espectro de velocidad de la onda de Rayleigh. (Louie, 2001).

## CAPITULO 4. METODOLOGÍA.

Para realizar el proyecto, fue indispensable diferenciar las actividades de las diferentes etapas necesarias en su desarrollo, se encontró como se muestra en la Figura 10, que son indispensables las siguientes etapas:

Figura 10. Diagrama de flujo de fases



### 4.1 FASE DE TRABAJO DE OFICINA

En la cual se conforma el equipo de trabajo y se documenta el trabajo desde el punto de vista teórico y sus aplicaciones en el uso de los equipos.

#### 4.1.1 Análisis de la información

En la etapa inicial del proyecto consiste en la revisión bibliográfica de los principios básicos de los equipos a utilizar en los métodos de refracción y refracción por microtemores; estudios previos realizados con el método de refracción por microtemores y los programas que se emplean en el procesamiento de los datos y posibles resultados que se esperan obtener.

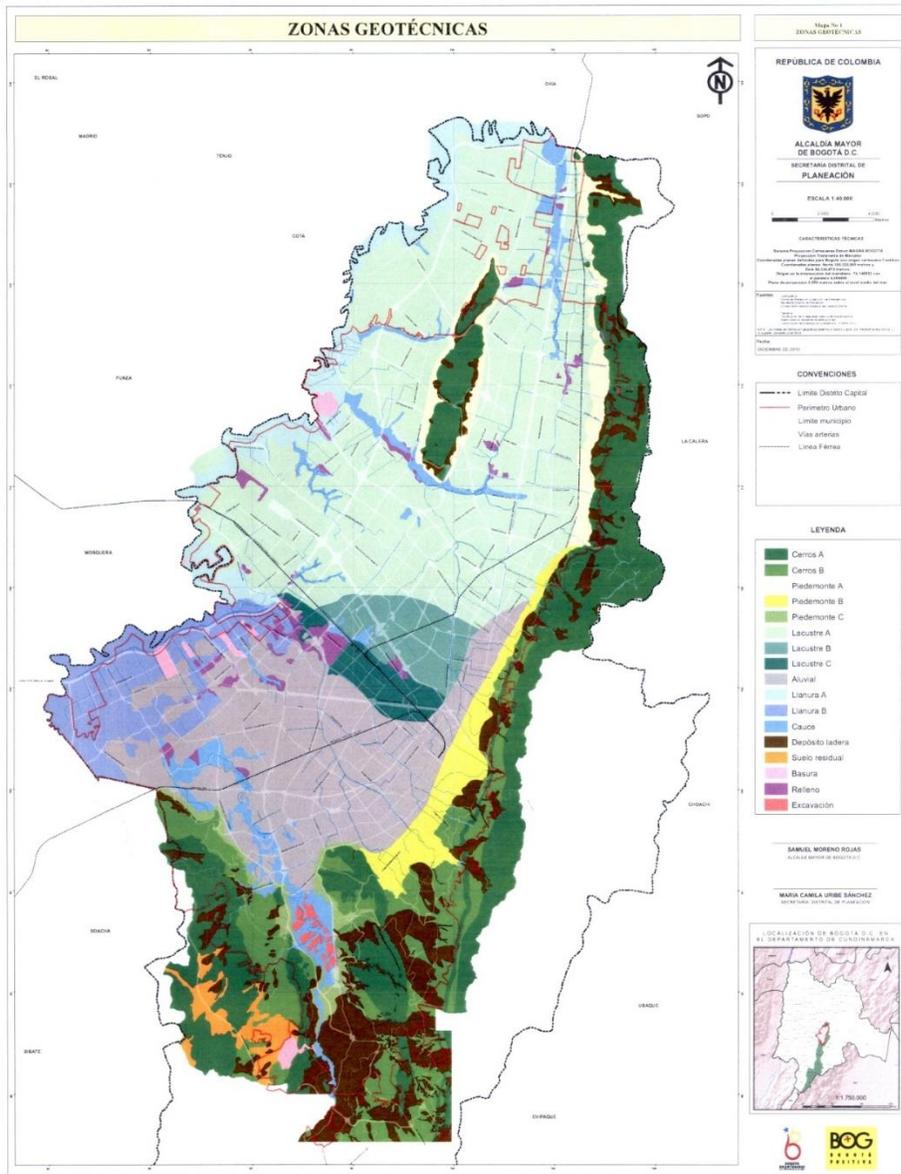
También se revisará la cartografía de las zonas de estudio, donde se tendrá en cuenta: la geología local y regional, desarrollo urbanístico en términos económicos y/o sociales y de esta forma poder ubicar los perfiles en lugares de importancia estratégicos.

Se cuenta con mapas a escala 1:40.000 de la microzonificación sísmica de Bogotá establecida por del Decreto 523 de 2010 el cual nace de la necesidad de actualizar el reglamento NSR-10 (Reglamento Colombiano para la Construcción

Sismo Resistente) (Mapa 4) y determinar la microzonificación sísmica teniendo en cuenta los estudios técnicos de soporte realizados por el FOPAE en su momento.

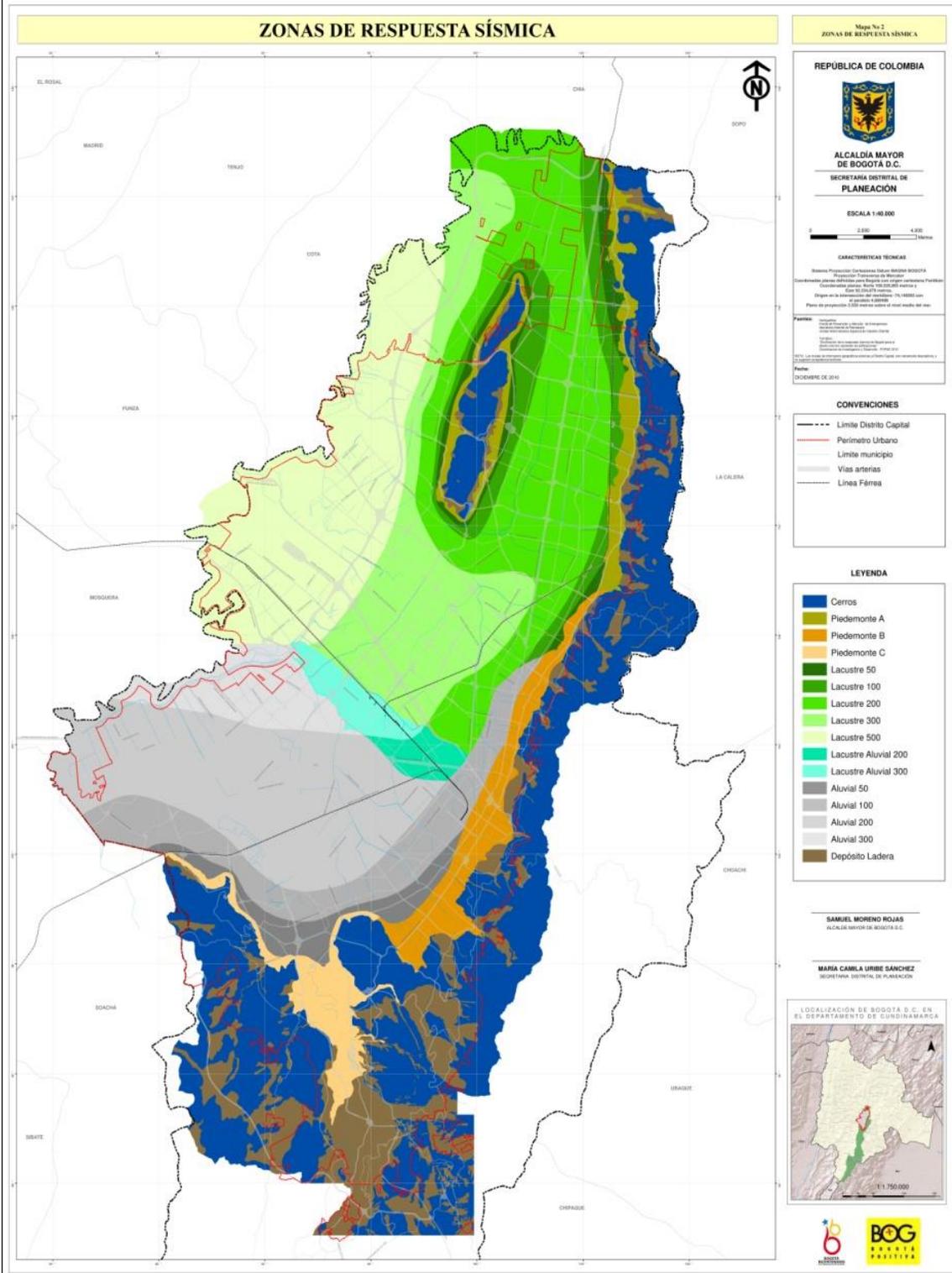
Las obras que se construyan o aquellas que sean ampliadas, adecuadas, modificados en forma tal que conlleven intervención estructural, o que sean objeto de reforzamiento estructural o rehabilitación sísmica, deben diseñarse y construirse dependiendo de la ubicación en los planos denominados Zonas Geotécnicas y Zonas de respuesta Sísmica (Mapa 5).

Mapa 4. Mapa de Zonas Geotécnicas



Fuente: Secretaría Distrital de Planeación, 2010

Mapa 5. Mapa de Zonas de Respuesta Sísmica.



Fuente: Secretaría Distrital de Planeación

#### **4.1.2 Selección del Sitio de Medición**

La versatilidad del equipo permite realizar los registros en diversos sitios de la ciudad, siendo ideales debido a su amplia distribución: parques, jardines, separadores viales en pasto y canchas deportivas. En ambientes extra urbanos deben seleccionarse locaciones en las cuales sea posible acoplar el sensor y que cumplan con un cierto número de criterios de selección que son listados a continuación para la selección del sitio de registro de vibraciones:

1. La superficie donde se acoplará el sensor debe estar libre de Asfalto o Concreto.
2. No se deben realizar mediciones en terrenos cercanos a maquinarias en funcionamiento que generen ondas de bajas frecuencias.
3. No se deben realizar mediciones en las cercanías a edificios altos, los vientos fuertes pueden inducir vibraciones de bajas frecuencias en las bases de la construcción, capaces de alterar la calidad de los registros.
4. Al realizar mediciones en la cercanía de vías, éstas deben ser planas.
5. Si se realizan mediciones en las cercanías a vías el tráfico en ellas debe ser lo más continuo posible, de tal forma que los registros no contengan señales transitorias.
6. Evitar cercanía con cuerpos de agua (Louie, 2001)
7. Lugares con composiciones geológicas diferentes. Esta condición se propone para la investigación actual, no es obligatorio.

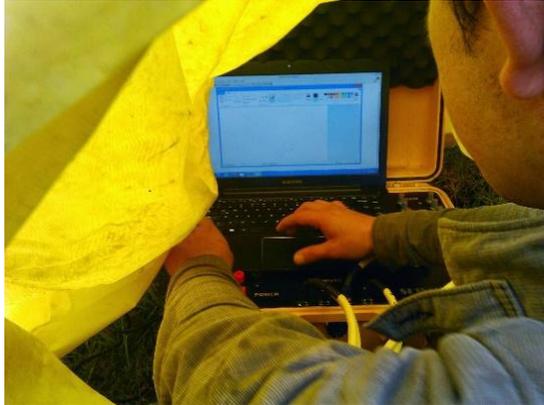
#### **4.2 FASE DE CAMPO**

Esta fase se desarrolló en dos etapas, el 20 de Septiembre de 2014 se realizó la toma de datos en la Avenida Circunvalar y 21 de Marzo de 2015 en el Parque Central Simón Bolívar.

##### **4.2.1 Equipos**

Para realizar la recolección de los datos se utilizan equipos comunes de sísmica de refracción, como los que se usan en la identificación de las ondas "P". Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el equipo SEIMEX S/N 0002012003, este tiene puertos especializados para recibir las señales enviadas por los 16 geófonos; a cada geófono le corresponde un canal y sus señales son filtradas y digitalizadas de acuerdo con las opciones definidas posteriormente. Adicional, el equipo va conectado a un computador portátil (Figura 11) que permite digitalizar los datos.

Figura 11. Computador portátil



Fuente: La investigación

Comúnmente se usan cables (Figura 12) para conectar los geófonos (Figura 13). Cada cable contiene a su vez cableado para llevar la señal de cada geófono a la unidad de adquisición; cada uno de estos se llama canal.

Figura 12. Cables



Fuente: La investigación

Figura 13. Geófono RT-Clark



Fuente: La investigación

Para medir la distancia de los geófonos se utiliza un decámetro (Figura 14) y para verificar sus coordenadas se utiliza un navegador GPS (Figura 15).

Figura 14. Decámetro



Fuente: La investigación

Figura 15. Dispositivo GPS



Fuente: La investigación

#### 4.2.2 Adquisición

Louie (2001) recomienda que los registros sean de una duración de 15 a 30 segundos. La longitud del tendido tiene efecto en la profundidad del muestreo, esta es la profundidad en la cual se puede resolver y precisar las velocidades de onda de cizalla. La máxima profundidad de resolución es de casi un tercio a un medio de la longitud del arreglo. La longitud del arreglo total puede variar de 91.44 m a 182.88 m. En este caso de 120 ,112 y 60 metros por tendido lo que nos asegura una precisión de 15% en las velocidades hasta una profundidad de 30m a 60m.

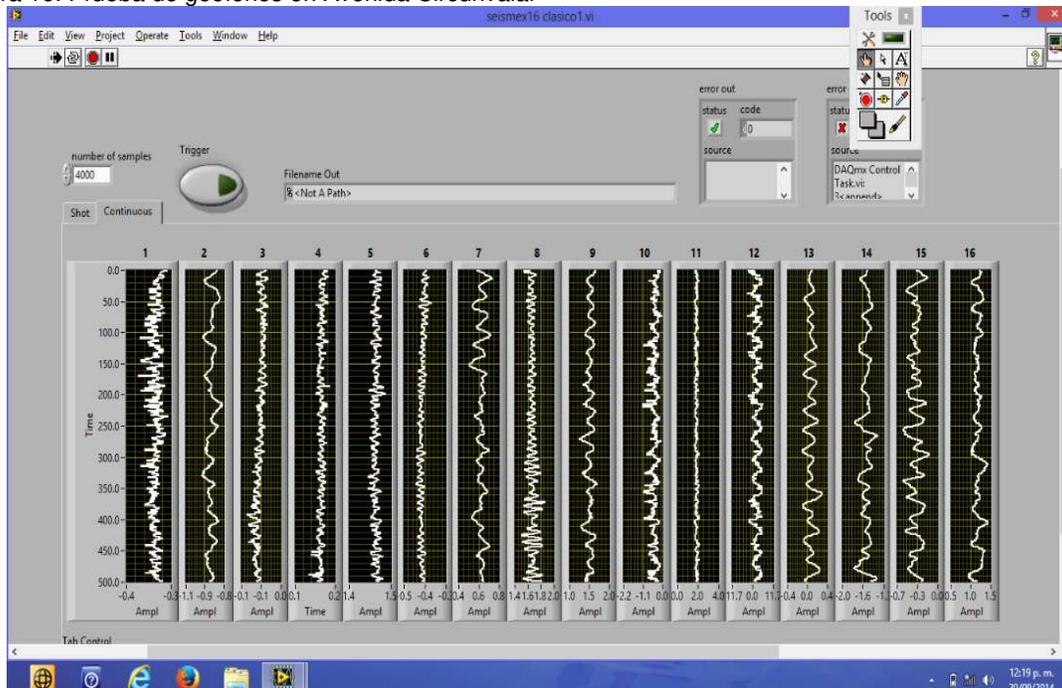
Se recomienda adquirir de 5 a 10 registros de ruido ambiental y cada registro debe tener 12 ó 24 canales con un intervalo de muestreo de 0.002 segundos para estudios de ondas de cizalla superficiales. En este caso se adquirieron entre 10 a

15 registros de ruido ambiental con una duración de 30 segundos por registro para cada tendido y 16 canales con un intervalo de muestreo de 0.002 segundos. Se espera por la presencia de una buena fuente de ruido como camiones pesados y alto flujo vehicular. En algunos momentos se tornaba escaso así que se generó el ruido con martillos (Lote, 2001), convirtiendo el método en una combinación de sísmica pasiva y activa, aunque mucho menos invasiva y destructiva que la sísmica convencional.

Teniendo en cuenta lo anterior, se busca un lugar donde exista una distancia de 120 metros, ya que esta es la distancia que alcanza el largo del tendido, entre cada geófono existe una distancia máxima de 8 metros. La estación con el equipo portátil se sitúa en la mitad y partir de esta se despliegan 8 geófonos a ambos lados.

Los geófonos se entierran en la tierra para que logren capturar el ruido generado por el tránsito de los vehículos que transitan por la Avenida Circunvalar y la Avenida Carrera 68 con Calle 53, al tener todo en posición se realizan pruebas uno por uno de los geófonos (Figura 16) para asegurarse que están conectados y listos para empezar la toma de datos con el software LabView, se establecen los parámetros de adquisición como la ubicación donde se van a guardar los datos, nombre del archivo, intervalo de muestro y tiempo de registro.

Figura 16. Prueba de geófonos en Avenida Circunvalar



Fuente: La investigación

Para el tendido en la Avenida Circunvalar (Mapa 1), el tendido se hace sobre el mismo lugar, se realizan cambios en la configuración de la distancia entre

geófonos, primero a 8 metros y luego a 4 metros de distancia, así que la segunda prueba queda con un tendido reducido a 60 metros; y la implantación de una fuente de ruido (martillo) al inicio y final del tendido.

Para los datos del Parque Central Simón Bolívar se realizaron 4 tendidos en forma de cuadrícula como se muestra en el Mapa 2 que fueron modificados de acuerdo al espacio disponible, las dos verticales se hicieron a 8 metros y las dos horizontales a 7 metros.

## 4.2.3 Procesamiento

### 4.2.3.1 ReMi

Para identificar el procesamiento en los dos lugares de estudio es necesario entender el orden de cada toma. Con el fin de lograr esto, a continuación se muestra la tabla resumen del trabajo a desarrollar en el capítulo.

Tabla 1. Distribución de muestras.

Avenida Circunvalar			Parque Central Simón Bolívar		
Nombre	Tendido	Fuente	Nombre	Tendido	Fuente
Muestra 1	120 m	<i>Both</i>	Muestra 1	120 m	<i>Both</i>
Muestra 2	120 m	<i>Forward</i>	Muestra 2	110 m	<i>Both</i>
Muestra 3	120 m	<i>Reverse</i>	Muestra 3	110 m	<i>Both</i>
Muestra 4	60 m	<i>Both</i>			
Muestra 5	60 m	<i>Forward</i>			
Muestra 6	60 m	<i>Reverse</i>			

### Muestra 1

A continuación se explica cada uno de los procedimientos que se realizan para los datos ReMi para la Avenida Circunvalar-Muestra 1.

Figura 17. Lugar de estudio. Avenida Circunvalar

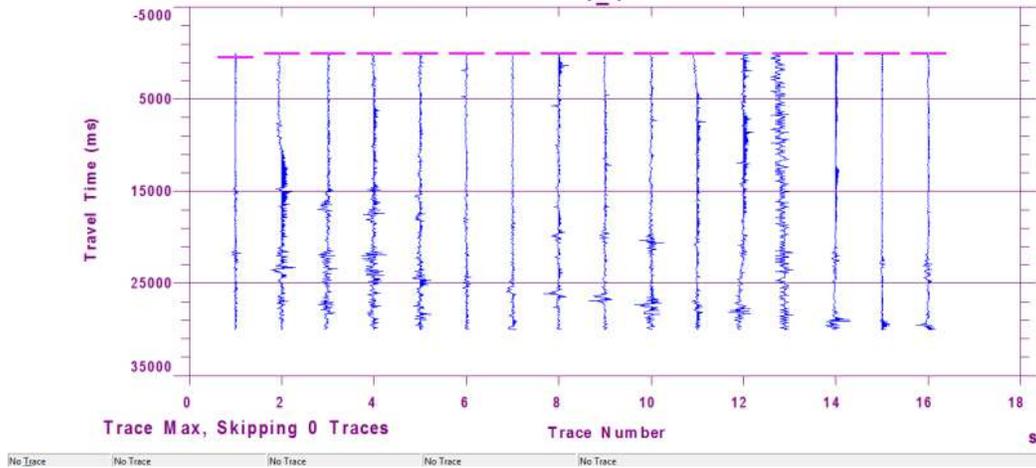


Fuente: La investigación

## Interpex- IXSeg2egy

El primer software a utilizar se llama Interpex- IXSeg2egy que permite la visualización de archivos de datos sísmicos y transformación de formatos. Está diseñado para importar varios formatos de datos .lvm, los cuales son los archivos que exporta el software LabView y están representados en código ASCII, en filas y columnas con la información obtenida de las trazas sísmicas, y los convierte a archivos SEG-Y, así como los formatos de SEG -2, que están diseñados para almacenar en código binario todo o parte de procesos sísmicos en campo, de tal manera, su estructura está conformada por una cabecera y la descripción de las trazas sísmicas realizadas (Figura 18).

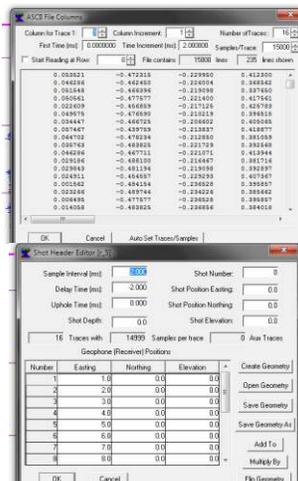
Figura 18. Datos .LVM en Interpex- IXSeg2egy. Avenida Circunvarlar- Muestra 1



Fuente: La investigación

En la pantalla se establece la configuración con la que se dejó el intervalo de información de los datos para este caso 0,002 ms (Figura 19).

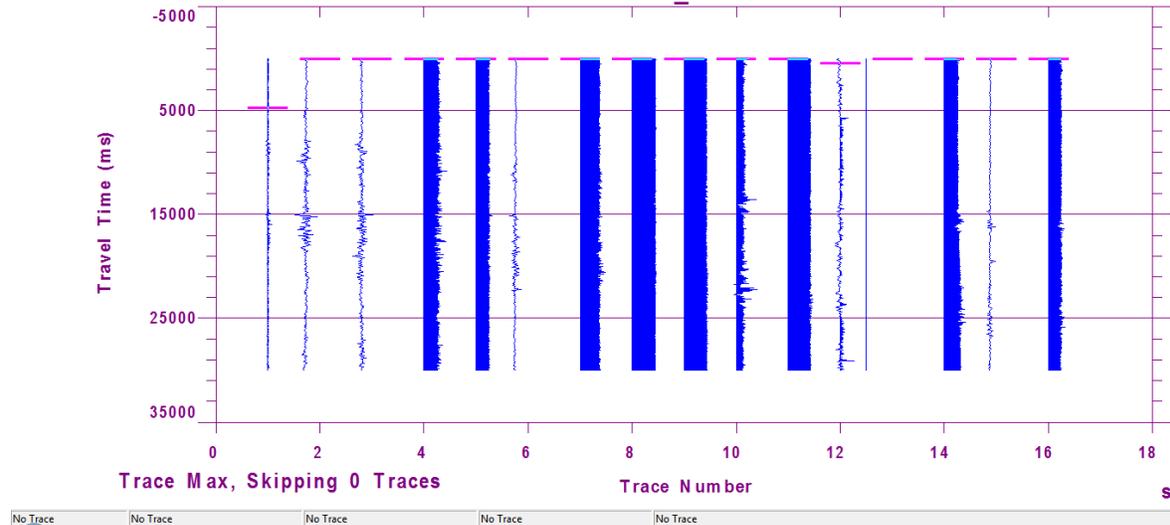
Figura 19. Configuración de datos. Avenida Circunvarlar- Muestra 1



Fuente: La investigación

La información en los geófonos antes de remover el DC (Corriente Directa) se ven de esta manera (Figura 20):

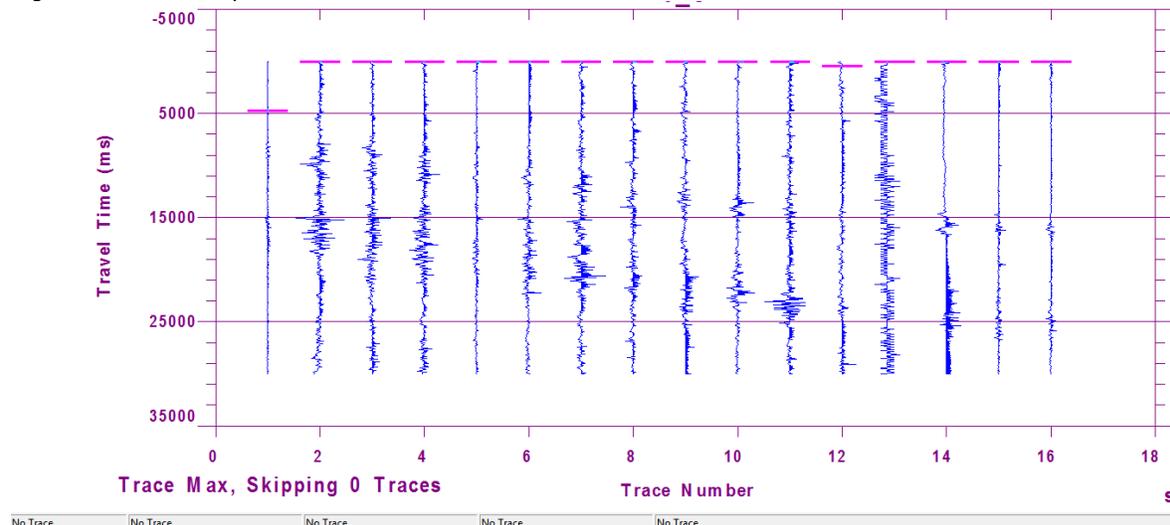
Figura 20. Datos sin remover DC. Avenida Circunvalar- Muestra 1



Fuente: La investigación

El software calcula el valor promedio de DC en cada traza y luego resta ese valor de cada una con el fin de eliminar el ruido de alto nivel. Luego se ven así (Figura 21):

Figura 21. Datos después de remover DC. Avenida Circunvalar-Muestra 1



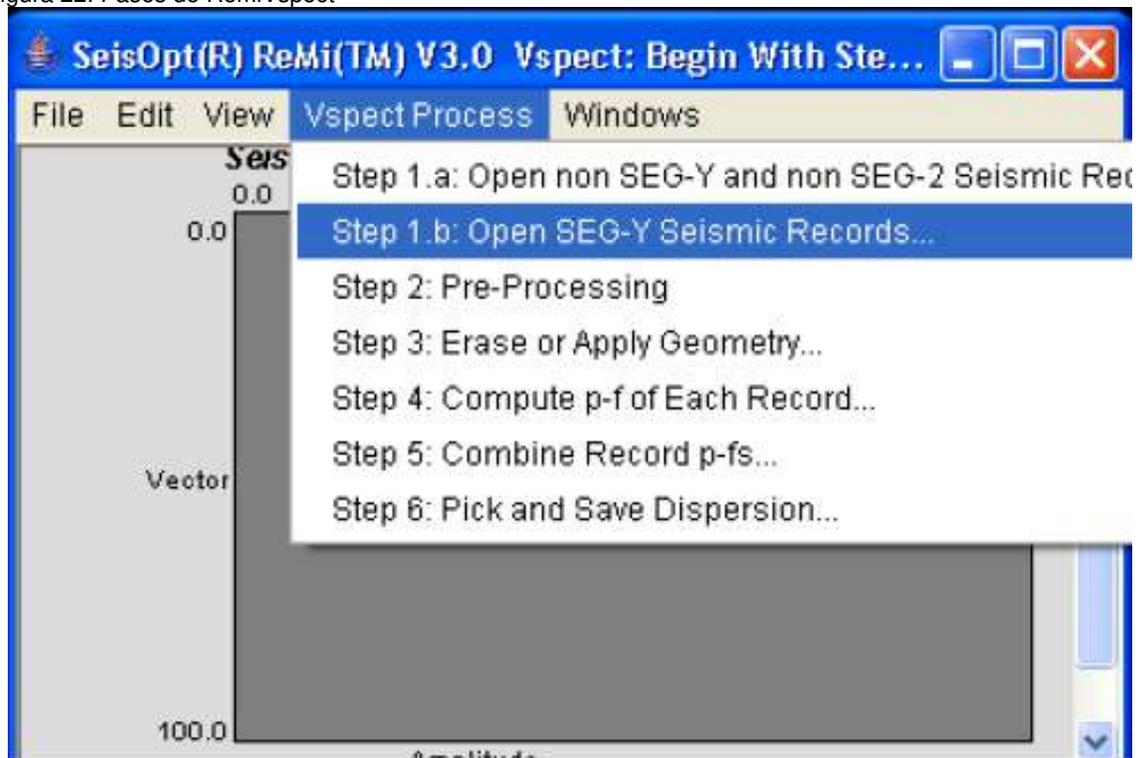
Fuente: La investigación

### RemiVspect

A continuación se muestra en imágenes el procesamiento de los datos sísmicos en el software que se utiliza para la interpretación de la información adquirida en la Muestra 1 – Avenida Circunvarar. Esta corresponde a un tendido de 16 geófonos con una distancia de 8 metros entre ellos, en este se utiliza como fuente el ruido ambiental del entorno (vehículos, bicicletas, personas).

Este módulo permite seleccionar el *picking* en la onda Rayleigh mediante la curva de dispersión de la onda, que es un espectro de velocidad en el dominio lentitud-frecuencia (p-f) generado a partir de la transformada del campo de la onda. Para ello el software dispone de 6 Pasos (Figura 22) para generar la curva de dispersión por cada archivo adquirido en campo.

Figura 22. Pasos de RemiVspect



Fuente: La investigación

En el primer paso a partir de la carga del archivo en formato SEG-Y y se le indica al software que cantidad de trazas va a analizar.

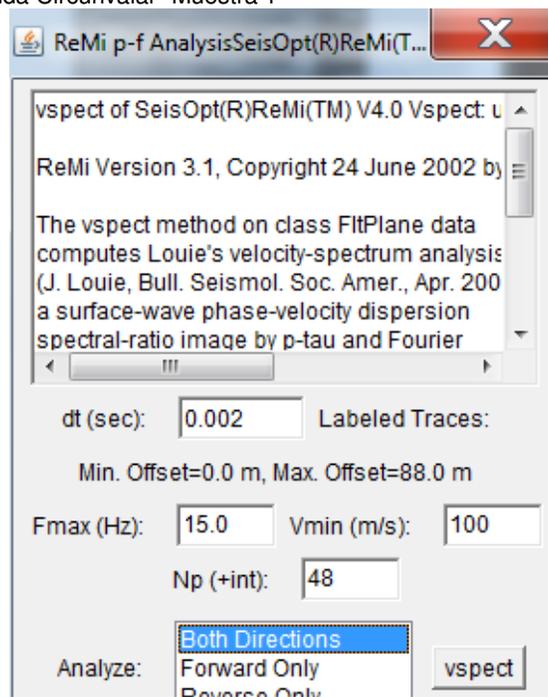
Se ejecuta una función de ganancia de ecualización de trazas y un centrado de las trazas en los registros. La función ganancia aplica un control de ganancia automático, el cual iguala la longitud del número de muestras en el tiempo por

traza sobre todas las trazas. La función de centralización promedia todas las desviaciones y picos presentes en los registros.

Al tener dichos parámetros establecidos se realiza el cálculo del espectro de velocidad para cada registro, consiste en determinar la transformada p-f de todos los datos, este proceso genera imágenes de tasa espectral de la dispersión fase-velocidad de una onda superficial, mediante las transformadas de p-tau y Fourier. El dominio al que corresponde es de Lentitud Vs Frecuencia, se genera una por cada registro grabado.

Se realiza la configuración del tiempo de grabación en cada registro por segundo, el rango de frecuencias que se va a identificar y la configuración de la fuente. Los parámetros adoptados para esta toma son intervalo de muestreo **dt**: 0.002, frecuencia máxima y mínima a analizar de 15 a 100 Hz. La frecuencia máxima es usualmente de 25 Hz para geófonos con frecuencia natural de 8 Hz, así, si los geófonos manejan frecuencias mayores o menores, la frecuencia máxima aumenta o disminuye. Debido a que los geófonos con los cuales se realizaron las prácticas manejan una frecuencia natural de 4.5 Hz, la frecuencia máxima es de 15 Hz. La configuración de recolección del ruido, puede provenir de ambas direcciones en relación al arreglo (Both Directions) o de solo unos de los extremos (Forward Only) cuando se desea analizar el ruido cercano al primer geófono y (Reverse Only) cuando se desea analizar el ruido cercano al último geófono del arreglo.

Figura 23. Parámetros Avenida Circunvalar -Muestra 1



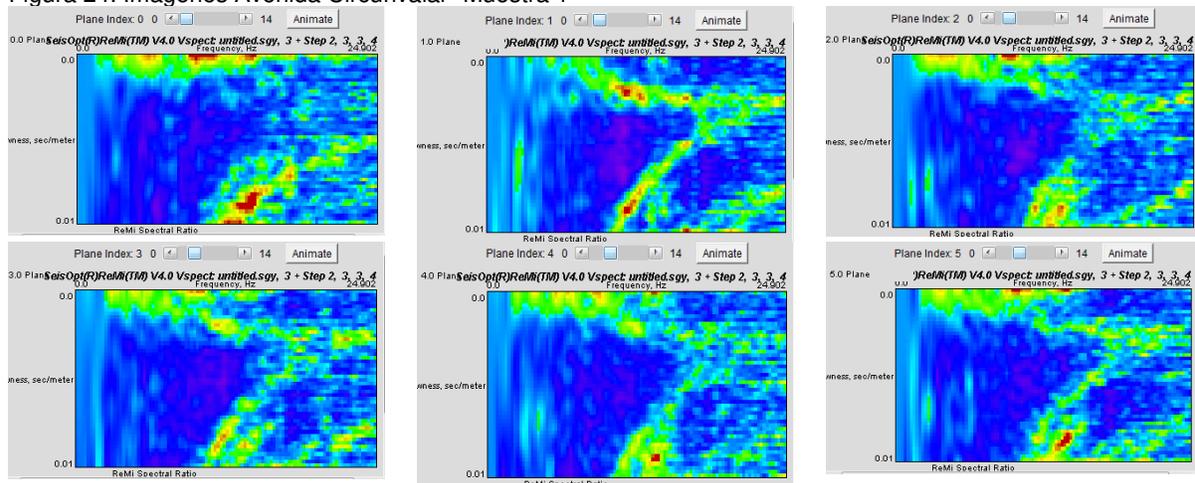
Fuente: La investigación

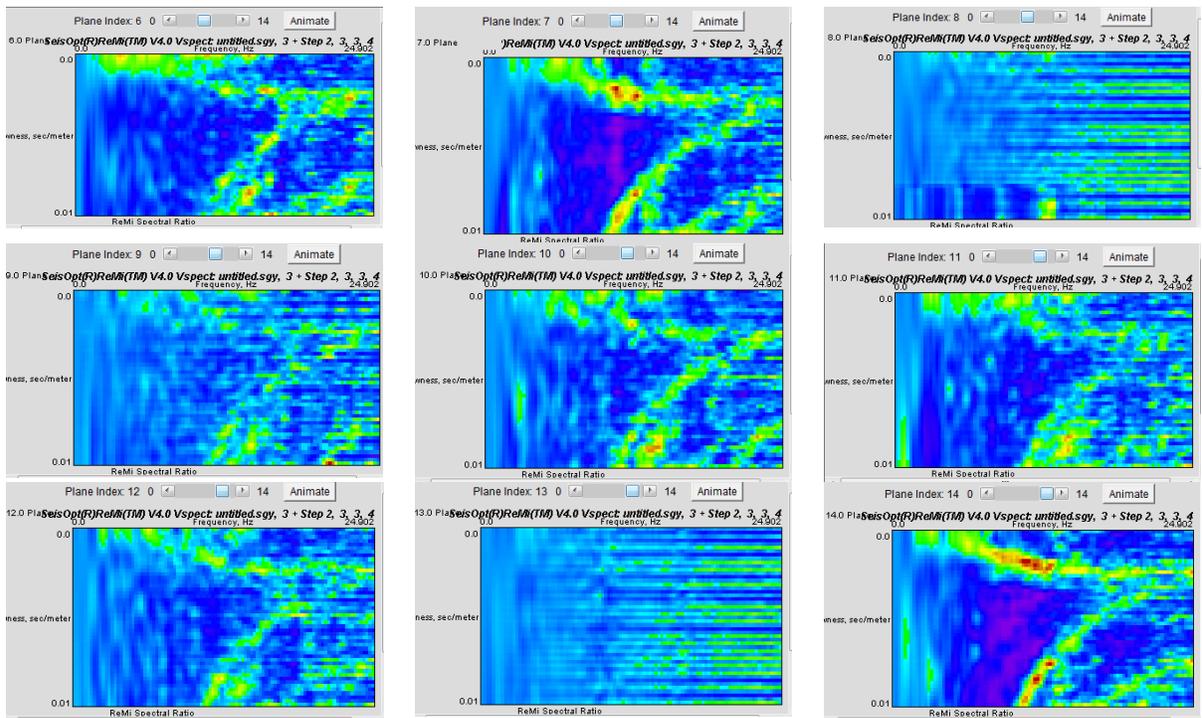
Los parámetros (Figura 23), permiten que se generen las imágenes que se muestran a continuación corresponden a la Muestra 1 en la Avenida Circunvar, con una distancia entre geófonos de 8 metros, tendido de 120 metros y con fuente de ruido única de los vehículos que transitan por la Avenida Circunvar.

Cada una de las imágenes (Figura 24) se procesa con la frecuencia (en Hz) representada a lo largo del eje horizontal (x) y la lentitud (en segundos / metro, inversa de la velocidad) trazada en el eje vertical (y). El origen (0, 0) de la imagen es la esquina superior izquierda. Dado que la frecuencia más alta se utilizó para el análisis fue de 25 Hz, la escala de frecuencias va desde 0 Hz a 25 Hz. Desde 100 m/s es la velocidad más baja utilizada (Figura 23), la lentitud va desde 0 s / m hasta 0,002 s / m. Los ejes horizontal y vertical son lineales en frecuencia y la lentitud, respectivamente. En consecuencia, el eje vertical no es lineal en la velocidad.

En la sección 3.6.3.1, **se explicó el modo de selección de la dispersión de la fase-velocidad Rayleigh, el cual a** partir de la serie de imágenes p-f (Figura 24), los cuales dependiendo del ruido y de su contenido de frecuencia son diferentes. De tal manera, se deben seleccionar las imágenes que permitan distinguir la curva de dispersión de onda de Rayleigh para realizar la combinación de los registros individuales en una sola imagen (Figura 25), buscando tendencias de alta relación espectral dentro del espectro de velocidad, las cuales se encuentran desde la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha. Se excluyen los registros que presenten respuestas de dispersión, anómalas o incoherentes para dejar más uniforme la imagen sobre la que realiza el *picking*, a esta imagen se le denomina imagen apilada. Se seleccionan las imágenes 1-3-4-5-7-14.

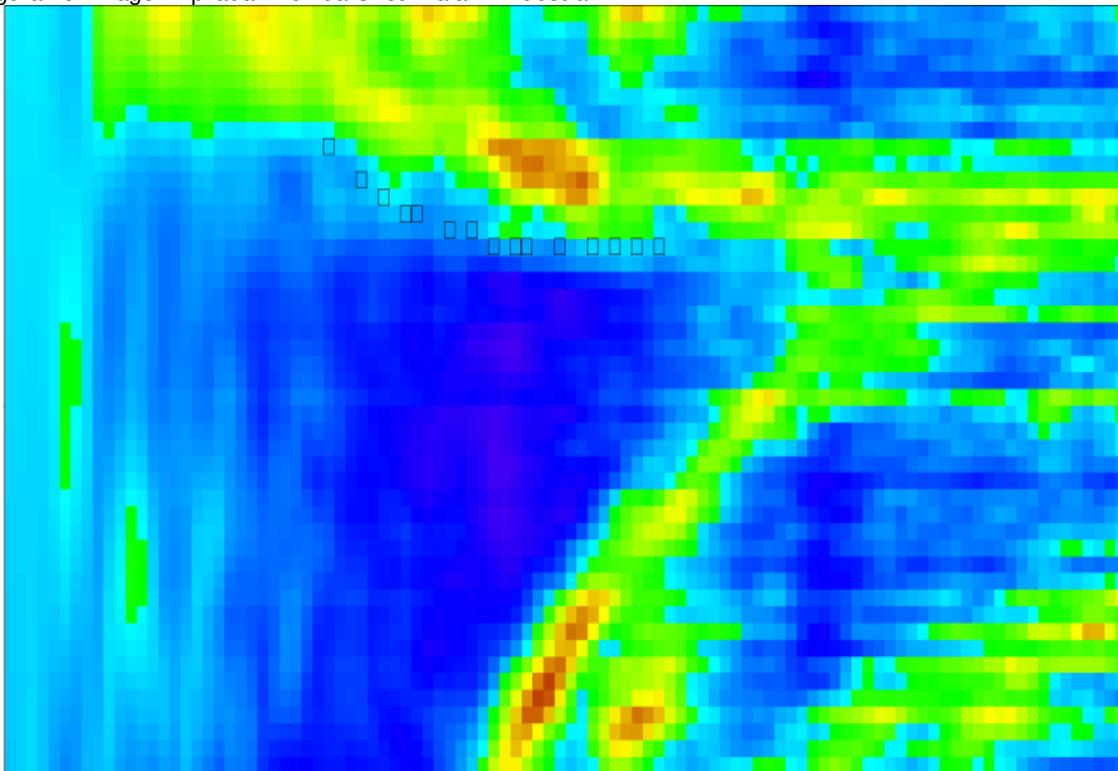
Figura 24. Imágenes Avenida Circunvar- Muestra 1





Fuente: La investigación

Figura 25. Imagen Apilada Avenida Circunvarial – Muestra 1



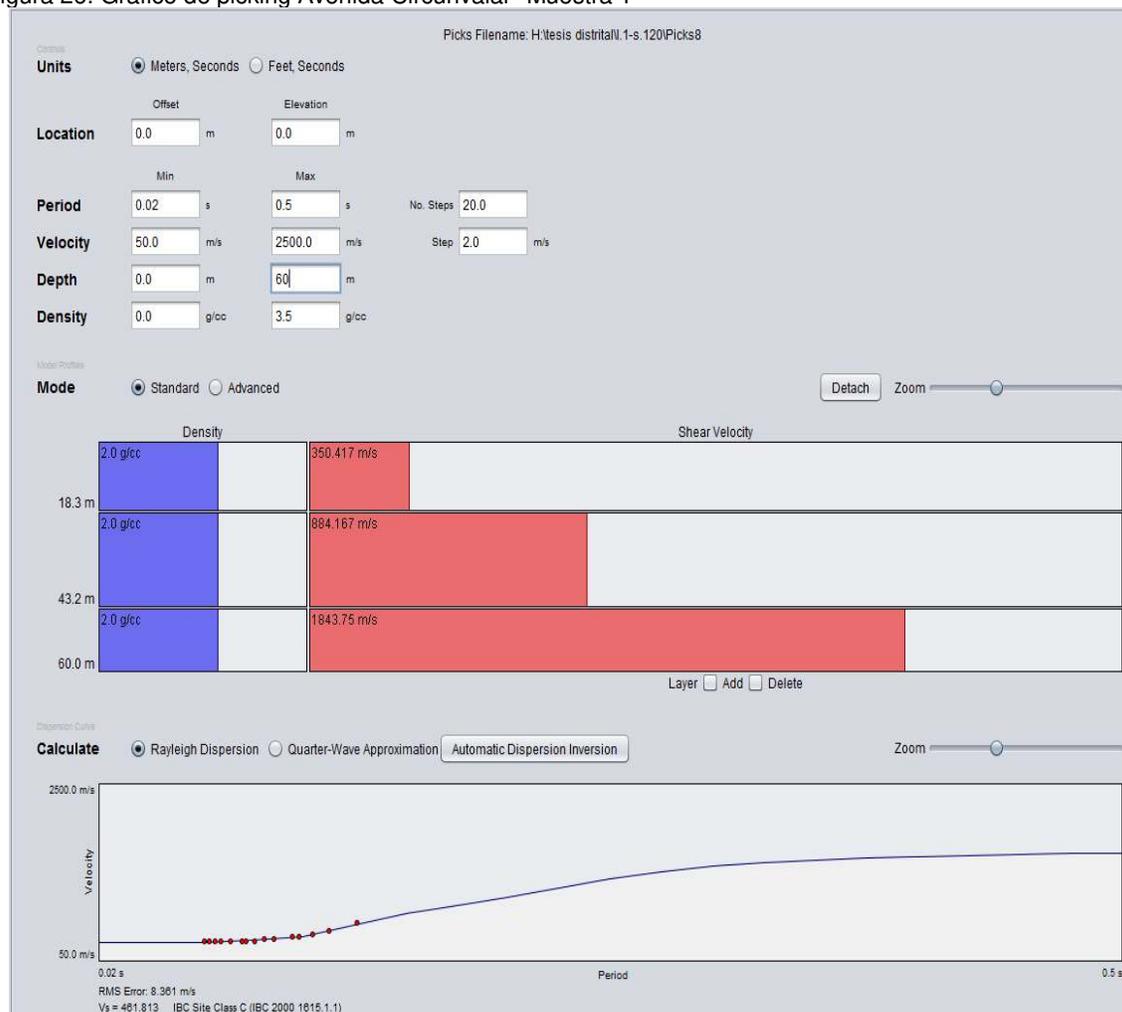
Fuente: La investigación

Con la imagen apilada (Figura 25), se debe indentificar los puntos que describen la tendencia de dispersion. Generalmente, la mejor tendencia de dispersion se identifica en la transicion de los colores azul y verde ya que en estos se agrupa la informacion del promedio de la proporcion espectral y en rojo se agrupan los valores con frecuencias muy altas, valores que no son adecuados para la interpretacion del metodo ReMi. Cuando esta transicion es borrosa como se logra visualizar en la parte superior izquierda de la figura 25 es mejor no seleccionar ningun punto.

### Modulo ReMiDisper

Mediante este módulo se genera el modelo de espesor, numero de capas y la velocidad de onda de corte. Primero se cargan los *picks* seleccionados al modelo, allí se verán en forma de puntos rojos en una ventana que muestra un gráfico de la velocidad Vs Periodo (Figura 26).

Figura 26. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 1



Fuente: La investigación

Para obtener los mejores resultados es necesario modificar los siguientes parámetros:

- Unidades de medida: De acuerdo a las unidades utilizadas para todo el trabajo, se utilizan metros y segundos.
- Periodo: Se escoge el periodo mínimo 0,002, que es el resultado para la toma que realiza el equipo de 30.000 muestras por minuto. Se determina el periodo máximo 0,5, que es el resultado de 120 muestras que realizaría el equipo. Por defecto, se selecciona 20 para el número de pasos para calcular el periodo, si este es mayor, la curva de dispersión calcula en la parte inferior de la figura 26, tiende a ser más suave.
- Velocidad: Se escoge como velocidad mínima 50 m/s según los estudios previos sobre las velocidades del subsuelo del lugar, este valor siempre debe ser menor a la velocidad mínima indicada en los parámetros (Figura 23). Se selecciona como velocidad máxima 2.500 m/s según los estudios realizados del subsuelo de la zona. Por defecto, se selecciona 2 para el número de pasos de iteración del algoritmo para el cálculo de la velocidad, este número es necesario disminuirlo cuando las velocidades son muy bajas (<100 m/s).
- Profundidad máxima: Según la teoría enunciada en el capítulo 3.6.3.1 la profundidad máxima a la que se puede interpretar el subsuelo es la mitad de la longitud del tendido, por lo tanto, como el arreglo tiene 120 m, profundidad se escoge a 60 metros.
- Modo del modelo: Se selecciona el modo *Standard* porque no se tiene la información de las velocidades de la onda "P", así, este modelo asume la velocidad de la onda "P" 1,73 veces el valor de la velocidad de la onda de corte. Cuando se realiza estudios de refracción o se tiene la información hacer de la velocidad de la onda "P", se utiliza el modelo avanzado, esta información permite mejorar el modelo final.

Después de ajustar los parámetros, se busca que la curva de dispersión se ajuste a los *picks* que se muestran en la figura anterior. Como resultado final debe presentarse una curva con un error RMS menor a 10 m/s. Para lograr el ajuste de la curva, se debe modificar aleatoriamente los espesores (líneas de separación horizontales) y velocidades (barra roja horizontal) que podrían presentarse en la formación Cacho y Bogotá. Al terminar se genera un archivo .txt con el que se obtiene un modelo unidimensional de la velocidades de onda de corte Vs la profundidad, esto se hace para observar su comportamiento en los distintos puntos de adquisición de datos de ruido sísmico ambiental y así poder hacer una mejor comparación de columnas litológicas. Este modelo se crea en una hoja de cálculo Excel (Tabla 1), un gráfico de línea recta donde se vea el comportamiento entre los intervalos de la profundidad. (Figura 27).

Figura 27. Avenida Circunvalar - Muestra 1



Fuente: La investigación

Tabla 2. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 1

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0-18.3	350.416667
18.3- 43.2	884.166667
43.2 – 60	1843.75

Para las siguientes muestras se realiza el mismo procedimiento que para la muestra 1. El procedimiento para cada una de estas se encuentra en Anexo A.

### **Modelo 3D Parque Central Simón Bolívar**

Con las muestras 1, 2, 3 y 4 que se realizaron en el lugar de toma se desarrolló un modelo 3D el cual se desarrolla con el siguiente software.

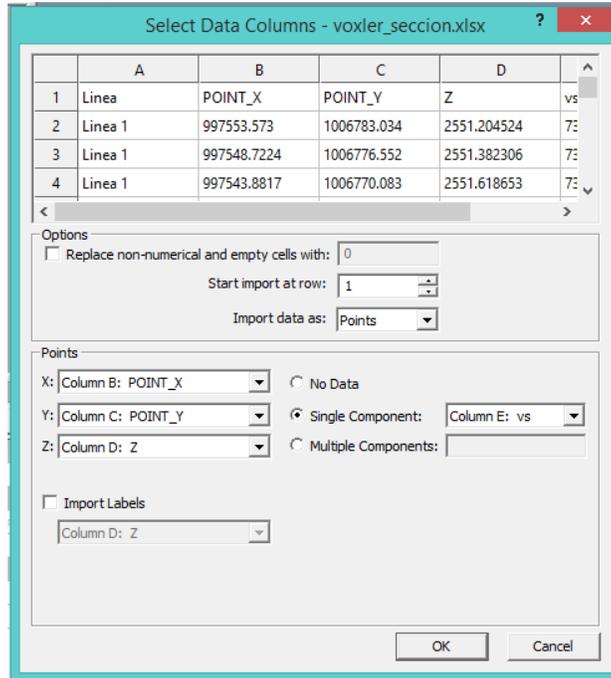
#### **Voxler**

Este software está orientado primordialmente hacia la visualización tridimensional y representación volumétrica. Los módulos computacionales incluyen red tridimensional, remuestreo, numerosas operaciones de grillas y procesamiento de imágenes. Voxler está diseñado para la visualización de los datos de XYZC, donde C es una variable en cada ubicación X, Y y Z.

Las coordenadas de los geófonos tomadas para la generación de este modelo corresponden a la porción central de la grilla, dicha información es capturada con el GPS el cual nos arroja los datos para XYZ y la variable C en este caso será la velocidad de onda "S" (Figura 28). La información se recopila en una tabla por cada tendido realizado, en el caso de los valores de XY se repiten mientras varia

la profundidad de acuerdo a los resultados obtenidos de los espesores en el procesamiento.

Figura 28. Asignación de columnas.



Fuente: La investigación

El módulo que se utiliza es Gridder el cual interpola datos de puntos dispersos en una grilla uniforme. Se establecen el rango de salida de la grilla, resolución, el método de interpolación que para este caso es distancia inversa (*Inverse Distance Weighting*) (Ecuación 12), el cual se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa, se trata esencialmente de una medida ponderada y, por tanto, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos. Cuando se genera la interpolación se procede a la visualización con los módulos de salida que generan gráficos en la ventana del visor (Figura 29).

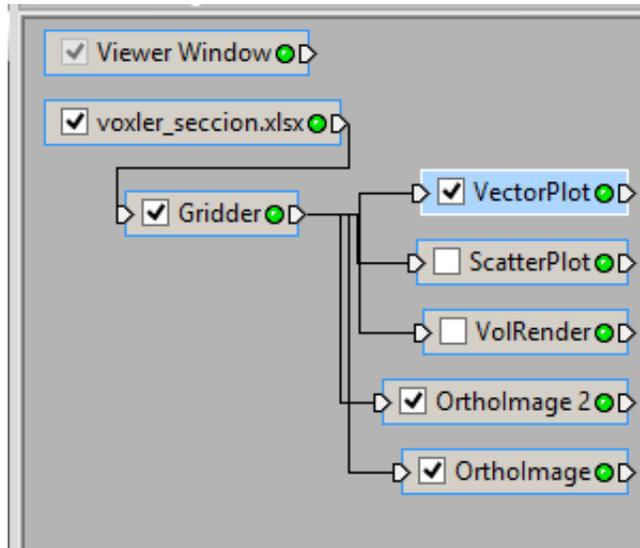
$$\hat{z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

Donde,  $\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}}$  y  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$  (12)

- $\hat{z}_0$ : Valor estimado para el punto 0
- $z_i$ : Valor en el punto i-esimo
- $d_{i0}^{-p}$ : Distancia entre el vecino  $s_i$  y el punto  $s_0$
- $p$ : Factor de suavizamiento que controla la forma en la que el peso disminuye con la distancia. Mientras más grande sea el coeficiente de ponderación menor será el efecto que los puntos tendrán si están lejos del punto desconocido durante el proceso de interpolación.

**n:** Número de puntos usados en la interpolación

Figura 29. Flujo de funciones.



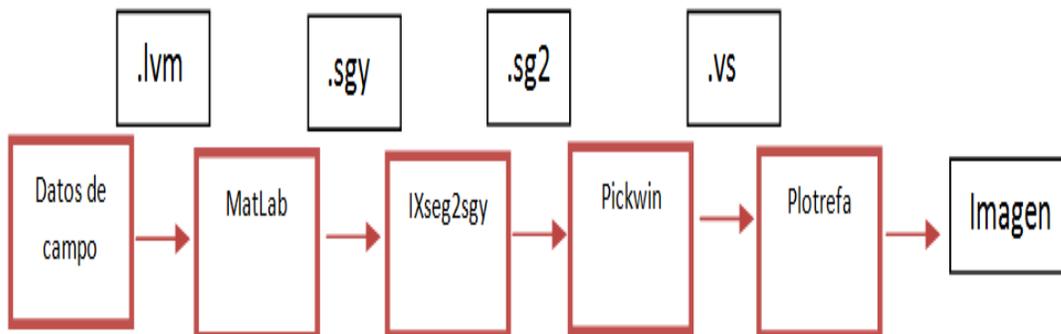
Fuente: La investigación

VolRender utiliza una técnica llamada directa volumétrica para renderizar. Realiza una visualización tridimensional de datos que simula la transmisión y absorción de la luz a través de los puntos en el volumen. El color de un píxel individual en la pantalla se calcula por la composición de las contribuciones de cada partícula que intersecta con el rayo.

#### 4.2.3.1 Refracción

Este método se realizó en el Avenida Circunvalar únicamente. A continuación, se explica el procedimiento que se realiza. Para realizar el procesamiento adecuado es necesario seguir los siguientes pasos (Figura 30):

Figura 30. Flujo de procesamiento de refracción



Fuente: La investigación

La información en los cuadros rojos indican la información y el software utilizado en el procesamiento de los datos, Los cuadros negros en la parte superior de la figura 30 indican el resultado y los archivos necesario para continuar y terminar el procesamiento.

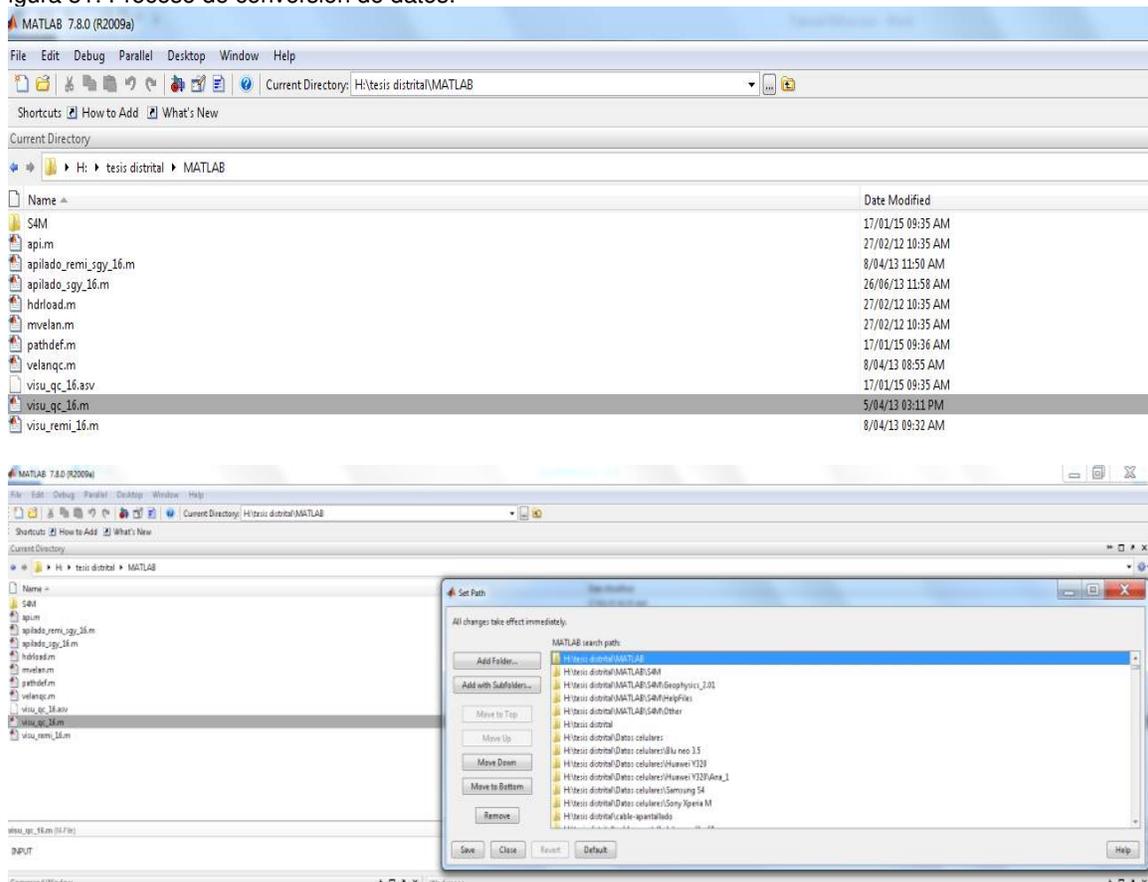
### Datos de campo

Para el procesamiento del metodo refracción se toma en cuenta los parametros de adquisición de datos como tasa de muestreo, longitud del registro, espaciamento entre receptores, número de canales, ubicación de los puntos de disparo y topografía. Para esta adquisición se realizaron dos tomas, una con la fuente al inicio del tendido y una al final de este.

### MatLab

El proceso para convertir los archivos .LVM capturados en campo se realizan con el software MatLab, con este software debe tenerse en cuenta que en la ubicación de los datos (Figura 31) a trabajar deben encontrarse los *scripts* con las funciones pertinentes para la conversión de los datos.

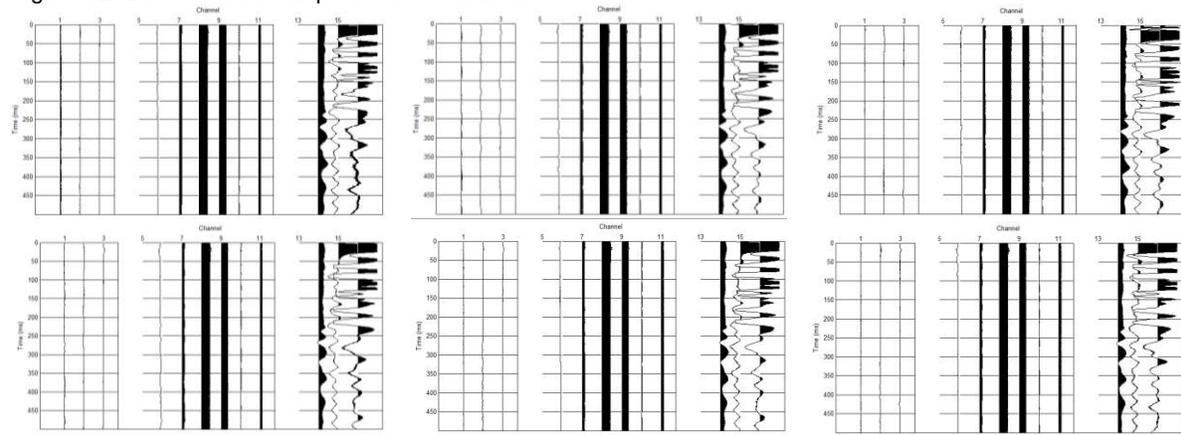
Figura 31. Proceso de conversión de datos.



Fuente: La investigación

Una vez leídos los datos se utilizan los comandos *vise\_qc\_16* para generar una vista de los datos de cada disparo y así elegir las mejores imágenes según la visualización donde se pueden identificar las llegadas de la onda “S”, para generar los apilados. Para apilar los datos elegidos se utiliza el comando *apilado\_sgy\_16*. A continuación, se realiza el proceso con el tendido a 60 metros y con la fuente al final (Figura 32).

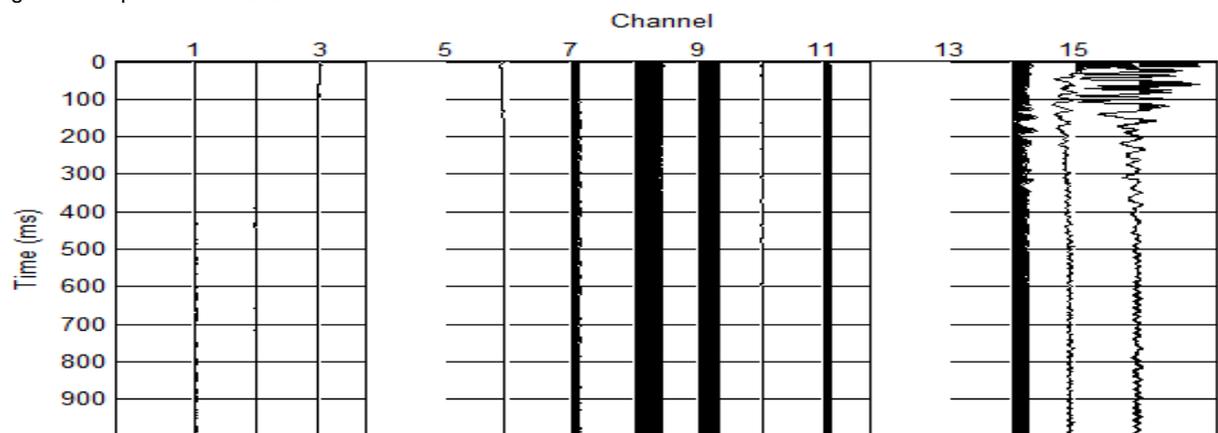
Figura 32. Datos de cada disparo-Fuente al final.



Fuente: La investigación

Con la información apilada en Matlab (Figura 33), se debe remover los niveles DC como se realizan en ReMi.

Figura 33. Apilado de datos en Matlab.

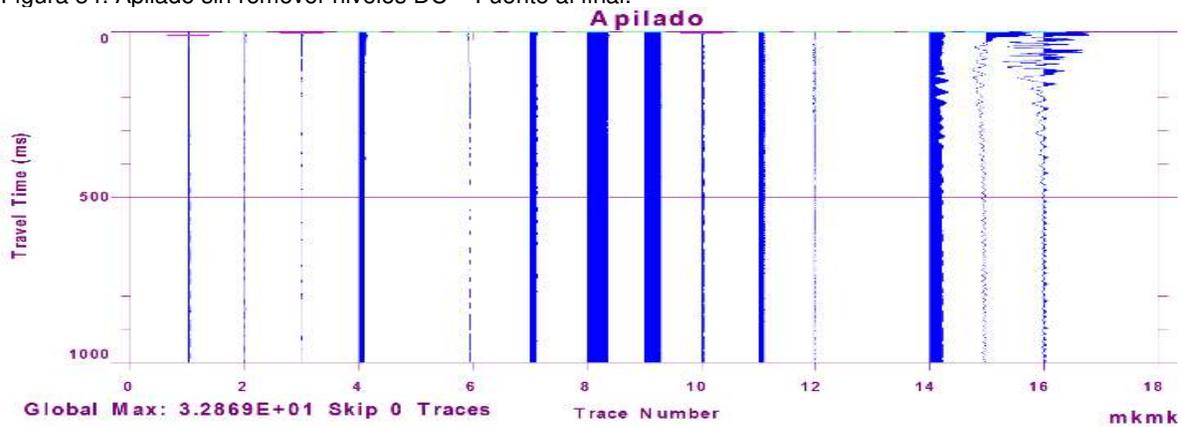


Fuente: La investigación

### **Interpex- IXSeg2egy**

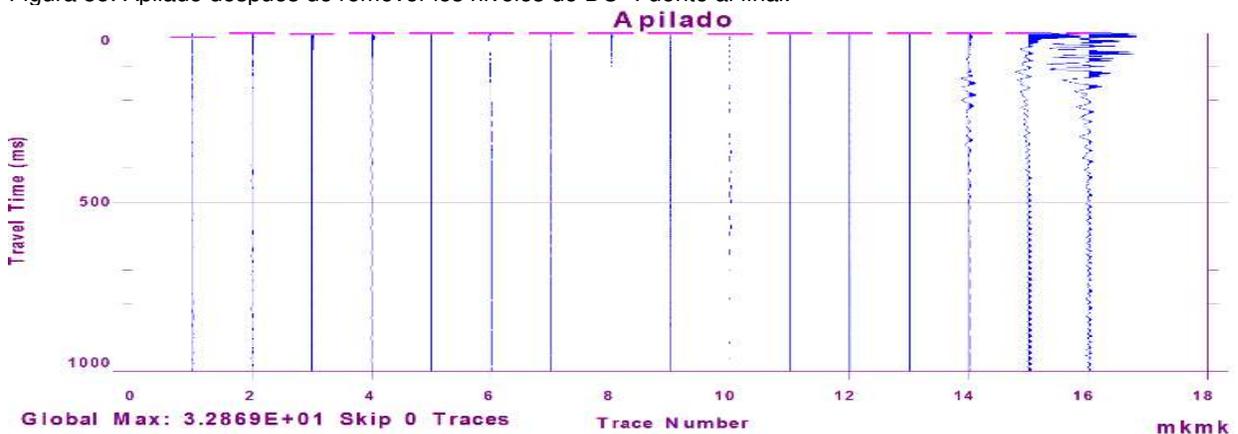
Para remover los niveles de DC, se abre la información apilada en Matlab (Figura 34), solo que en este caso se exporta como SG-2 que es el formato que va a reconocer el programa utilizado para la interpretación de método refracción y se remueven los niveles de DC (Figura 35).

Figura 34. Apilado sin remover niveles DC – Fuente al final.



Fuente: La investigación

Figura 35. Apilado después de remover los niveles de DC- Fuente al final.



Fuente: La investigación

### **Seismager (Modulos Picxkwin y Plotrefa)**

La primera parte del flujo es con el módulo picxkwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves) en donde se importa la información de los archivos SG2 sin niveles DC y se configura los parámetros de la geometría utilizada (Figura 36). El trabajo se realiza con el tendido de 60 metros con distancia entre geófonos de 4 metros, con la fuente al principio y final de la línea del tendido.

Figura 36. Parámetros de geometría de refracción.

The screenshot shows a software window titled "Geometry" with a red close button in the top right corner. The window contains several input fields and buttons:

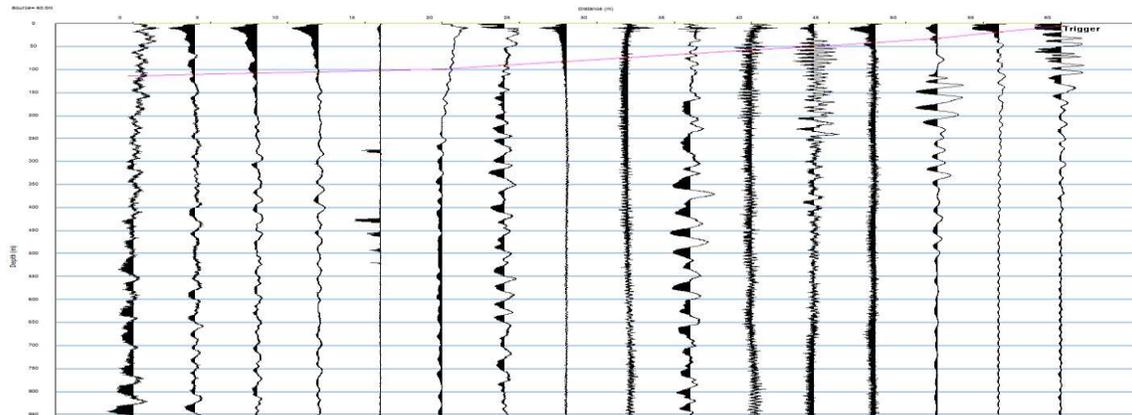
- Shot coordinate:** A text box containing the value "0".
- Units:** A group box containing two radio buttons: "meters" (selected) and "feet".
- Number of channels:** A text box containing the value "16".
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons are located to the right of the "Number of channels" field.
- Group interval:** A text box containing "4" and a "Set" button to its right.
- First geophone coordinate:** A text box containing "0".
- Channel configuration table:** A table with 6 columns labeled "Channel" (1 to 6).

Channel	1	2	3	4	5	6
Interval	4	4	4	4	4	
Geophone coordinate	0	4	8	12	16	20
- Buttons:** "Open geometry file" and "Save geometry file" buttons are located to the right of the "Group interval" and "First geophone coordinate" fields. "Back" and "Next" buttons are located below the channel configuration table.

Fuente: La investigación

La información se ve como se presenta en la Figura 37. Aquí se identifica la llegada de la onda "S" en los geófonos. Se dibuja la posible curva, sin embargo se presentan problemas en el reconocimiento de la curva que serán explicados con detalle en el capítulo 5.

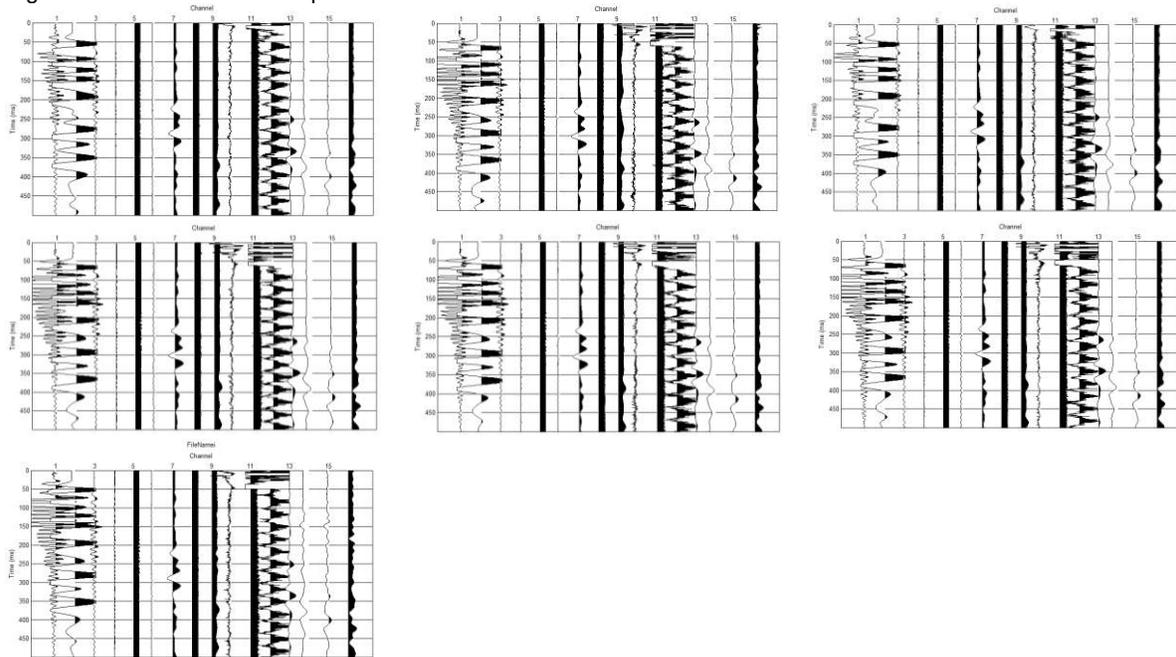
Figura 37. Identificación de la onda "S"- Fuente al final.



Fuente: La investigación

El procedimiento se realiza de nuevo ahora con el tendido de 60 metros y la fuente al inicio del mismo (Figura 38).

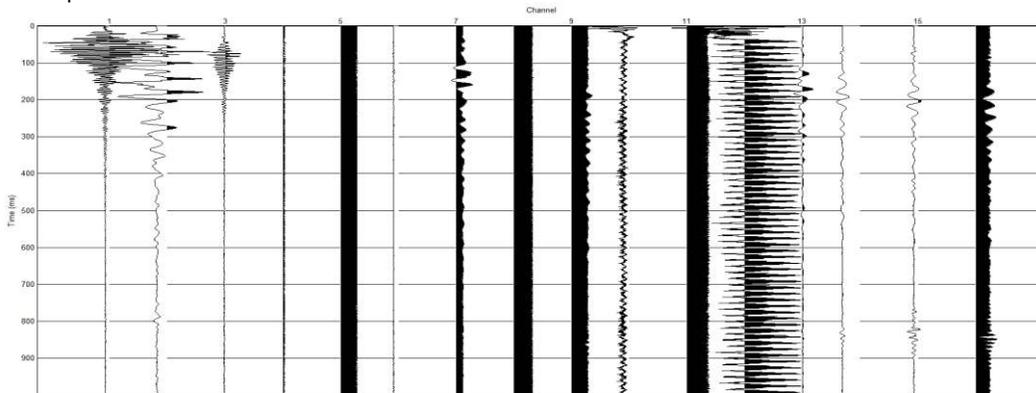
Figura 38. Datos de cada disparo-Fuente al inicio.



Fuente: La investigación

Con las imágenes generadas se seleccionan las mejores y se apilan en Matlab (Figura 39).

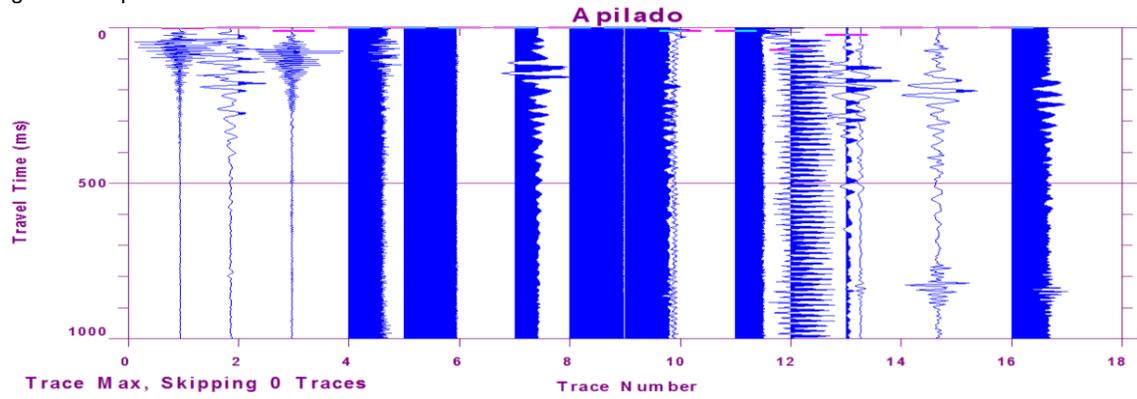
Figura 39. Apilado de datos en MatLab.



Fuente: La investigación

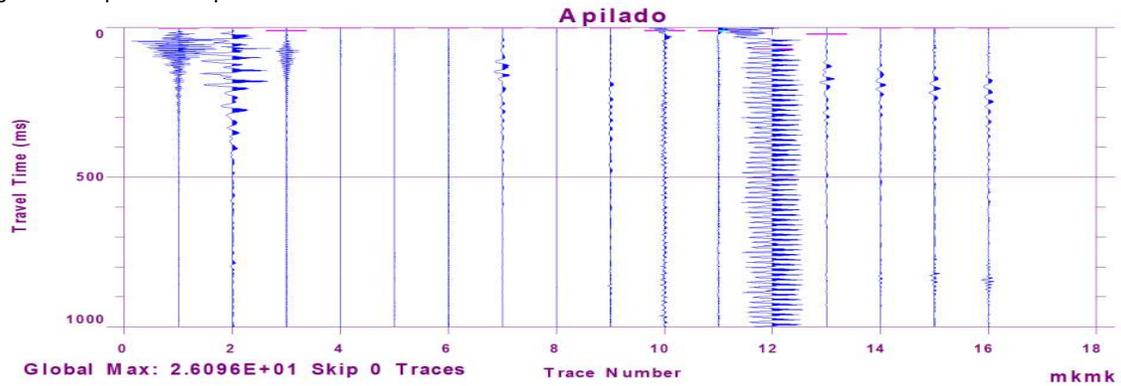
Se realiza el proceso de eliminar los niveles DC del apilado. De tal manera, se abre la imagen sin apilar que exporta MatLab en el software *IXSeg2egy* (Figura 40) y se exporta la imagen apilada (Figura 41) al archivo .sg2.

Figura 40. Apilado sin remover niveles DC – Fuente al final.



Fuente: La investigación

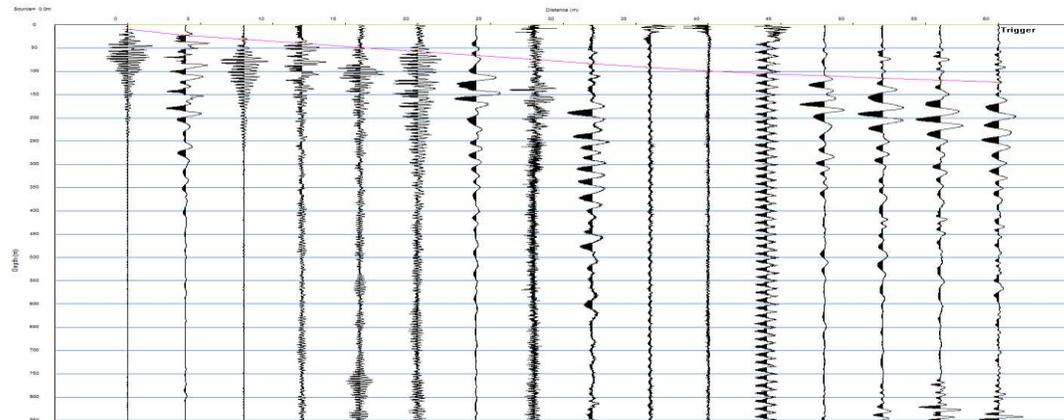
Figura 41. Apilado después de remover los niveles de DC- Fuente al inicio.



Fuente: La investigación

La identificación de la curva de la llegada de las ondas “S” para este caso la fuente se encuentra al principio del tendido (Figura 42).

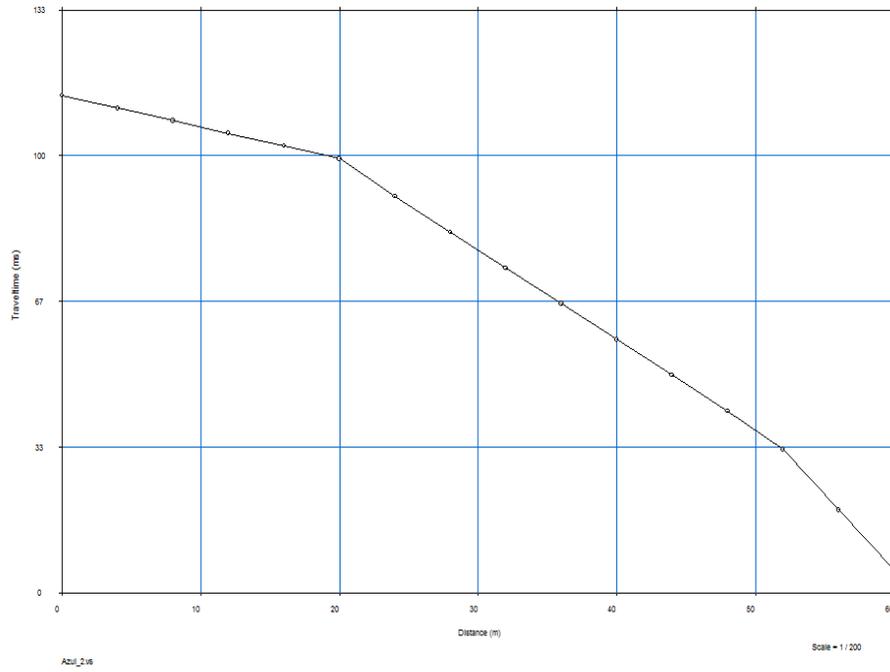
Figura 42. Identificación de la onda "S"- Fuente al inicio.



Fuente: La investigación

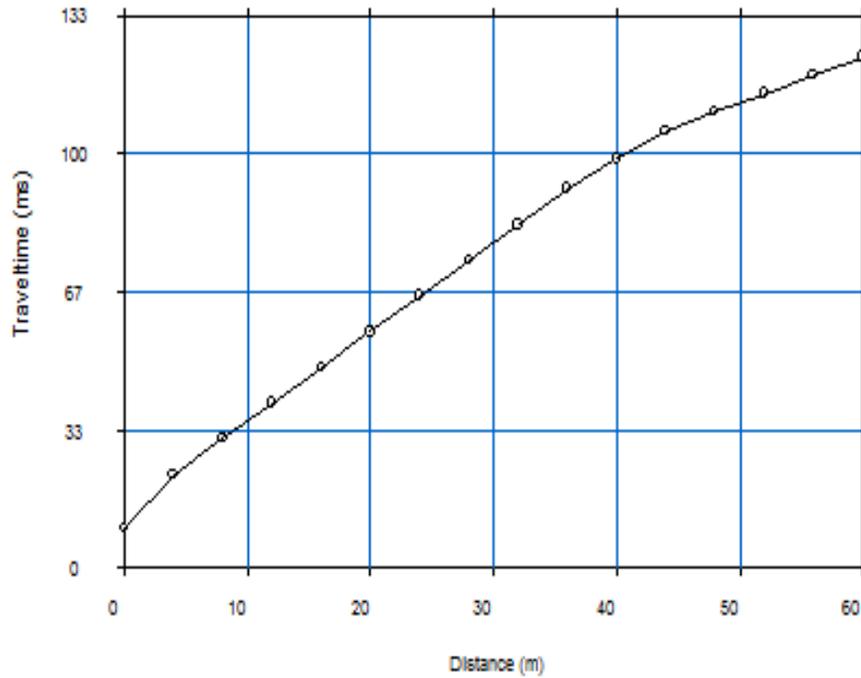
Plotrefa es el modulo de interpretación 2D de Seislmager. Toma la información generada en el modulo Pickwin, proporciona una sección transversal de velocidad. Con las curvas realizadas para cada tendido en Pickwin se generan en las Figura 43 y Figura 44, con estas se conformará el modelo 2D.

Figura 43. Tendido con fuente al final.



Fuente: La investigación

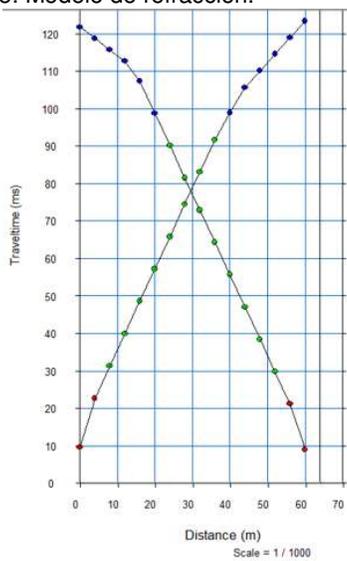
Figura 44. Tendido con fuente al inicio.



Fuente: La investigación

El modelo se construye a partir de las curvas de ambas líneas, en la Figura 45 se puede observar que el cambio de pendientes que presenta cada una de ellas, a partir de este parámetro se establecen los espesores, de los cuales se pueden evidenciar 3 cambios.

Figura 45. Modelo de refracción.



Fuente: La investigación

Al generar la tomografía, se introducen de forma manual los parámetros de profundidad y velocidades de onda obtenidos, cuyos valores son 200 m/s y 1500 m/s tal como se muestra en la Figura 46.

Figura 46. Parámetros para generar tomografía.

Parameter	Value	Unit
Use layered model as initial model	<input checked="" type="checkbox"/>	
Depth to top of lowest layer	30	m
Minimum velocity	200	m /sec
Maximum velocity	1500	m /sec
# of layers	10	
Elevation at the bottom left of the model	-30	m
Elevation at the bottom right of the model	-30	m

Fuente: La investigación

Los análisis respectivos de las tomografías generadas a partir de método de Refracción se presentaran en el siguiente capítulo.

## CAPITULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

De acuerdo al procesamiento realizado de la información adquirida, se analiza el comportamiento de las ondas superficiales en los tipos de suelo y se determina el espesor de los sedimentos en la zona de estudio.

En la sección 2.2 se mencionó la Geología para determinar las formaciones presentes en la zona de estudio. Teniendo en cuenta el Decreto de 523 de 2010 (Mapa 4), el informe de geología de la Sabana de Bogotá y el estudio de suelos del complejo acuático de Bogotá es posible inferir los diferentes tipos de suelo que se encuentran. Con información adicional se estima las velocidades de onda de corte y profundidades para las zonas.

De tal manera, se resumen las velocidades para cada tipo de suelo presente en las formaciones de cada uno de los sitios (Tabla 11).

Tabla 3. Rangos usuales de velocidades para los materiales geológicos.

<b>Tipo Material</b>	<b>Velocidad de Compresión (m/s)</b>	
<b>Material Superficial (capa de alteración de suelos y rocas)</b>	305	610
<b>Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)</b>	468	915
<b>Arena Húmeda</b>	610	1830
<b>Areniscas y Lutitas</b>	1830	4270
<b>Caliza</b>	2140	6100
<b>Granito</b>	4580	5800
<b>Rocas metamórficas</b>	3050	7020
<b>Rellenos</b>	71	
<b>Cerros</b>	>750	
<b>Lacustre</b>	<175	

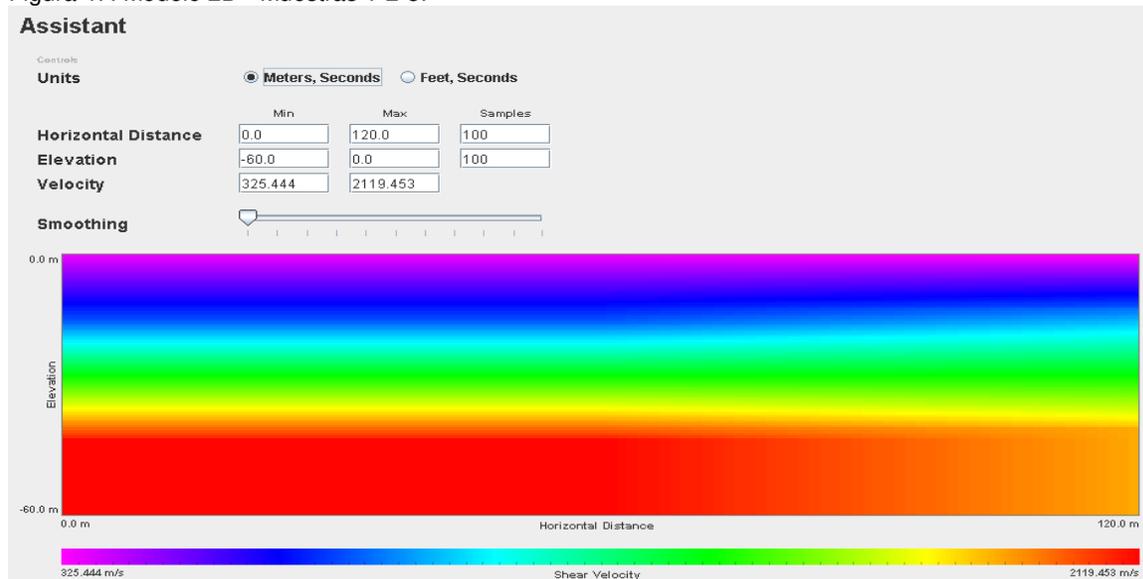
### 5.1 Avenida Circunvalar

#### 5.1.1 ReMi Muestra 1-2-3

Teniendo en cuenta que la toma se realiza en un punto donde limitan las formaciones Cacho, Formación Bogotá y los depósitos coluviales (Mapa 3), se realiza la interpretación a partir de los materiales que los conforman, resultados que definen que el punto de estudio tiene mayor relación a la descripción de la

Formación Bogotá. Para las muestras 1-2-3 los tendidos fueron de 120 metros de longitud así que la profundidad de adquisición de información es de 60 metros. Se logran evidenciar 3 capas con velocidades que aumentan a medida que alcanzan mayor profundidad.

Figura 47. Modelo 2D - Muestras 1-2-3.



Fuente: La investigación

En el modelo 2D (Figura 47) generado para las muestras 1, 2 y 3, se pueden observar los espesores para el tendido. El error medio cuadrático para las muestras es de +/- 10 m/s. La primera capa presenta un promedio de velocidad de 342.2242 m/s con una profundidad aproximada de 15.6 metros que presenta tonalidades que van del morado al cian, se infiere que son materiales superficiales formados la cobertura vegetal y relleno antrópico al momento de la construcción de la Avenida Circunvalar. Esta es una capa de transición entre suelos y rocas que no se encuentran muy compactas ya que son relativamente jóvenes y no hay gran velocidad en ellas.

La segunda capa presenta una velocidad promedio de 864.445 m/s a una profundidad aproximada de 42.3 metros que van del color cian al amarillo, dichas velocidades corresponden a areniscas de la Formación Bogotá, son suelos conformados de arcillas con trazas de arenas de baja compresibilidad y algo de gravas.

La tercera y última capa presenta una velocidad promedio de 1949.022 m/s a una profundidad de 60 metros con color rojo intenso, corresponden a areniscas de grano medio consolidadas con transiciones de arcillolitas, al presentar estas características se puede notar que las velocidades de onda aumentan

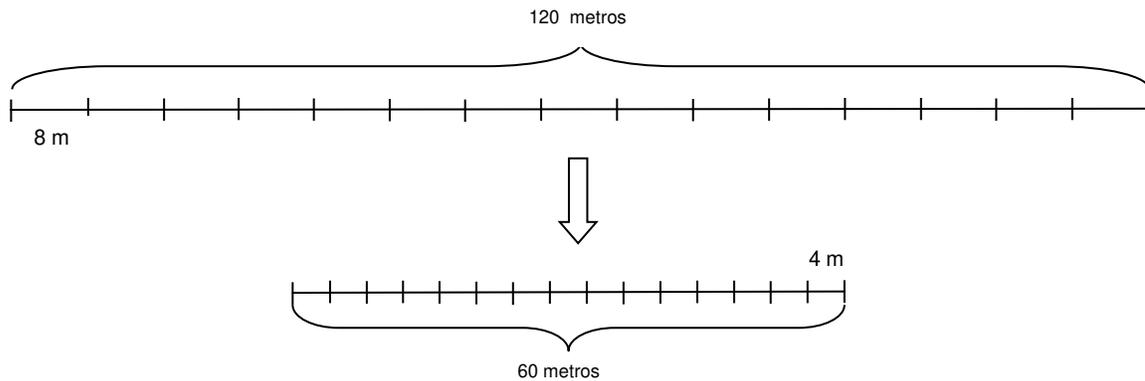
considerablemente ya que el medio permite un mejor desplazamiento de la misma al encontrar un medio más compacto y firme.

### 5.1.2 ReMi Muestra 4-5-6

La disposición de los geófonos en campo de estas muestras se realiza de forma experimental, ya que el método por lo general se realiza para proyectos de gran escala con longitudes de kilómetros para interpretar el subsuelo, por lo cual la distancia entre geófono es usualmente mayor a 8 metros.

El tendido queda de 60 metros intervalos entre geófonos de 4 metros para ver qué resolución puede llegar a capturar el equipo en el subsuelo (Figura 48).

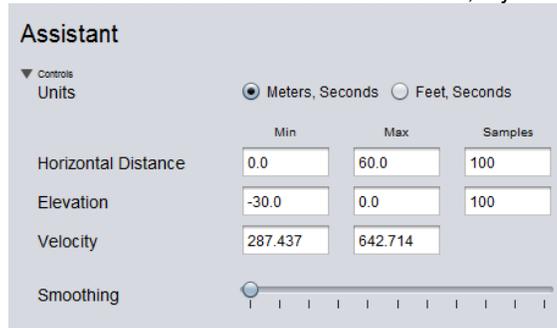
Figura 48. Comparación de tendidos (Muestras 1-2-3 vs Muestras 4-5-6)



Fuente: La investigación

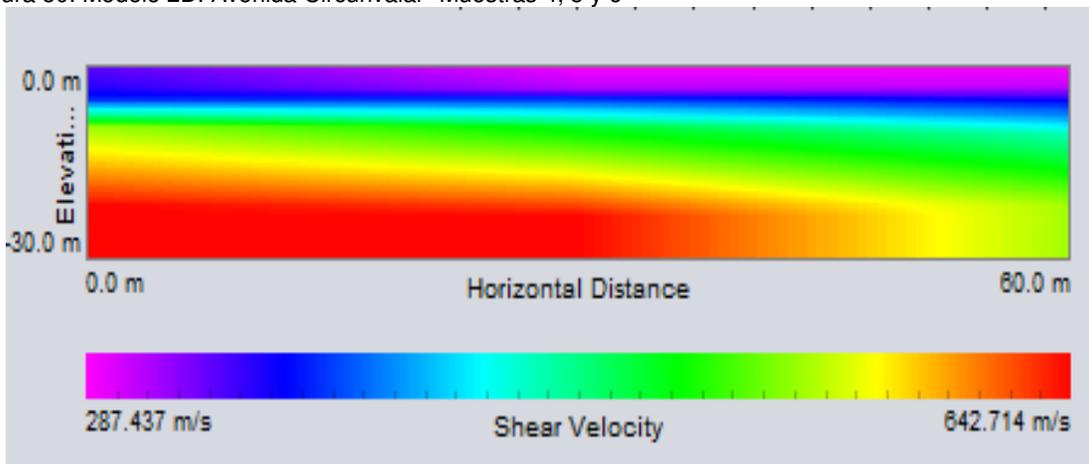
Siguiendo el método para el procesamiento del tendido a 120 metros, no fue posible disminuir el error medio cuadrático a menos de 10 m/s con 3 capas. Se concluye que con una separación menor entre geófonos permite una resolución alta pero una penetración sísmica menor. Lo que se logró encontrar es que con esta distribución el método permite identificar un perfil estratigráfico más detallado. Se genera el modelo 2D del subsuelo para las muestras 4, 5 y 6 (Figura 49). En este se evidencia la correlación entre las capas propuestas en cada muestra (Figura 50).

Figura 49. Parámetros del modelo 2D. Avenida Circunvalar –Muestras 4, 5 y 6.



Fuente: La investigación

Figura 50. Modelo 2D. Avenida Circunvalar- Muestras 4, 5 y 6



Fuente: La investigación

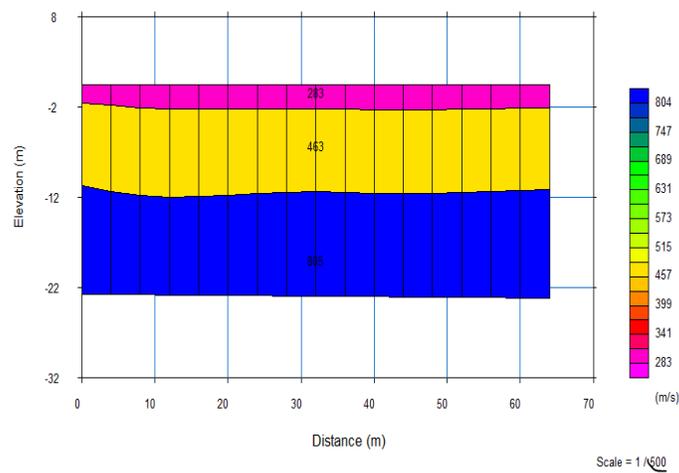
En la primera capa hay una profundidad aproximada de 3.4 metros y una velocidad promedio de 302.092 de m/s constituida por el color morado, este es la cobertura vegetal compuesta en su mayoría por materia orgánica y humus, la segunda capa con una profundidad de 5.3 metros y una velocidad 322,025 m/s se presume son rellenos antrópicos producto de la excavación para la vía simbolizada de color azul que se ve de manera homogénea, la tercera con una profundidad de 9.975 metros con velocidades de 366,582 m/s podrían ser depósitos coluviales ya que son acumulaciones constituidas de materiales presentes en la ladera montañosa, en este caso podrían tener contenidos escasos de arenas o arcillas de acuerdo a la formación Cacho, por esta razón se presenta el cambio de velocidad constituida por los colores cian a verde.

La cuarta capa se encuentra con una profundidad promedio de 22.175 metros, con areniscas de grano fino. En los últimos 10 metros, la velocidad cambia considerablemente, se presume que la arenisca aumenta en su contenido de minerales a grano medio volviéndolas más compactas que permiten un viaje más fluido de la onda donde se observa la transición de color amarillo a rojo intenso.

### 5.1.3 Refracción

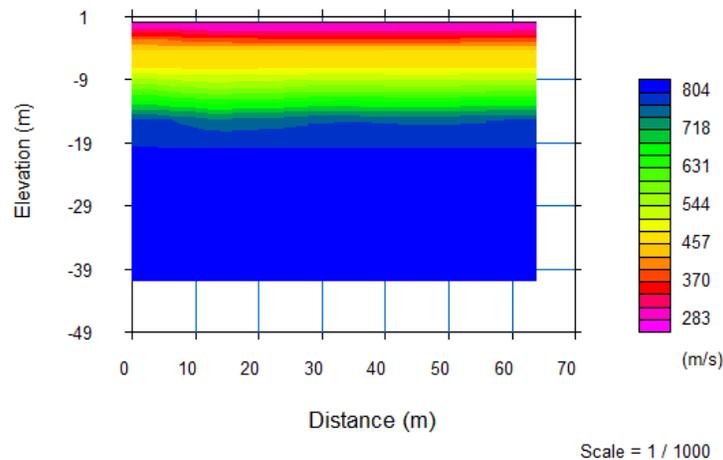
Los modelos resultantes de este método (Figura 51 y Figura 52) muestran una profundidad de adquisición cercana a 25 metros. Se pueden ver 3 capas generalizadas con velocidades de 283 m/s a una profundidad aproximada de 2 metros representado de color rosa, 463 m/s a una profundidad de 11 metros con color amarillo y por ultimo una capa con una velocidad de 895 m/s de color azul. De acuerdo a los valores de velocidades de la tabla 11 y a la información litológica de las formaciones Cacho y Bogotá, se asumen que los suelos presentes son: material superficial, areniscas con alta presencia de arena y gravas y por último, arcillolitas con ausencia de gravas y arcillas compactas.

Figura 51. Tomografía con capas delineadas.



Fuente: La investigación

Figura 52. Tomografía sin capas delineadas.



Fuente: La investigación

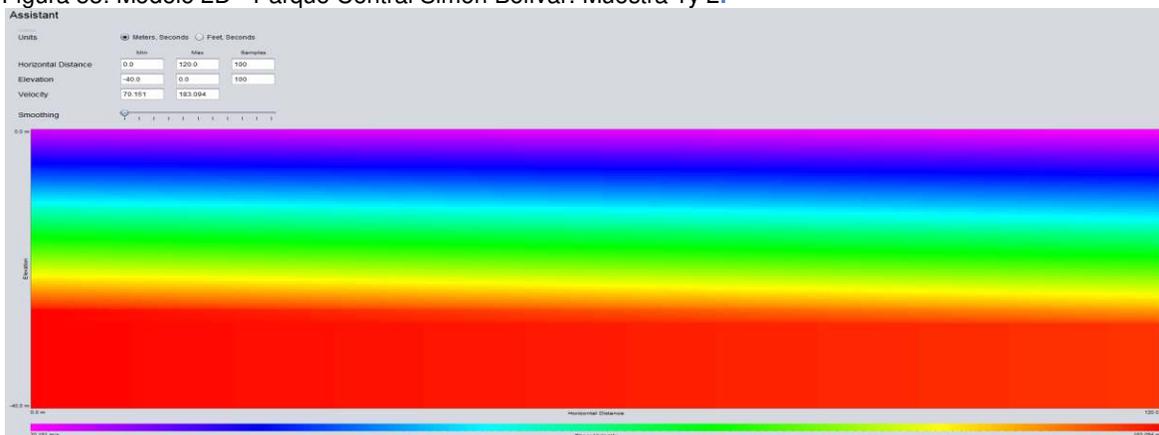
Haciendo la comparación de los resultados obtenidos para el Avenida Circunvalar, entre refracción y ReMi se identificaron las siguientes diferencias:

- Refracción sólo funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad (Sheriff & Geldart, 1991:282). En el caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método muestra resultados erróneos. Situación que se puede presentar en el Parque Central Simón Bolívar y en diferentes partes de la ciudad debido a la composición estratigráfica.
- Al estar muy cerca de una vía de alta concurrencia (ruido), en cual no hace posible que haya una buena interpretación de los datos con el método de refracción. De tal manera, se presentan errores de  $v_s$  debido a que esta técnica omite los 10 metros iniciales de profundidad, por lo cual le asigna a estos primeros metros velocidades aumentadas en aproximadamente 220 m/s.
- Independientemente del nivel de detalle al que se desee llegar, el método de refracción necesita de más configuraciones en la ubicación de la fuente que ReMi para interpretar los datos.
- ReMi no requiere de calibración de la respuesta de amplitud o frecuencia de los geófonos, como sucede en la refracción. ReMi sólo emplea la información de fase en el campo de onda registrado (Louie, 2001).

## 5.2 Parque Central Simón Bolívar

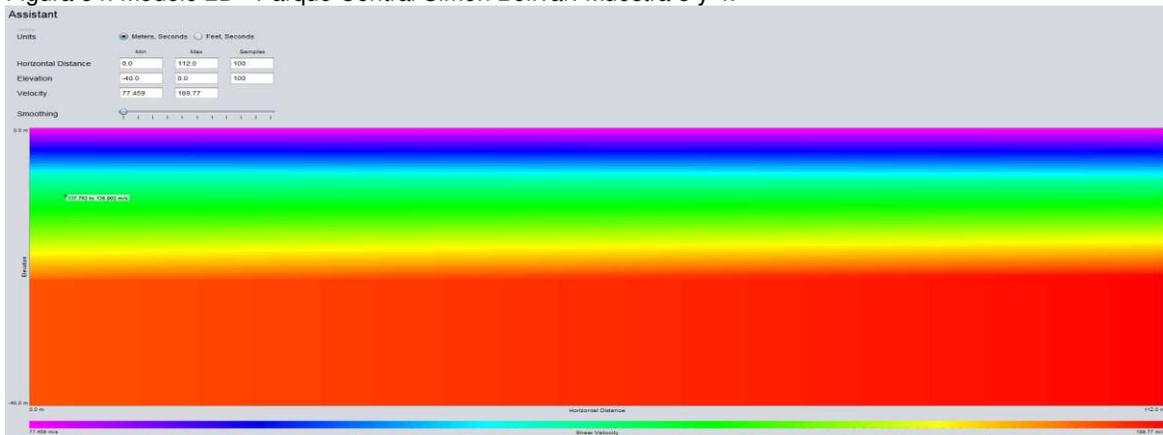
En primera instancia los tendidos realizados en este lugar alcanzan una profundidad de 40 metros que corresponde a un tercio del tendido. Debido a la geometría de la zona, las muestras 1, 2 (Figura 53) se dejaron con distancia de 8 metros entre geófonos y para las muestras 3 y 4 (Figura 54), se dejaron distancias de 6,5 metros entre geófonos. La distancia donde se evidencian 3 capas con velocidades que aumentan a medida que alcanzan mayor profundidad.

Figura 53. Modelo 2D - Parque Central Simón Bolívar. Muestra 1 y 2.



Fuente: La investigación.

Figura 54. Modelo 2D –Parque Central Simón Bolívar. Muestra 3 y 4.



Fuente: La investigación.

El error medio cuadrático para las muestras es de  $\pm 10$  m/s. La primera capa presenta un promedio de velocidad de 74.97 m/s con una profundidad aproximada de 9.575 metros de acuerdo a las tablas 7, 8, 9 y 10 y se representan en los colores morado y azul de la superficie. De acuerdo a la tabla 11, se determina que existen rellenos en arcillas, tierras y escombros, que seguramente fueron colocados cuando se reconformó el terreno.

La segunda capa presenta una velocidad promedio de 124.035 m/s a una profundidad aproximada de 24.225 metros como se ven en la figuras 53 y 54 corresponden a los colores cian al color amarillo, estas velocidades corresponden a un lacustre conformado por arcillas de consistencia media.

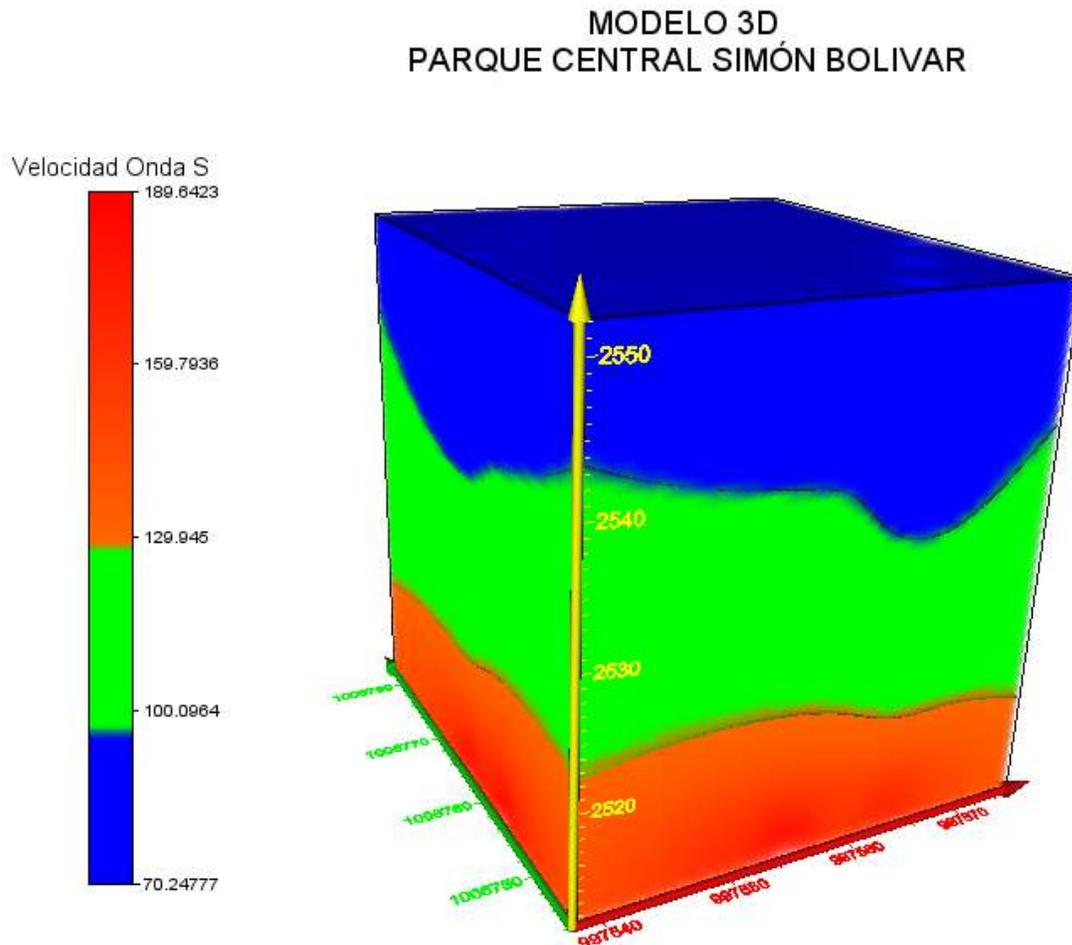
La tercera y última capa presenta una velocidad promedio de 183.590 m/s a una profundidad de 40 metros pertenece a la tonalidad roja intensa de la figuras 53 y 54, corresponden a lacustre conformado por arcillas y una baja presencia de limos.

Teniendo en cuenta los valores de la Tabla 11, se puede observar que las arcillas normales dan altas velocidades sin embargo, esta zona al ser un lacustre con alta presencia de agua no permite viajar las ondas fácilmente en el medio, por lo cual las velocidades son bajas, como se pudo evidenciar.

La visualización tridimensional de la zona central de la grilla generada en el software Voxler se muestra a continuación (Figura 55). El color azul representa la superficie del terreno de los rellenos utilizados con un espesor aproximado de 10 metros con velocidades entre el rango de 70 m/s a 90 m/s, como se puede observar su distribución de volumen no es homogénea, el color verde con un espesor aproximado de 25 metros, los lacustres de arcillas que alcanzan velocidades aproximadas de 130 m/s y a partir de este horizonte se empieza a

consolidar el volumen de manera más compacta y homogénea debido al peso de los suelos superiores. Por último el color naranja con un espesor aproximado de 40 metros, arcillas con alta plasticidad con velocidades superiores a 130 m/s. Los resultados obtenidos fueron contrastados con el Estudio de suelos y análisis de cimentaciones del Complejo Acuático Simón Bolívar realizado en el año 2003 y los resultados concuerdan en un 87%.

Figura 55. Modelo 3D.



Fuente: La investigación

## CONCLUSIONES

Las condiciones permanentes de las zonas urbanas como el flujo vehicular, obras de infraestructura y las personas que allí habitan, son la mejor combinación de factores para generar altos niveles de ruidos que permiten la adquisición de datos sísmicos mediante el método ReMi. Las facilidades de traslado de equipos, la cantidad de personal y procesamiento resultan ser la técnica más efectiva y económica en dichos entornos.

Dentro de los objetivos planteados al inicio de este trabajo de investigación se estableció comparar los resultados del método realizando la modificación de las configuraciones en los geófonos. Se pudo concluir que la diferente disposición de los geófonos en terreno permite obtener diversas profundidades de acuerdo a la necesidad del estudio serán de mayor o menor resolución de la estratigrafía captada por los equipos. A menor distancia entre cada geófono del tendido la resolución será mayor discriminando los perfiles estratigráficos pero tendrá menor alcance en profundidad, en caso contrario la relación será inversamente proporcional.

Para el sector de la Avenida Circunvalar, se obtuvo de profundidad a 60 metros, con tres capas con velocidades entre 340 m/s a 2000 m/s y espesores cercanos a 18 metros. Con lo cual se concluye que la zona corresponde con los materiales presentes en las formaciones Cacho y Bogotá, es decir que presentan material superficial, arcillas con trazas de arenas de baja compresibilidad y algo de gravas y por último, areniscas de grano medio consolidadas con transiciones de arcillolitas. Esto permite confirmar que esta zona es muy consolidada, información que coincide con el mapa de zonas de respuesta sísmica a Piedemonte. Las velocidades son altas debido a que se encuentra la roca más somera.

En el Parque Central Simón Bolívar, se captura una profundidad de 40 metros, con capas que tienen velocidades en el rango de 70 m/s y 190 m/s con espesores promedio de 15 metros. Se determina que la zona corresponde con los compuestos de la formación Sabana, es decir suelos con rellenos, arcillas de consistencia media y por último arcillas con baja presencia de limos. Todos estos materiales presentan humedad teniendo en cuenta que se ubica en la zona de Lacustre Aluvial del mapa de zonas de respuesta sísmica. Las velocidades son menores a las de la avenida circunvalar ya que son suelos jóvenes, menos consolidados y con altos contenidos de agua.

A partir de la comparación del método de refracción convencional con el método ReMi en la Avenida Circunvalar, se puede evidenciar como el ruido ambiental para el primer caso no es funcional ya que al momento de realizar el procesamiento en el software utilizado, no es posible reconocer a simple vista los primeros arribos de

llegada de las ondas “S” a cada geófono del tendido lineal. En refracción convencional es indispensable tener un medio en calma donde sea afectado únicamente por una fuente que puede ser ubicada en el inicio, medio o final del tendido, sin embargo debe ser aplicada en intervalos de tiempos diferentes.

Los procesos de interpolación y visualización que ofrece el software Voxler permite la generación del modelo 3D para tener una aproximación del subsuelo sin realizar ningún tipo de actividad invasiva que pueda perjudicar el ambiente en el que se desarrolla el método. Esta técnica de interpretación permite entender de forma más cercana la realidad del subsuelo, integrando las técnicas de procesamiento, así se realizarían estudios a gran escala para poder desarrollar modelos enfocados a los estudios sísmicos.

## RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en zonas urbanas, la practicidad de transportar y procesar la información levantada por medio del método ReMi puede ser usada en los estudios de geotecnia para infraestructura, exploración de hidrocarburos y minería ya que es menos invasivo, disminuye los impactos generados de estas actividades pues como se pudo evidenciar en ningún momento durante la realización de este trabajo de investigación se hizo uso de explosivos que pudieran afectar alguno de los sitios de estudio y se obtuvo la información del tipo de suelo que es la base para cualquier proyecto de exploración o explotación. Las empresas encargadas podrán disminuir costos de transporte, personal, tiempo y además lograrán tener los mismos datos de caracterización del subsuelo.

Con los resultados obtenidos de las zonas de estudio y notando la aproximación con la información previamente revisada de las zonas de respuesta sísmica establecidas en el año 2010, se sugiere realizar la adquisición de datos sísmicos por localidad para realizar la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad, no solo con fines de lineamientos que regulan la construcción de edificaciones, sino generar información de amenaza y vulnerabilidad sísmica, de esta manera se conocerían exactamente las zonas de mayor riesgo en Bogotá ante el evento sísmico y así empezar a determinar el nivel de resiliencia en las zonas de mayor peligro. Por otro lado, el planteamiento del año 2010 se hizo por medio de acelerógrafos los cuales detectan frecuencias más altas, por lo tanto esta clasificación de zonas está generalizada para toda Bogotá, con ReMi sería posible aumentar la precisión de la información

Es posible combinar la técnica con otros métodos geofísicos para calcular otros parámetros que no son posibles de adquirir con solo ReMi, por ejemplo, realizar análisis de la velocidad de onda " $P$ " ya que como se probó en el trabajo de investigación en lugares urbanos el método de refracción no es preciso, en otros lugares se puede realizar los dos métodos y obtener mejores resultados.

## BIBLIOGRAFIA

AOSTA, J., Ulloa, C. Memoria explicativa de la geología de la plancha 246 Fusagasugá. Santafé de Bogotá, INGEOMINAS, 1998.

ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D,C., Decreto 523 de 2010, Bogotá D.C., 2010.

AKI, K.. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremores. Bull Earthquake Res Inst., 1957. 415- 456 p.

ARIAS SERNA y SARAIVIA S.A. Estudio de suelos y análisis de cimentaciones Complejo Acuático Simón Bolívar. Avenida 63 con Carrera 50. 2003.

BARD, P. Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation? The effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1999, 1251- 1279 p.

BOEIRO, A y DE GOUVEIA, G,. Determinación y Análisis de espectros de Respuestas en los municipios Bolívar, Urbaneja, Sotillo y Guanta, Estado de Anzoategui, 2009.

BOYD, T. Introduction to geophysical exploration. Disponible en [http://www.mines.edu/fs\\_home/tboyd/GP311](http://www.mines.edu/fs_home/tboyd/GP311), 1999.

BSSC. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). Building Seismic Safety Council, Washington, 2003.

CANTOS, J. Tratado de geofísica aplicada. Madrid, 1973, 520 p.

CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. European Standard. Versión en inglés, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2003.

DIMATE, C. Amenaza Sísmica sobre Bogotá ¿Leyenda o Realidad? Revista Innovación y Ciencia Volumen XIII. Disponible en [http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/Amenaza\\_Sismica\\_Bogota.pdf](http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/Amenaza_Sismica_Bogota.pdf), 2006.

ECHEVERRY PINTO, N. Ensayo de Prospección y exploración por Geofísica (REFRACTION MICROTREMOR) Zona de falla Humedal Jaboque. INGEPAVI LTDA Ingeniería de Geotecnia y Pavimentos. Obtenido de <http://eacennt09.acueducto.com.co:8085.pdf>, 2009.

ESCOBAR CATRO, G., GONZALEZ MARENTES, L., ROJAS OCHOA, J., DIAZ PARRA, F., GARCIA LOPEZ, J. Decreto 523 de 2010. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40984>.

ESPINDOLA, M. y JIMENEZ, Z. Terremotos y ondas sísmicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica, 1992.

FLORES-ESTRELLA, H., LOMNITZ, C. y YUSSIN, S. Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC. Geos., 2004, 438-445 p.

GASCON, R. Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, área metropolitana del Estado Anzoategui. UCV, 2009.

GRANDA, A., GRANDA, T. y MADRID, A. El método de la sísmica pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas. Internacional Geophysical Technology, Madrid, 2005.

HOORN, K. Quebrada del Mochuelo, type locality of the Bogotá formation: a sedimentological, petrographical and palynological study. Hugo de Vries Laboratory, Amsterdam, 1988.

HUBACH, E. Geología petrolífera del departamento de Norte de Santander. Ingeominas, Bogotá, 1931.

KANSAS GEOLOGICAL SURVEY. The Power of the Multichannel Approach. Disponible en <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html>.

INSTITUTO DISTRITAL DE CULTURA Y TURISMO, Construcción del Espacio Público tres parques de Bogotá: Nacional, El Tunal, Simón Bolívar, 2009.

JULIVERT, M. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de estructuras. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1992.

LOBO-GUERRERO USCATEGUI, A. La Falla de Bogotá en Cundinamarca. Disponible en [http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/23\\_Falla\\_de\\_Bogota\\_en\\_Cundinamarca\\_presentacion,2005](http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/23_Falla_de_Bogota_en_Cundinamarca_presentacion,2005).

LOBO-GUERRERO USCATEGUI, A. Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Sociedad Colombia de Geotecnia-Sociedad colombiana de Ingenieros. Disponible en [http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16\\_Geologia\\_hidrogeologia\\_Sabana\\_Bogot,1992](http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogot,1992).

LOUIE. Fater, Better, Shear - Wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 9, 2001.

MASUDA, H. Seismic refraction analysis for engineering study: Revised edition. Oyo technical note. Tokyo, 1981, 40p.

MENDES, M. Caracterización geofísica del subsuelo de la zona oeste de Barcelona-Edo. Anzoategui aplicando métodos sísmicos y gravimétricos, 1981.

MONTOYA, D., REYES, G. Geología de la Sabana de Bogotá. Instituto Colombiano de Minas y Energía, 1981.

ROSALES, C. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Universidad del Valle, 2001. 99-133 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Delimitación y Zonificación Ambiental de Manejo del Parque. Disponible en <http://oab.ambientebogota.gov.co/>, 2003.

SHERRIF, R.E., GELDART, L. P. Exploración sísmológica: Historia, teoría y obtención de los datos, Vol.1. Editorial Limusa, México D.F., 1991, 520 p.

TOKIMATSU, K. Geotechnical site characterization using surface waves. Earthquake geotechnical Engineering, Editorial Ishihara, Balkema, Rotterdam, 1997.

ULLOA, C., RODRIGUEZ, E. Geología del Cuadrángulo K-12 Guateque, Colombia. INGEOMINAS, Informe 1701, Bol. Geol., 22(1):3-56, Bogotá, 1979.

VERNAEZ, G., CANO, V., SCHMITZ, M., MANCHEGO, M., SALCEDO, A, COURTEL, F., LEAL, V., MADRID, L, FLORES, K, RODRIGUEZ, I., POMBO, A, CAPRILES, M., GUZRAIN, J., PAO, M., REINOZA, C., ROCABADO V., AGUILAR, A, JEGAT, H., ALVARADO, M., CERRADA, M., DUGARTE, M., FERRER, C., FLORA, J., KLARICA, S., GUERRERO, O., RIVEN, P., VERA, B., GUTIERREZ, J., GUINAN, W., MONTILLA, N., CORDERO, A, LIDAYO, A., CHARON, L, MALDONADO, N., ESTEVEZ, R., SFFAILLE, J., SALDIVIA, L, PAREDES, G., MARIN, W., MORALES, C., GARTH, K, RAMIREZ, O., HEREDIA, J., FERMIN, C., HERNINDEZ, R., RIVEN'S, P., RAMOS, L, SUIREZ, M., VITORIA, J., MARTINEZ, A., MEDINA, J., QUINTERO, B., ROMERO, G., AVENDAILO, I., DIAZ, J.. SANZONETTI, J. Informe Técnico de Avance correspondiente al Segundo A110 del Proyecto de investigación aplicada a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos (FONACIT 2007000939). Caracas. Venezuela, 2011. 68-75 p.

XIA, J., MILLER, R., PARK, M. Estimation of near-surface shear-wave velocity of inversion of Rayleigh wave, Geophysics, 1999. 691-700 p.

## ANEXOS

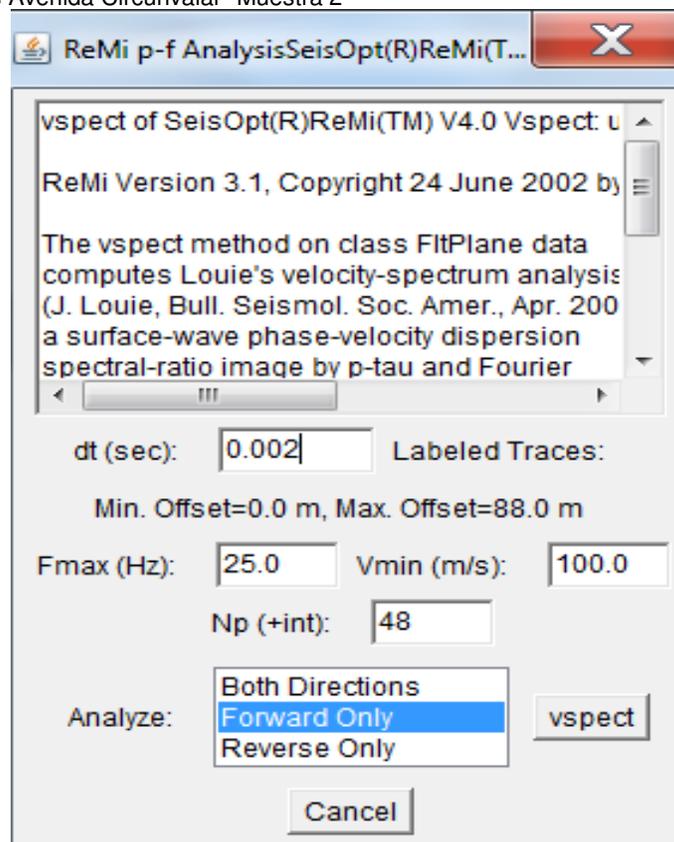
### ANEXO A. RESULTADOS AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLÍVAR.

A continuación, se presenta los resultados de las Muestras 2, 3, 4, 5, 6 de la Avenida Circunvalar, y todas las muestras del Parque Central Simón Bolívar.

#### ReMi Avenida Circunvalar

##### Muestra 2

Figura 56. Parámetros Avenida Circunvalar- Muestra 2

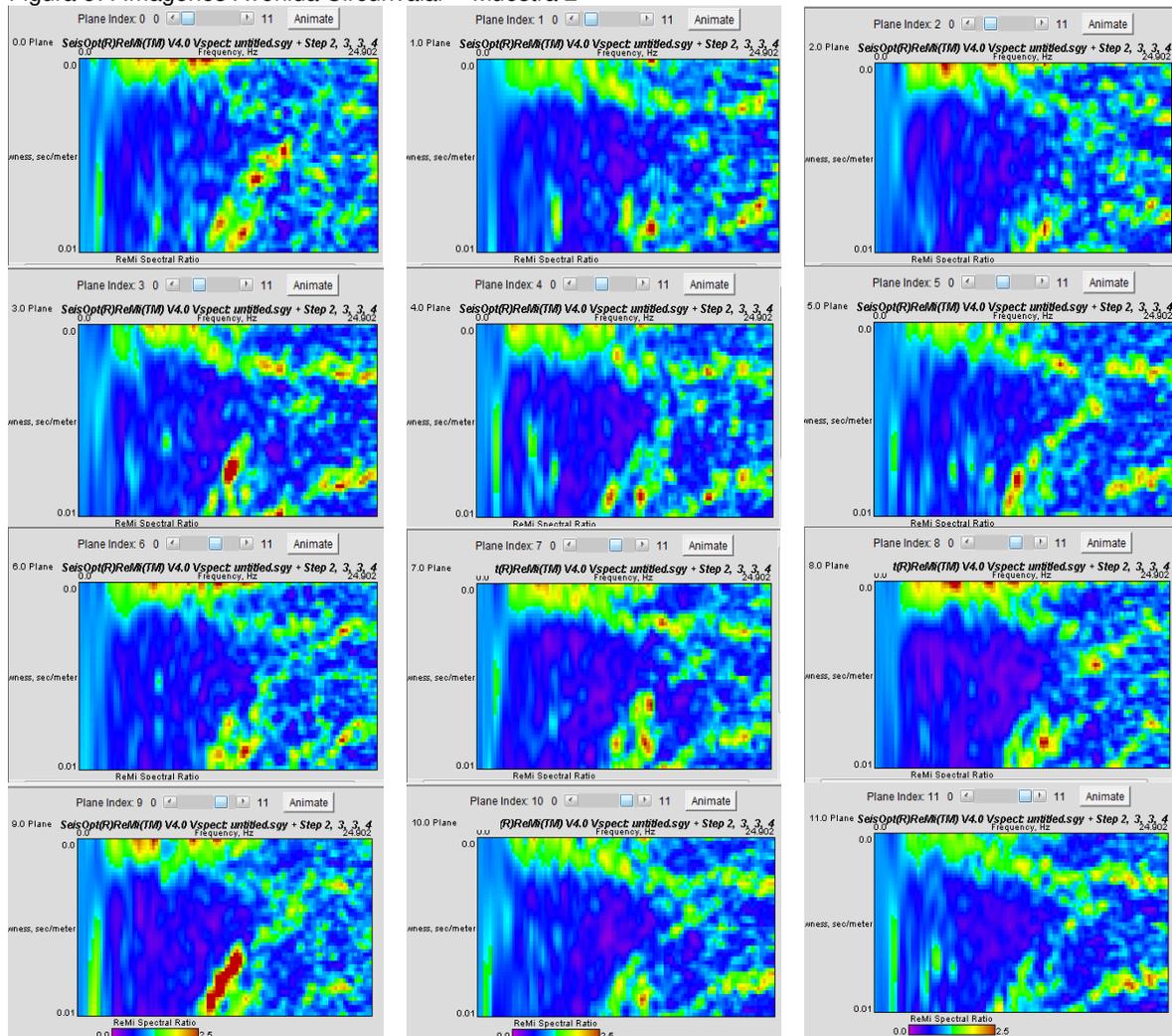


Fuente: La investigación

Esta muestra se realiza con el tendido a 120 metros, geófonos a distancia de 8 metros con la fuente del flujo vehicular más la aplicación de golpes al principio de la línea con un martillo (Figura 56).

El cambio en el software se realiza en la ventana de la configuración de tiempo de grabación y en el análisis de la trazas. Se repite el procedimiento de las imágenes y la curva de dispersión (Figura 57). Ahora se debe usar el Modulo ReMiDisper.

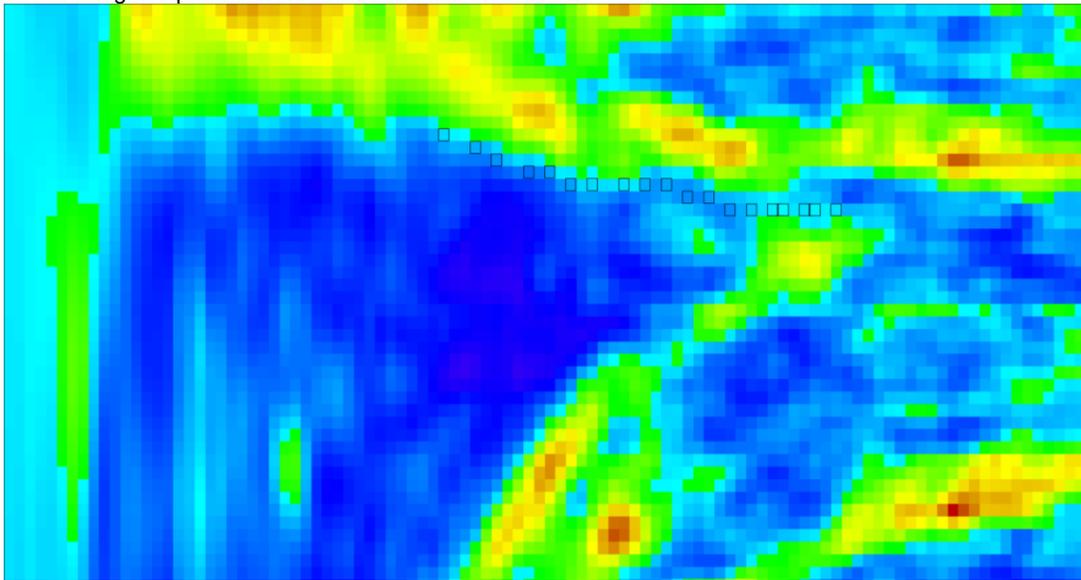
Figura 57. Imágenes Avenida Circunvaral – Muestra 2



Fuente: La investigación

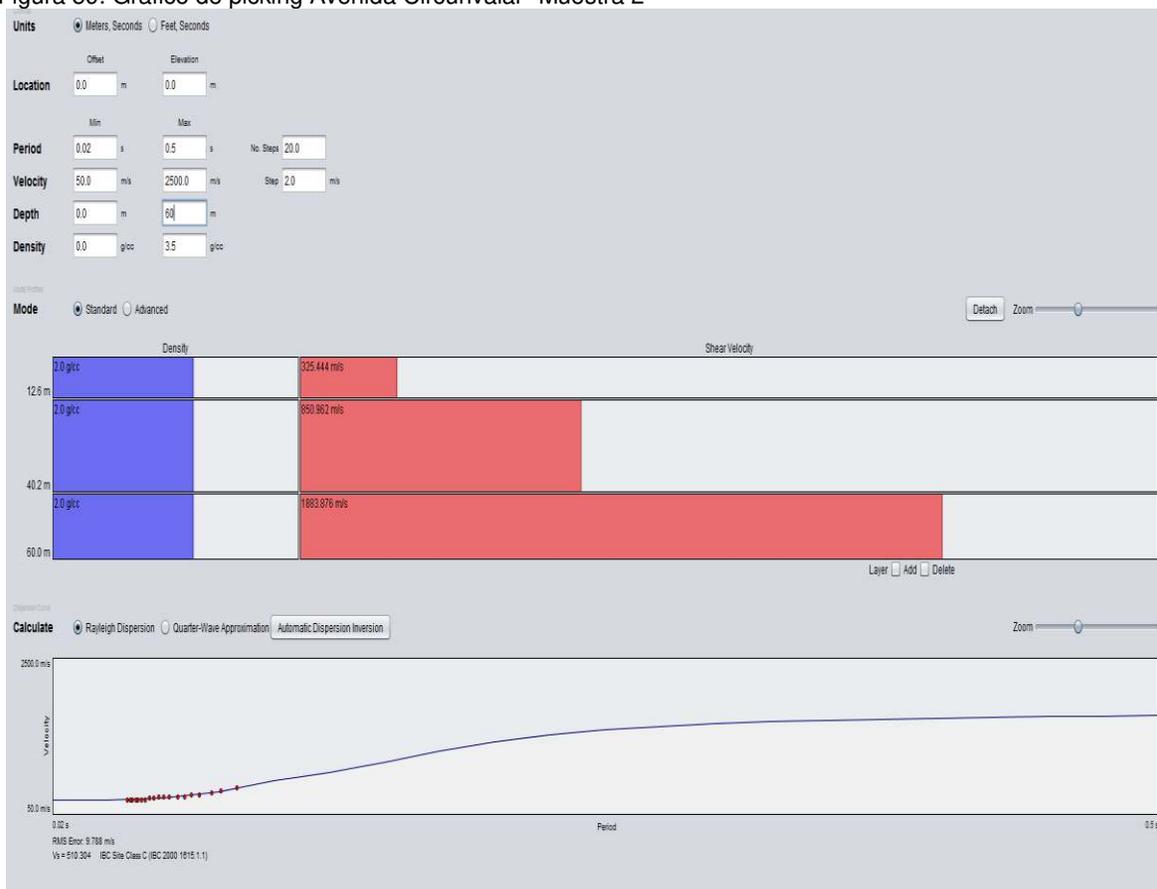
Según las indicaciones dadas en la Muestra 1, al revisar las imágenes de la Figura 29 se escogen las imágenes 1-3-4-5-7-10-11 para ser apiladas (Figura 58).

Figura 58. Imagen Apilada Avenida Circunvalar- Muestra 2



Fuente: La investigación

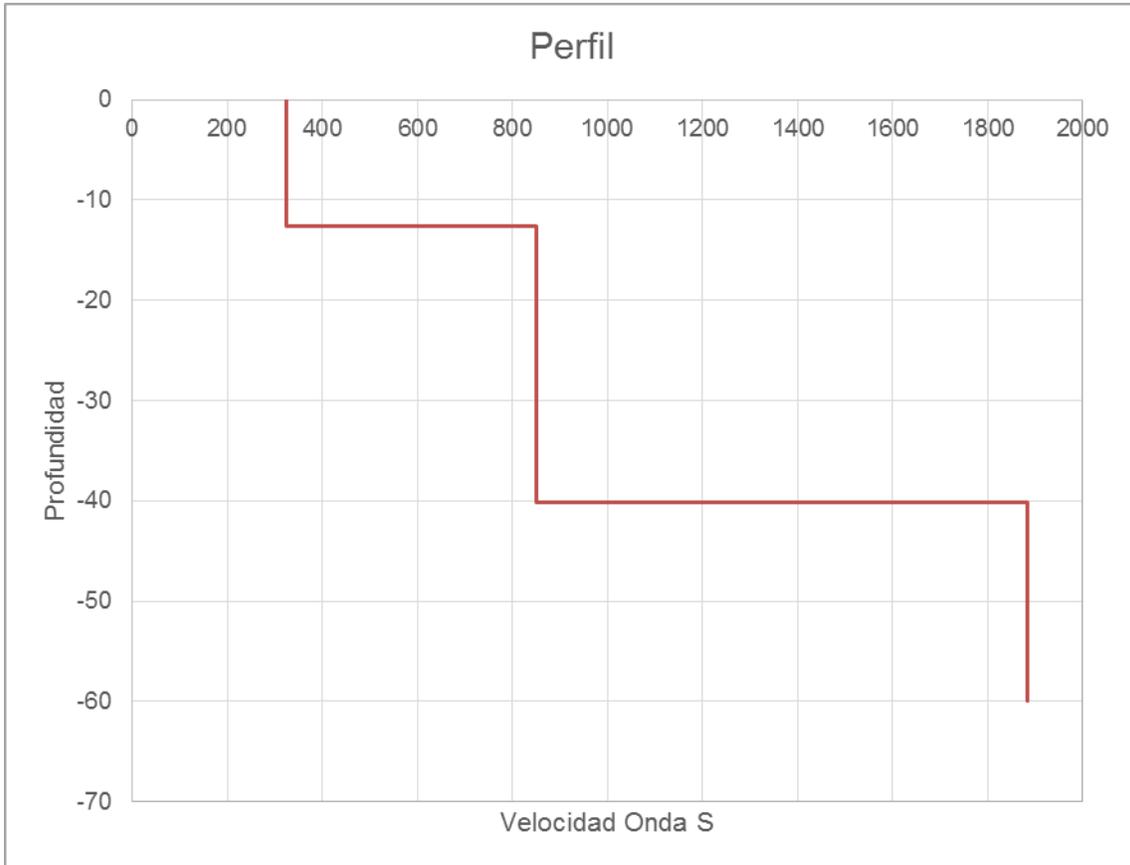
Figura 59. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 2



Fuente: La investigación

Como se explicó anteriormente, para la muestra 2 se obtiene un resultado con un RMS menos a 10 m/s.

Figura 60. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 2



Fuente: La investigación

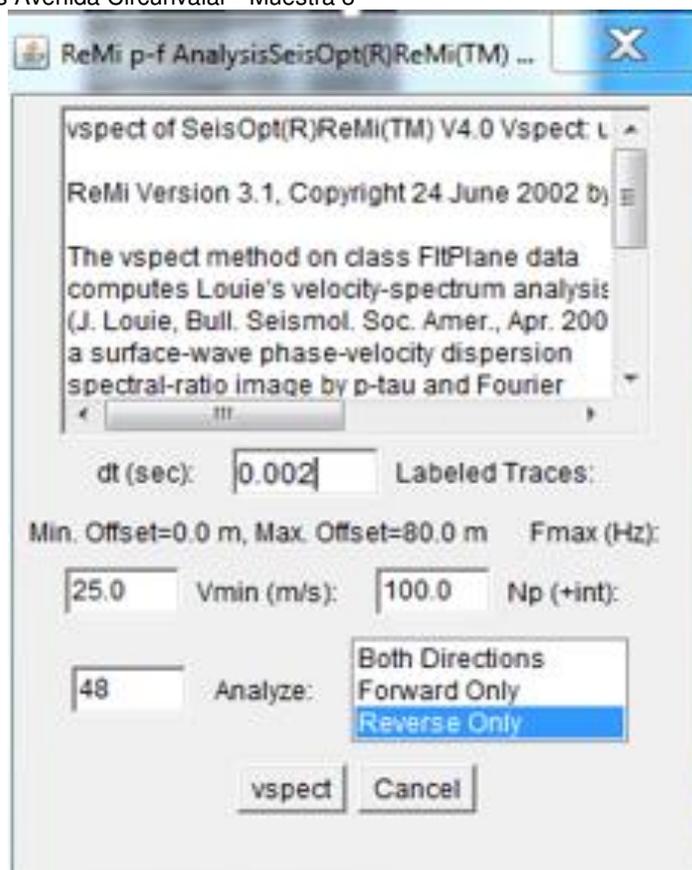
Tabla 4. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 -12.6	325.443787
12.6 - 40.2	850.961538
40.2 – 60	1883.87574

### Muestra 3

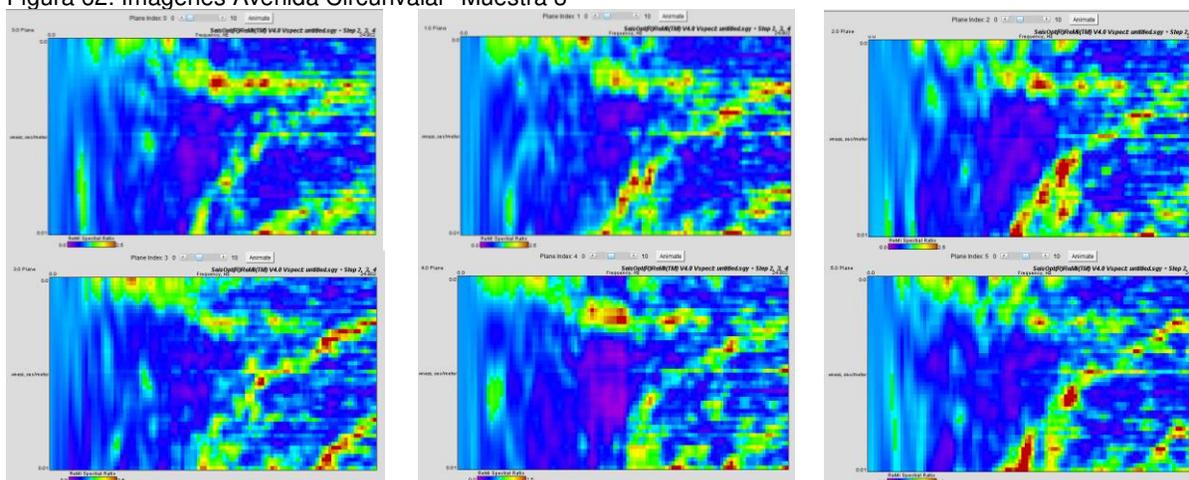
La configuración del tentido en esta muestra se mantiene con el tentido en 120 metros y 8 metros entre geofonos. El ruido se genera con el martillo en esta ocasión al final del tentido para aplicar el análisis de la traza en reversa (Reverse Only) (Figura 61).

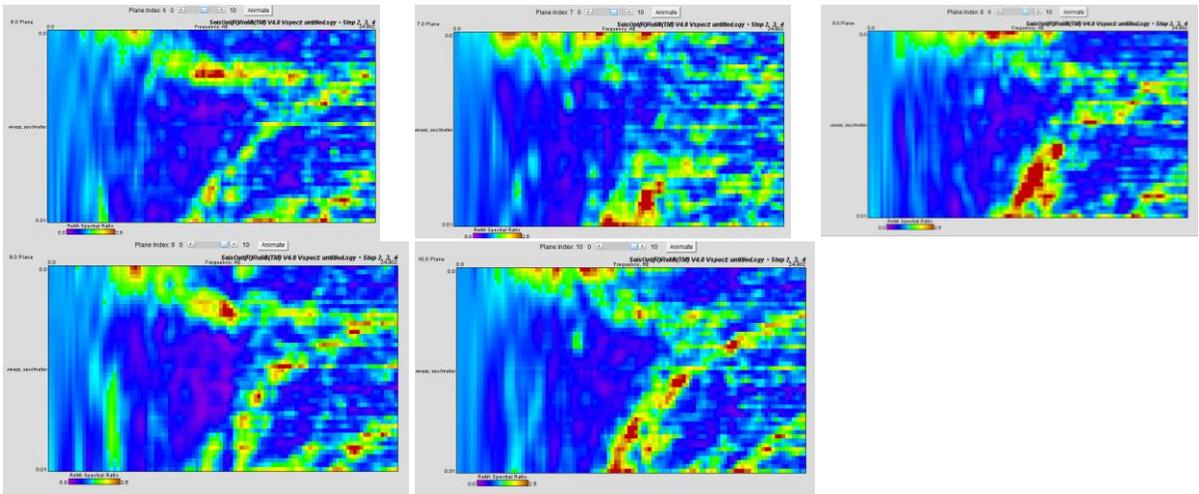
Figura 61. Parámetros Avenida Circunvalar - Muestra 3



Fuente: La investigación

Figura 62. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 3

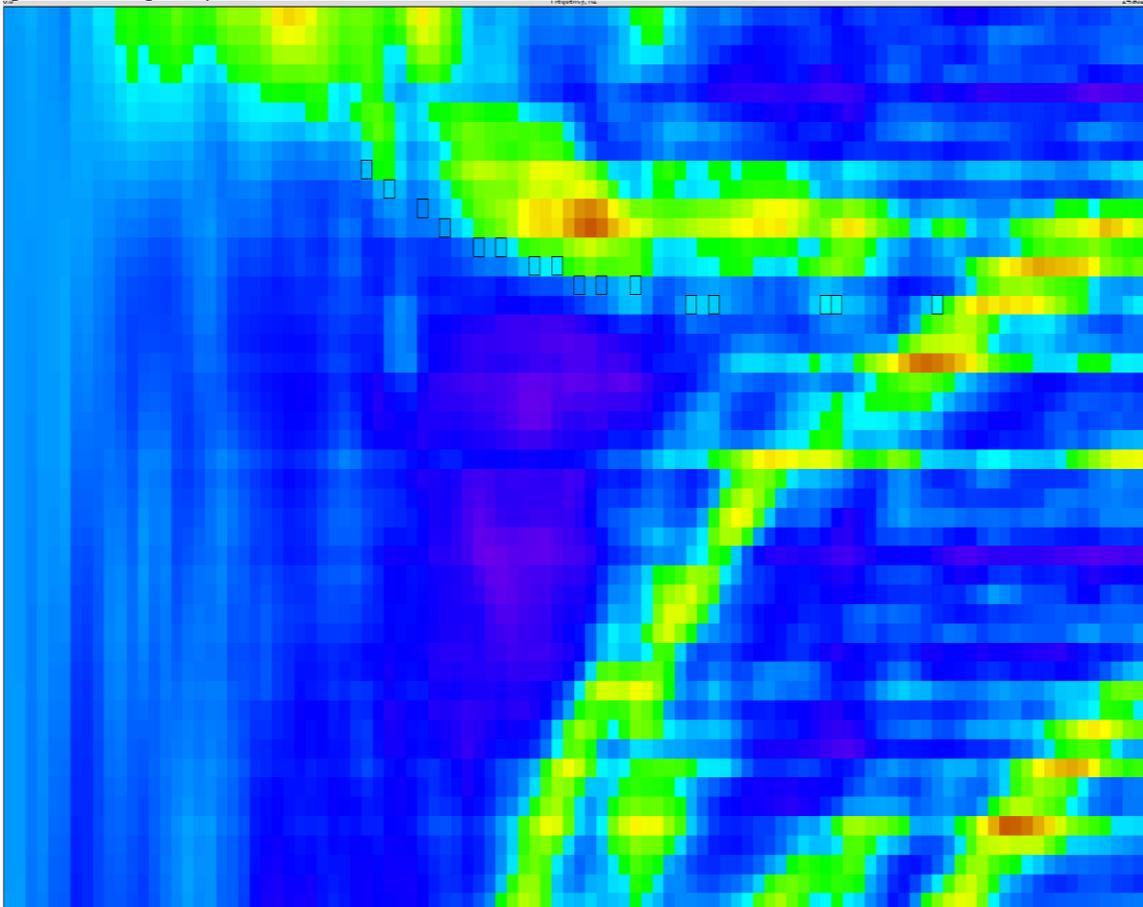




Fuente: La investigación

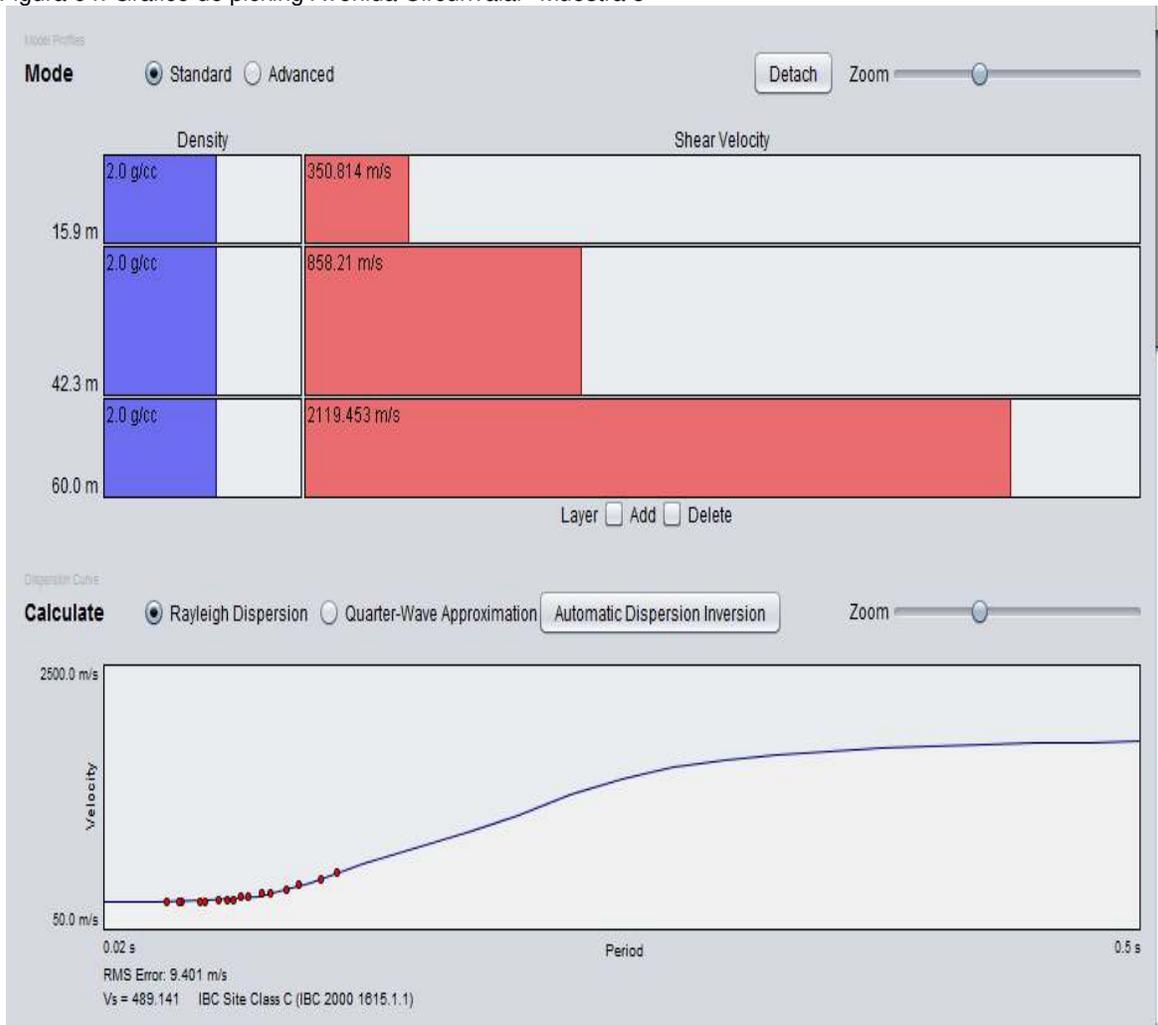
En esta oportunidad se seleccionan las imágenes 0-1-3-4-9-10 (Figura 63).

Figura 63. Imagen Apilada Avenida Circunvalar - Muestra 3



Fuente: La investigación

Figura 64. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 3



Fuente: La investigación

Figura 65. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 3

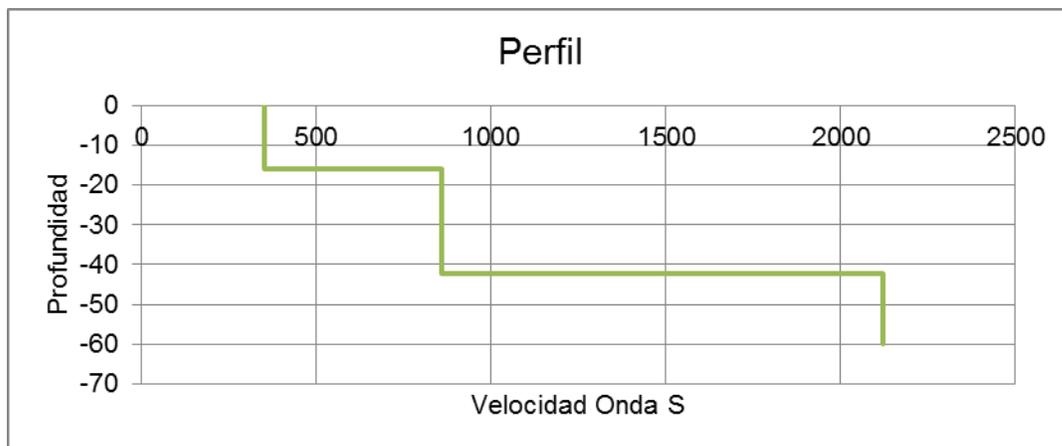


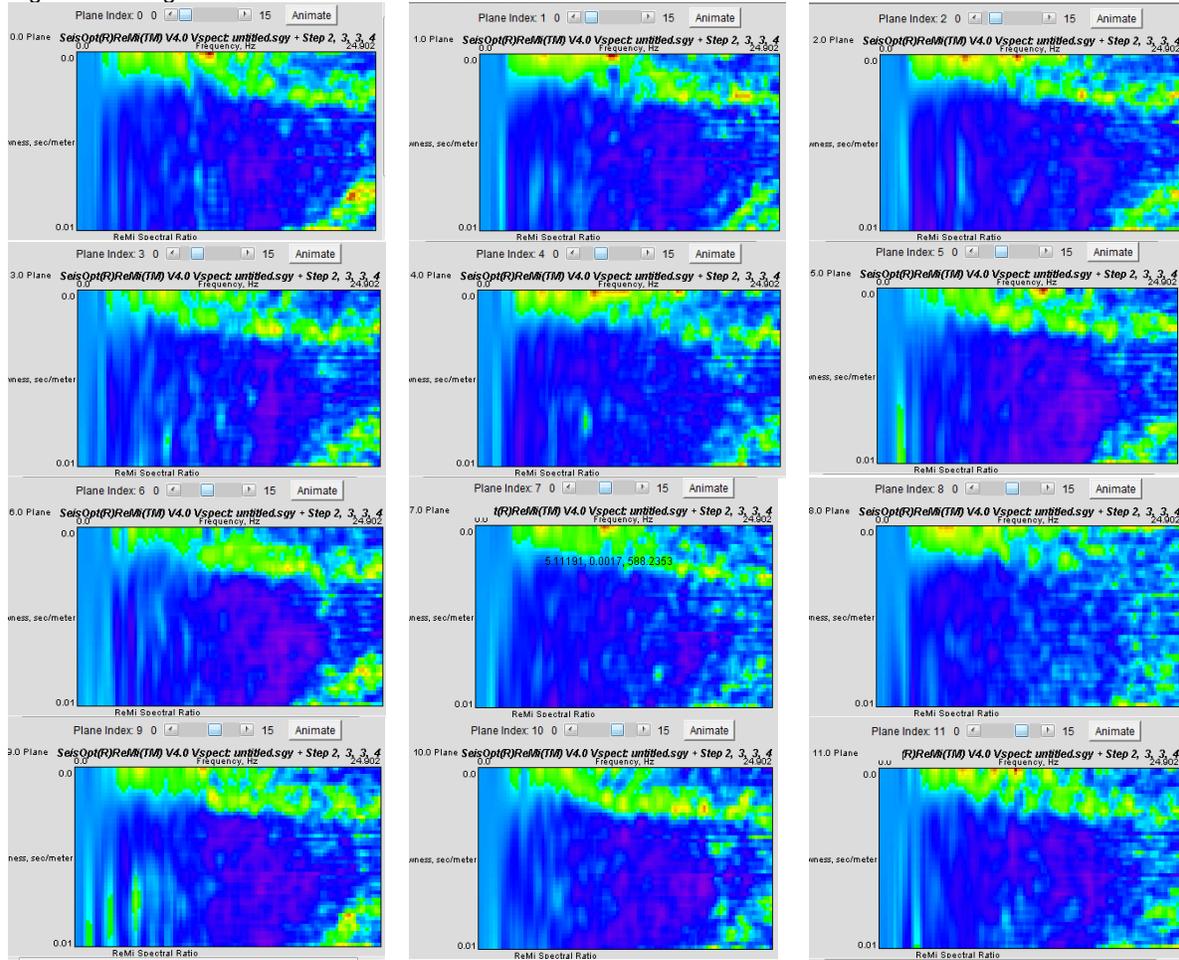
Tabla 5. Información de perfil Avenida Circunvarlar- Muestra 3

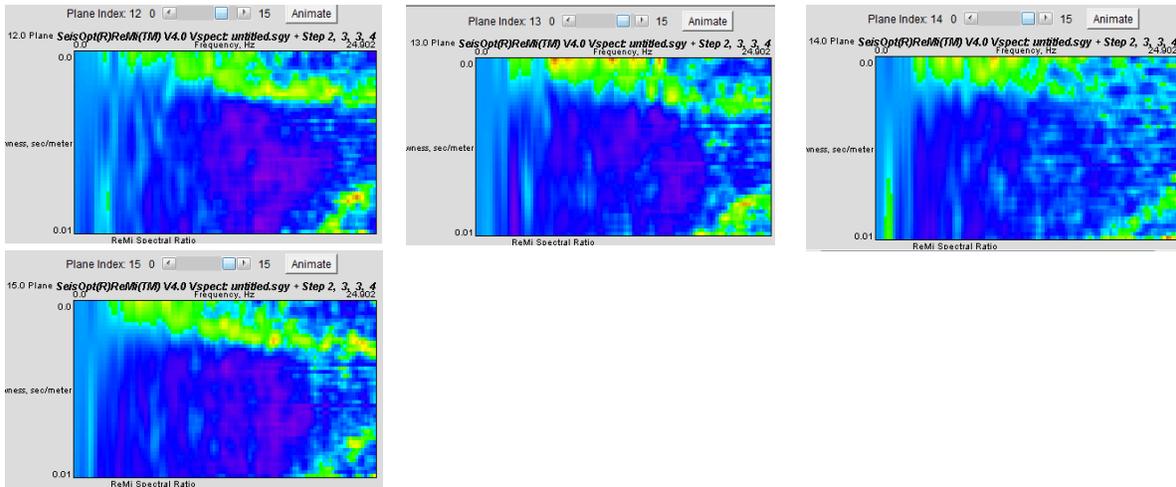
Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 - 15.9	350.813609
15.9 - 42.3	858.210059
42.3 - 60	2119.45266

Muestra 4

A partir de estas adquisiciones se modifica el tendido, se reduce el espacio entre geófonos a 4 metros, de esta manera el tendido queda de 60 metros de longitud. En la Figura 66 se ven las imágenes obtenidas cuando la muestra se realiza tomando como única fuente el flujo vehicular de la Avenida Circunvarlar.

Figura 66. Imágenes Avenida Circunvarlar- Muestra 4

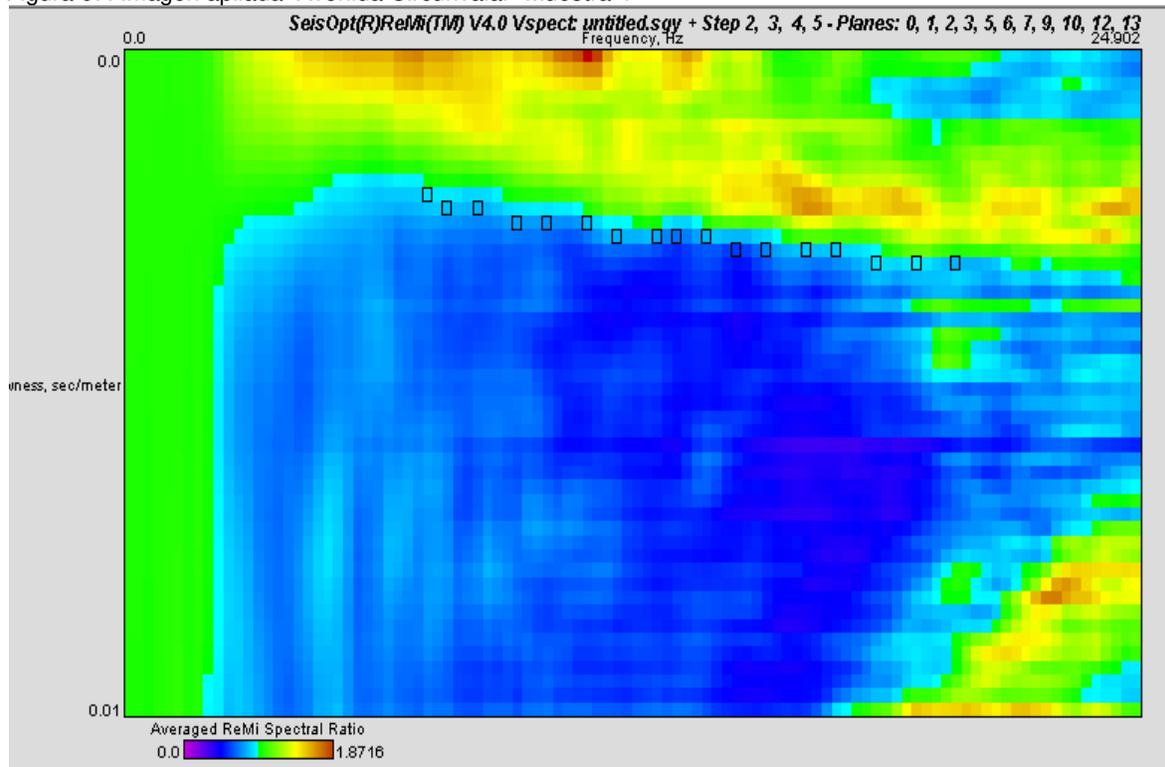




Fuente: La investigación

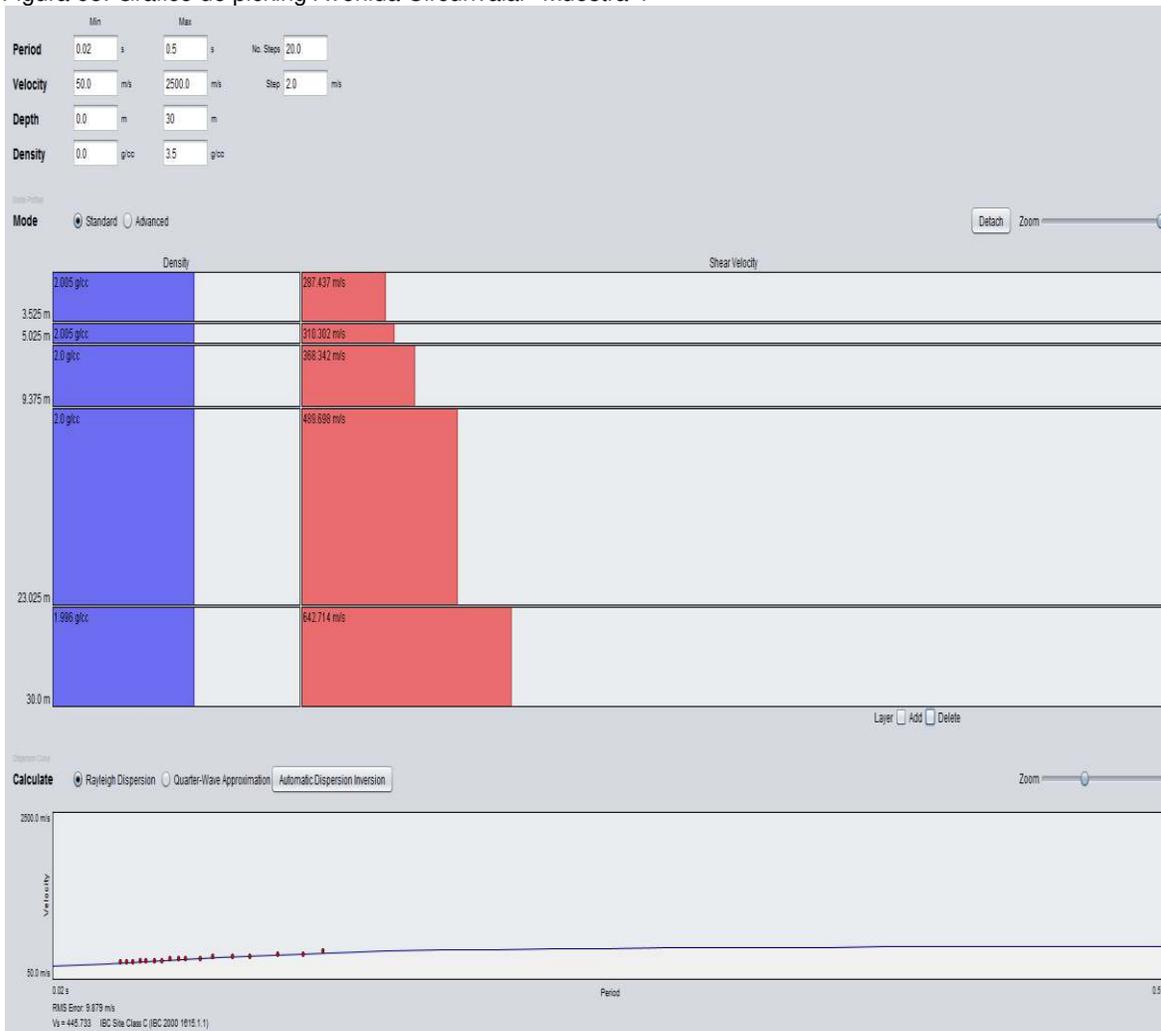
Para esta muestra se seleccionan las imágenes 0-1-2-3-5-6-7-9-10-12-13. (Figura 67)

Figura 67. Imagen apilada Avenida Circunvarlar- Muestra 4



Fuente: La investigación

Figura 68. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 4



Fuente: La investigación

Figura 69. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 4



Fuente: La investigación

Tabla 6. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 4

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0-3.525	287.4371859
3.525-5.025	310.3015075
5.025-9.375	368.3417085
9.375-23.025	489.6984925
23.025-30	642.7135678

La diferencia presentada entre los datos de los tendidos a 120 metros con los de 60 metros se desarrollaran en el capítulo 5 para dar mayor claridad al respecto.

### Muestra 5

Figura 70. Impulso sísmico

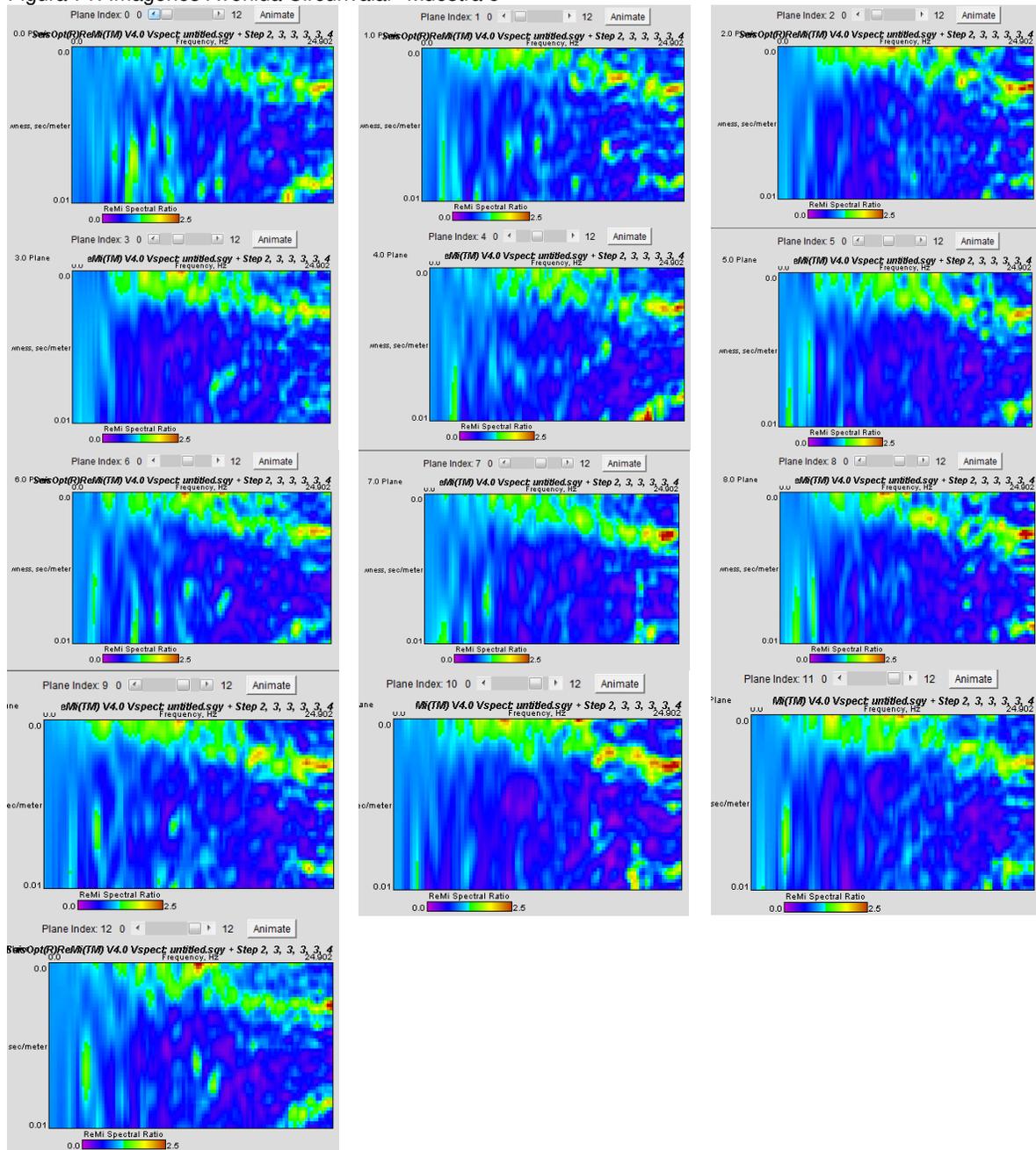


Fuente: La investigación

En esta muestra el tendido es de 60 metros de longitud, espacio entre geofonos de 4 metros con la fuente de emisión de ruido producida por el martillo al inicio del tendido.(Figura 70).

Se realiza el mismo procedimiento que en las muestras 1,2 y 3 (Figura 71).

Figura 71. Imágenes Avenida Circunvarlar- Muestra 5



Fuente: La investigación

La selección de las imágenes se hace con 3-5-6-7-9-11-12. (Figura 72)



Figura 74. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 5



Fuente: La investigación

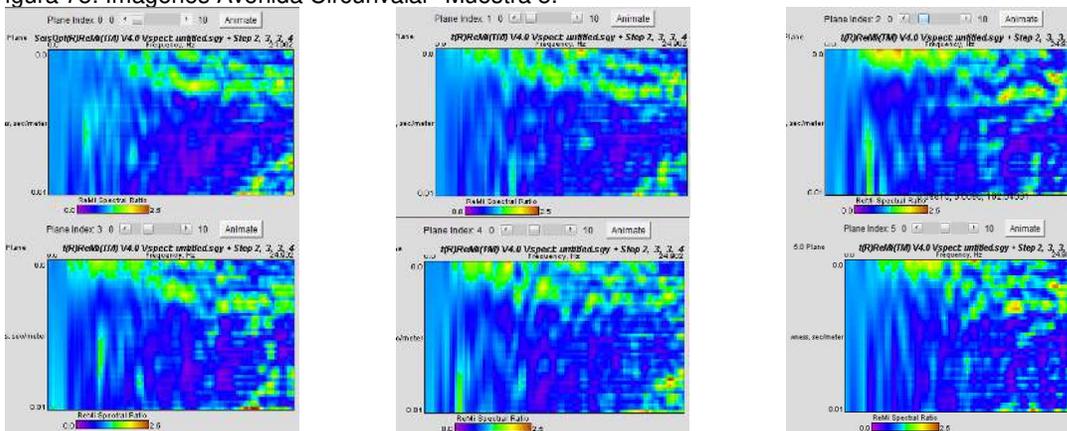
Tabla 7. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 5

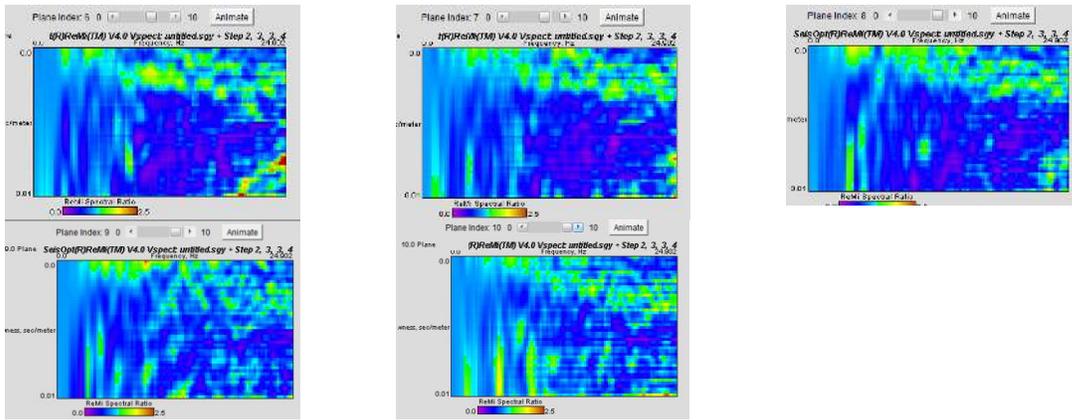
Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0-3.525	331.407035
3.525-5.475	350.753769
5.475-9.375	373.61809
9.375-21.675	542.462312
21.675-30	642.713568

### Muestra 6

En esta muestra el tendido es de 60 metros de longitud, espacio entre geofonos de 4 metros con la fuente de emisión de ruido producida por el martillo al final del tendido.

Figura 75. Imágenes Avenida Circunvalar- Muestra 5.

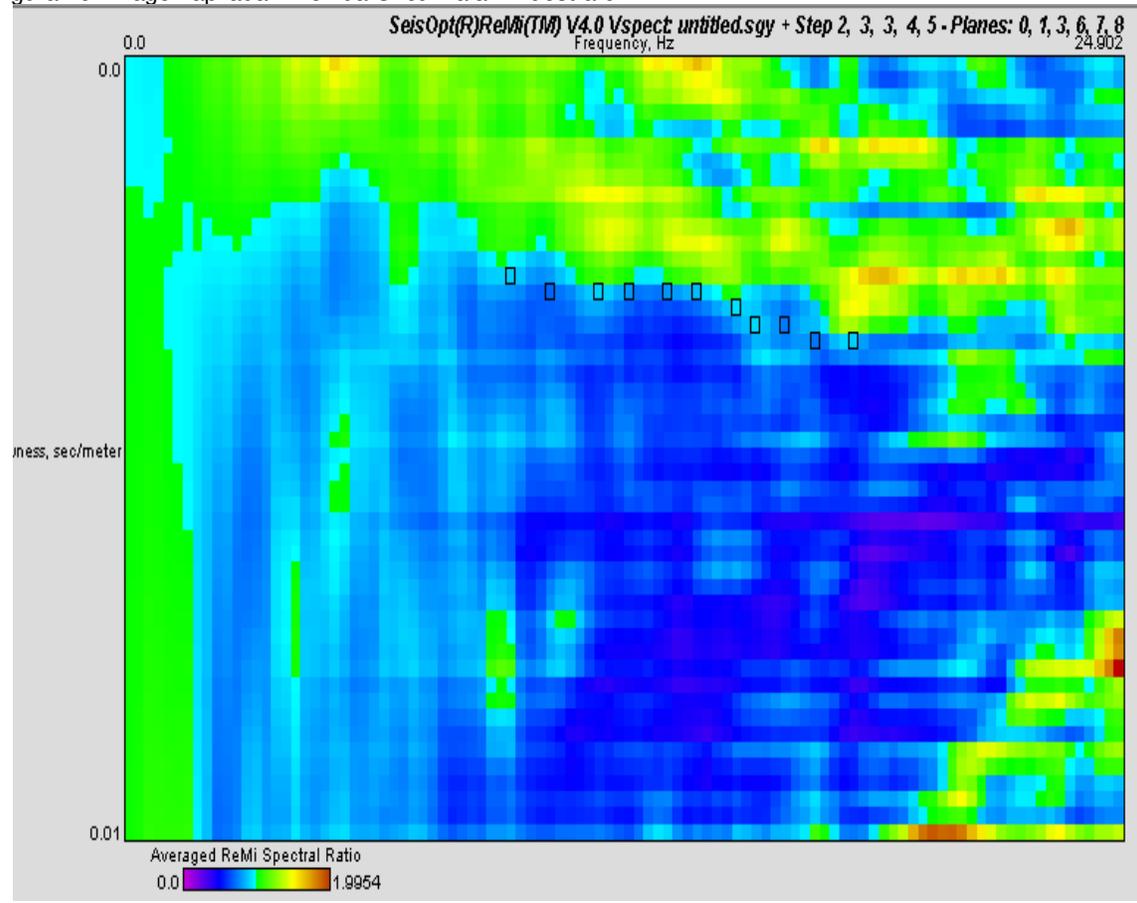




Fuente: La investigación

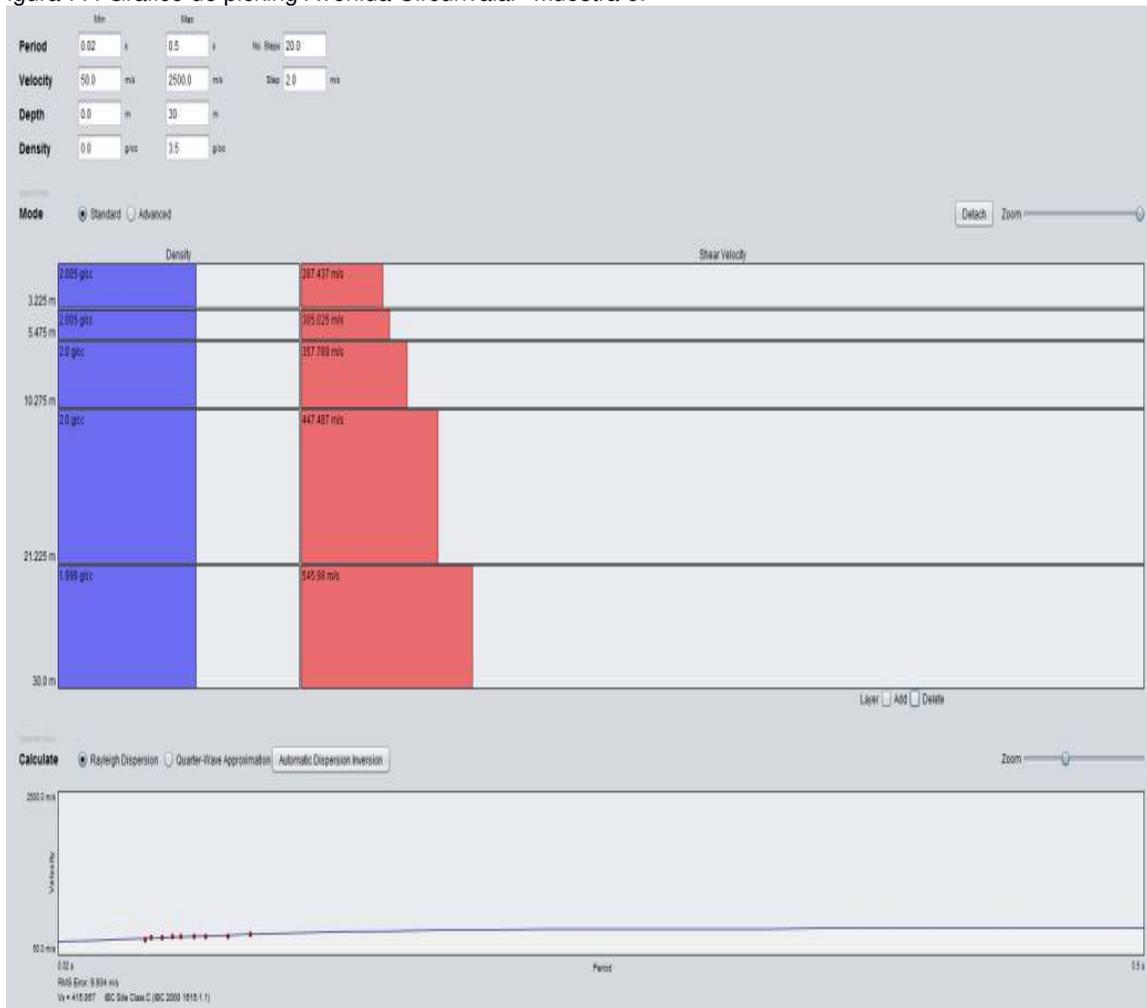
Se seleccionan las imágenes 0-1-3-6-7-8 (Figura 76).

Figura 76. Imagen apilada Avenida Circunvalar- Muestra 6.



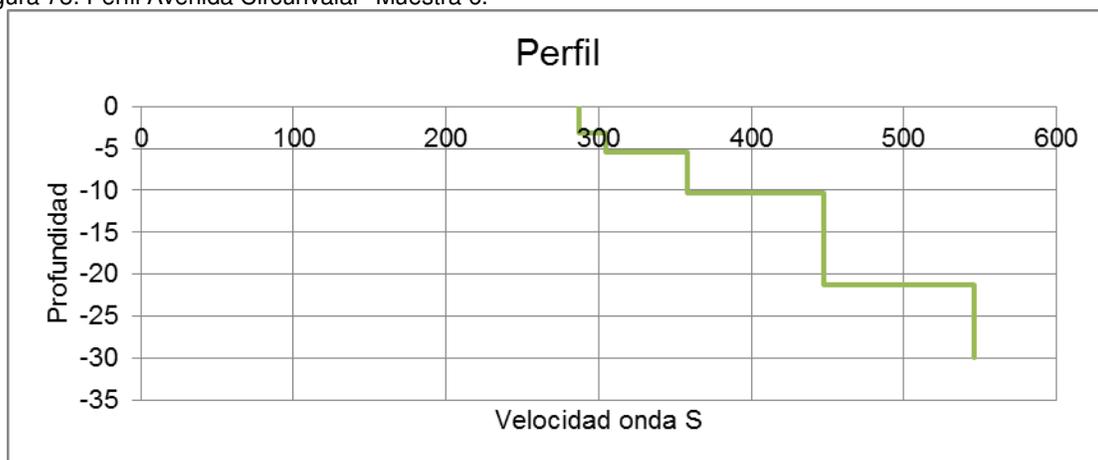
Fuente: La investigación

Figura 77. Gráfico de picking Avenida Circunvalar- Muestra 6.



Fuente: La investigación

Figura 78. Perfil Avenida Circunvalar- Muestra 6.



Fuente: La investigación

Tabla 8. Información de perfil Avenida Circunvalar- Muestra 6

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0-3.225	287.4371859
3.225-5.475	305.0251256
5.475-10.275	357.7889447
10.275-21.225	447.4874372
21.225-30	545.9798995

### ***ReMi Parque Central Simón Bolívar***

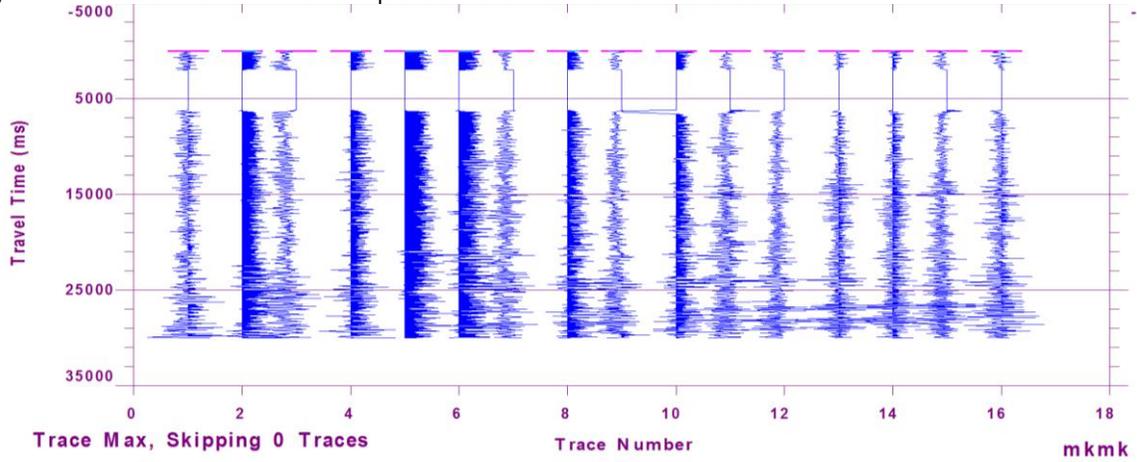
Figura 79. Lugar de estudio. Parque Central Simón Bolívar.



Fuente: La investigación

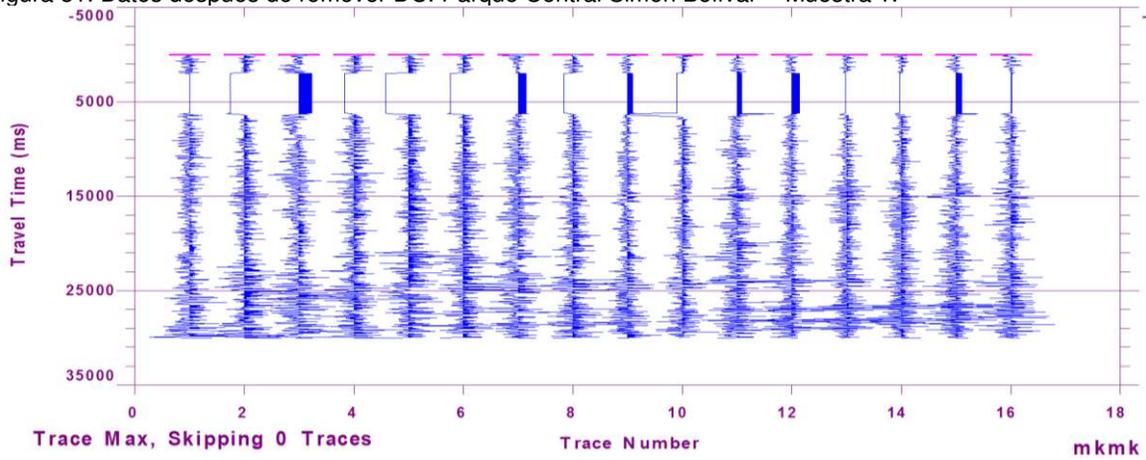
# Muestra 1

Figura 80. Datos sin remover DC. Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.



Fuente: La investigación

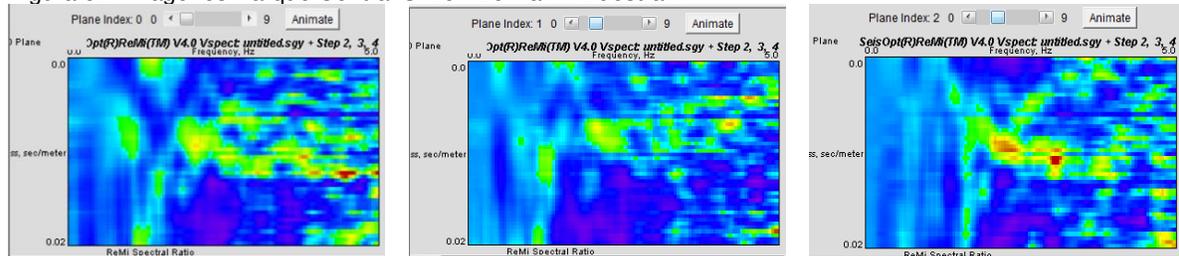
Figura 81. Datos después de remover DC. Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.

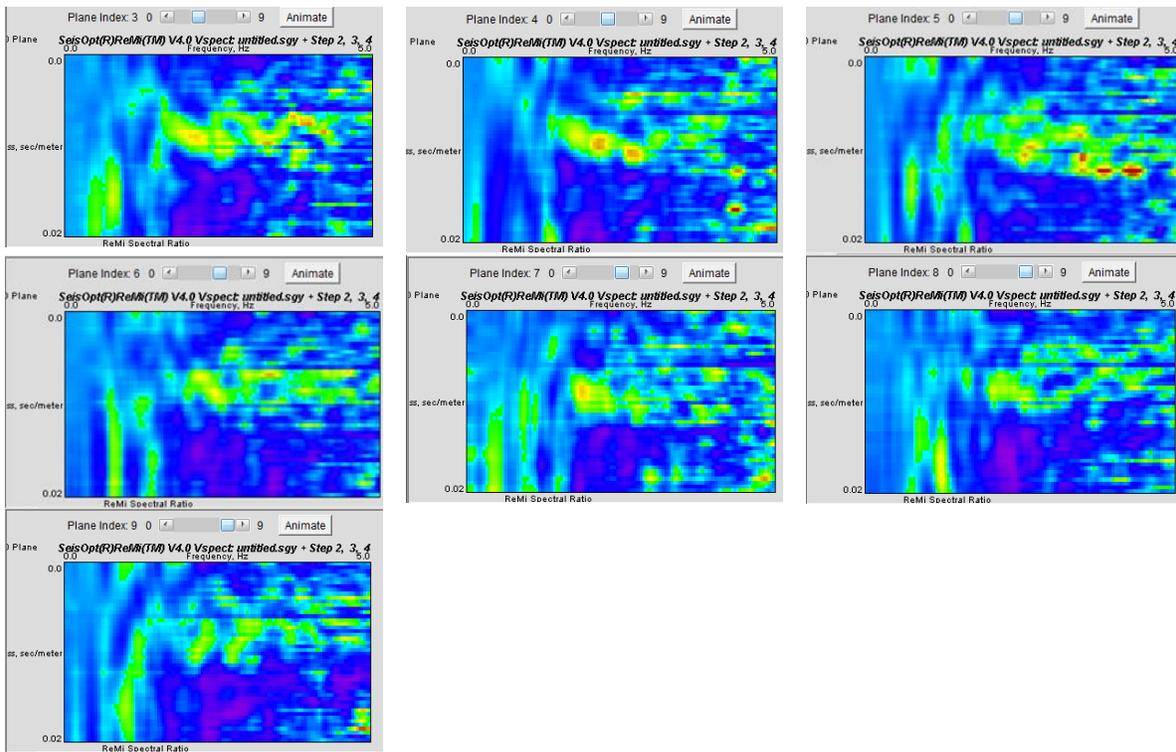


Fuente: La investigación

El tendido se realiza de 120 metros con distancias de 8 metros entre geofonos.

Figura 82. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.

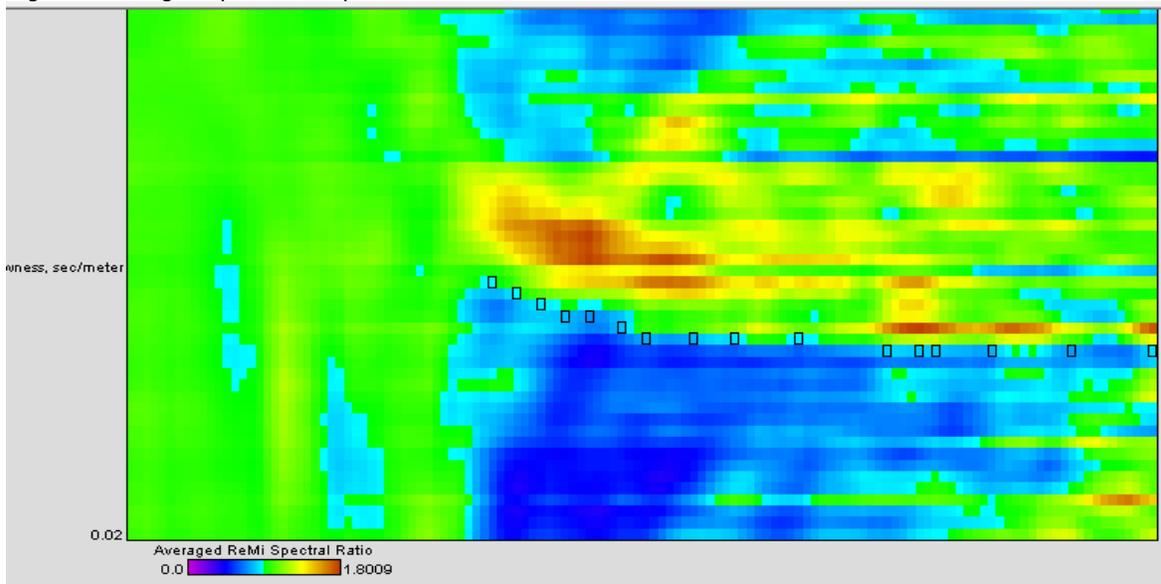




Fuente: La investigación

Se escogen las imágenes: 0-2-3-4-5-6-7 (Figura 82).

Figura 83. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.



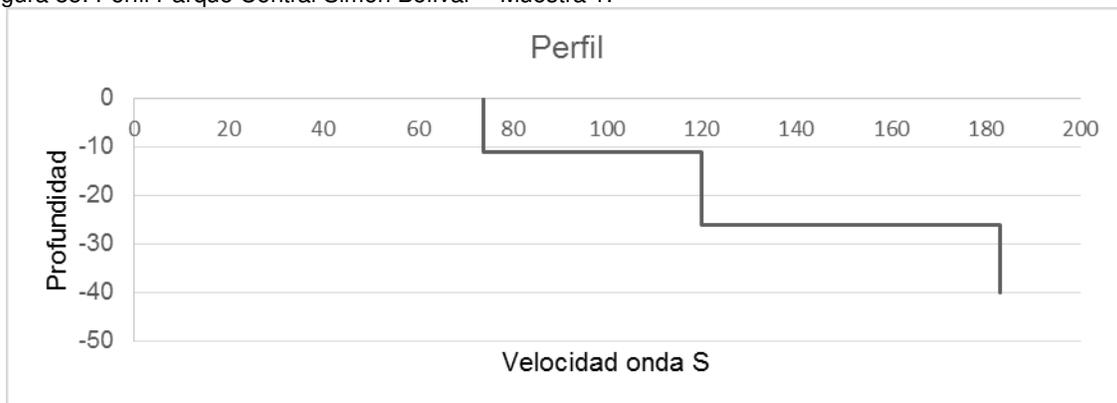
Fuente: La investigación

Figura 84. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.



Fuente: La investigación

Figura 85. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1.



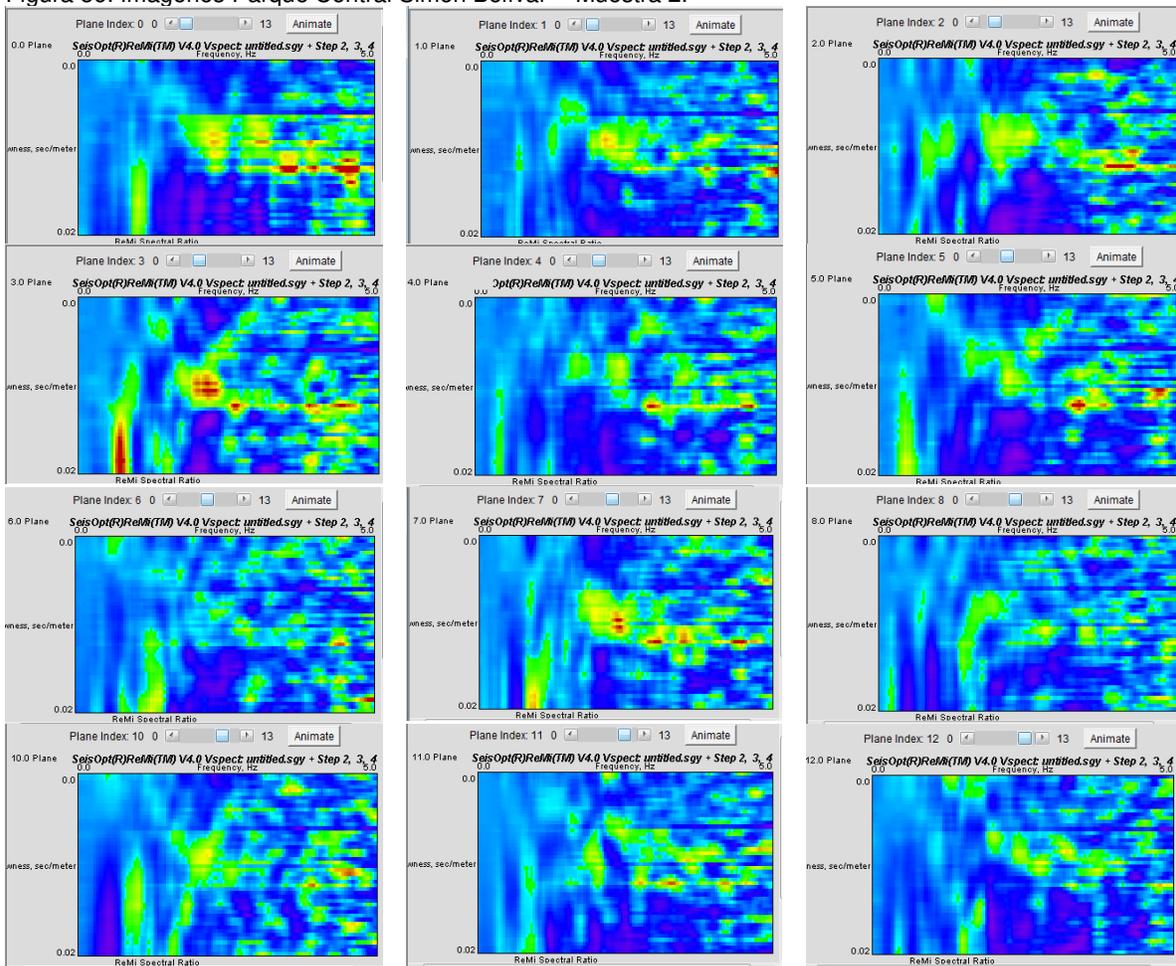
Fuente: La investigación

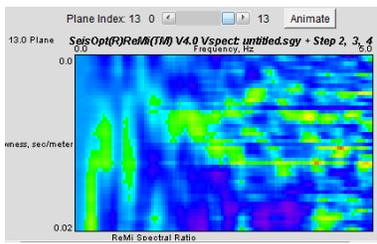
Tabla 9. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 1

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 - 11.1	73.952
11.1 - 26.1	120.100
26.1 - 40	183.094

## Muestra 2

Figura 86. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.

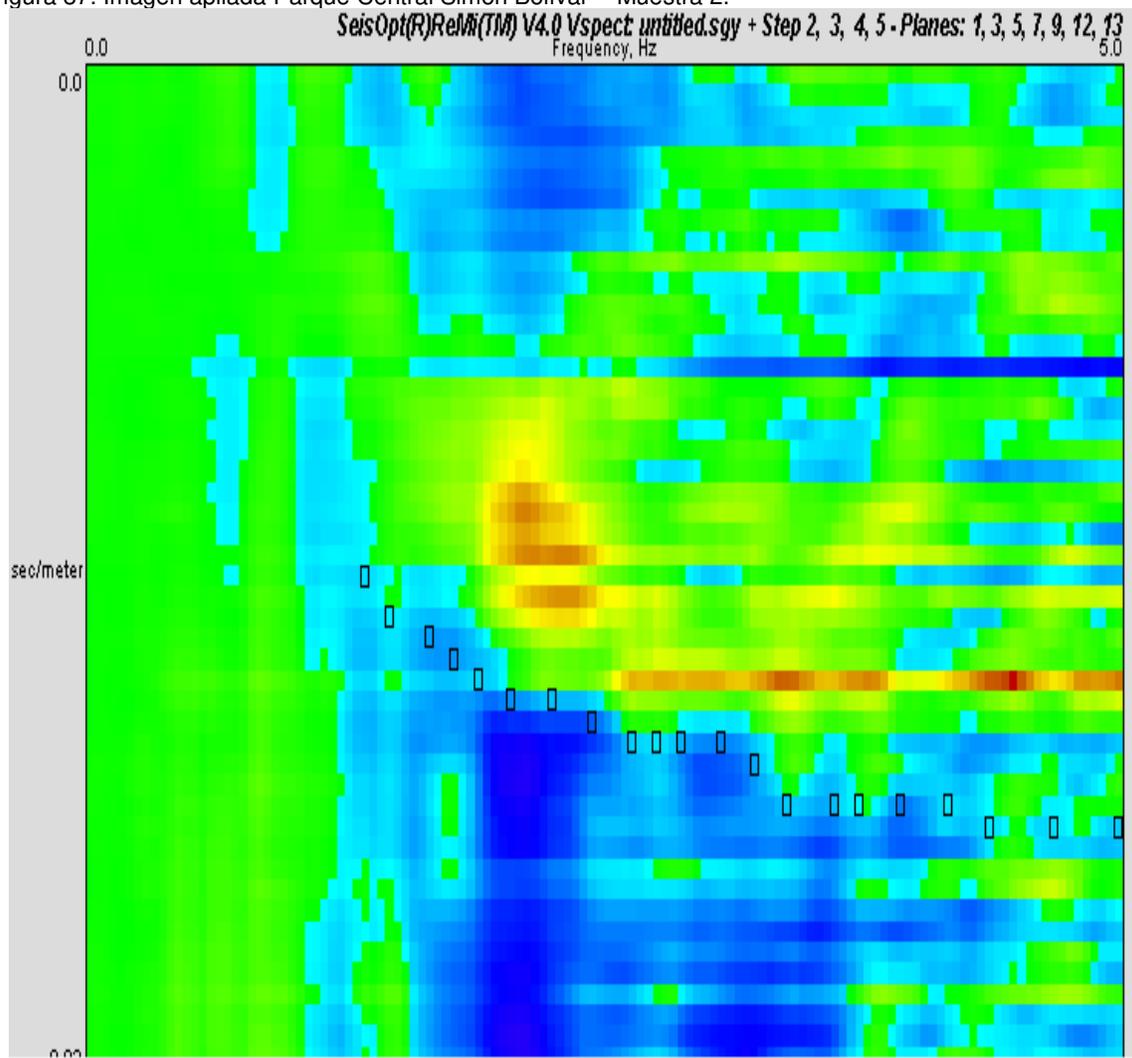




Fuente: La investigación

Se escogen las imágenes: 1-3-5-7-9-12-13 (Figura 87).

Figura 87. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.



Fuente: La investigación

Figura 88. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.



Fuente: La investigación

Figura 89. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2.

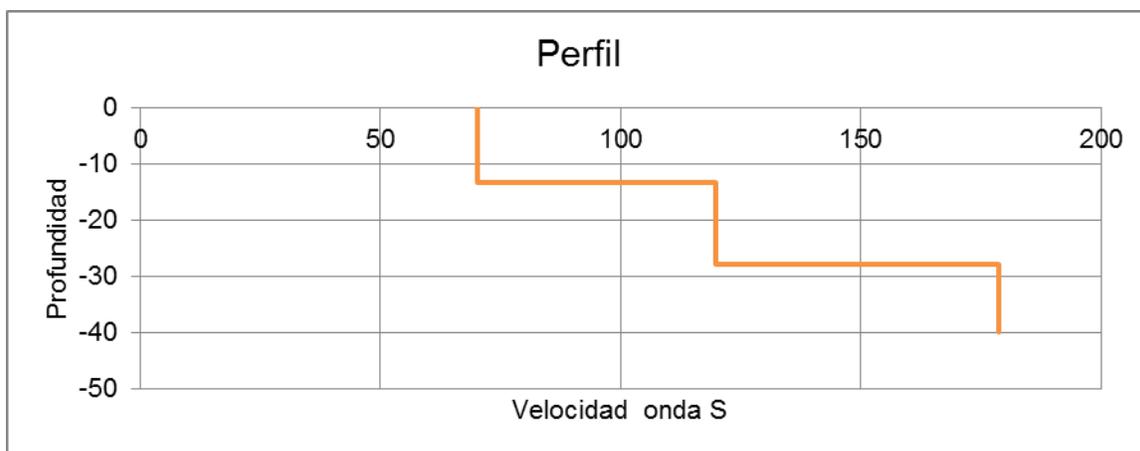


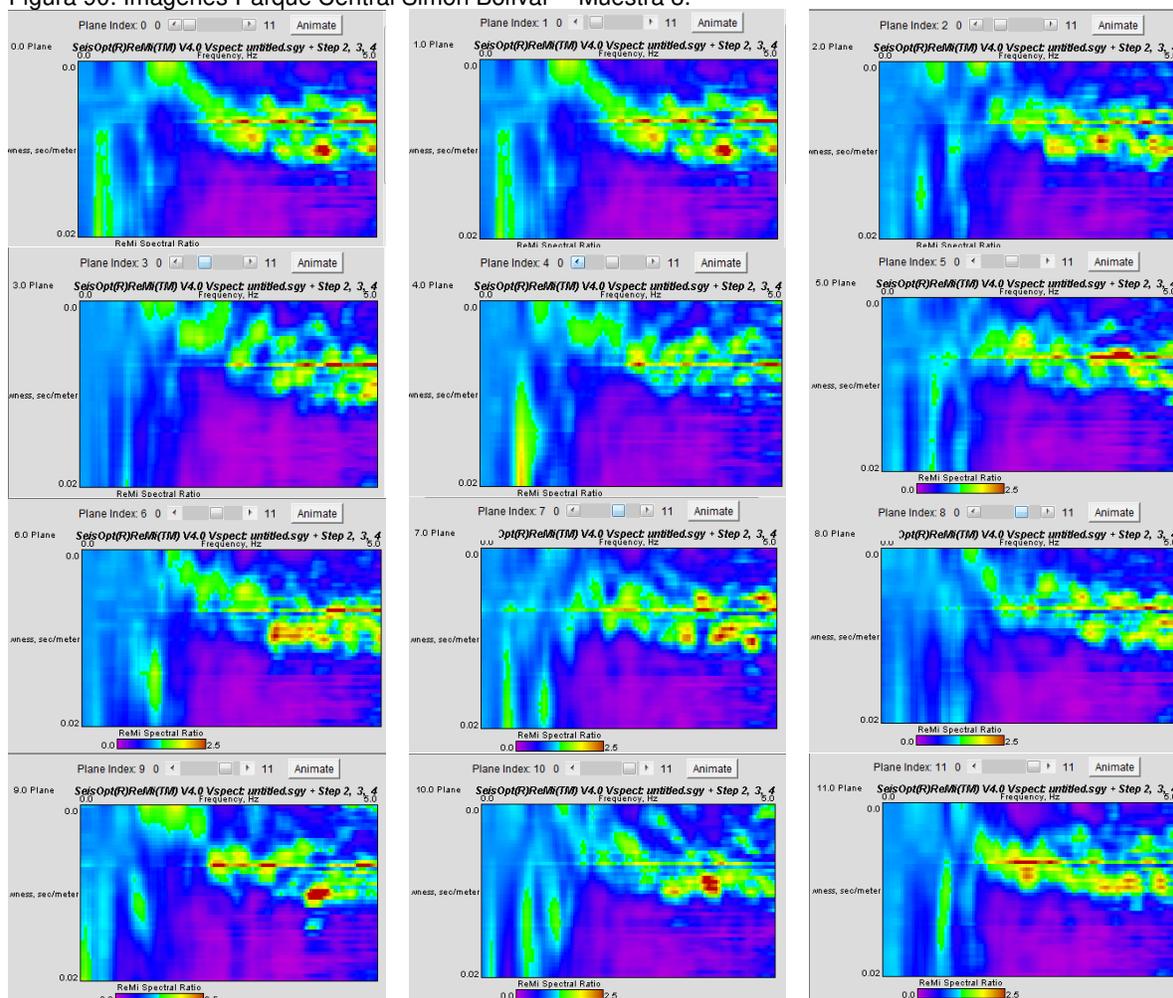
Tabla 10. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 2

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 - 13.4	70.15075
13.4 - 27.8	119.7989
27.8-40	178.722

### Muestra 3

Debido a la geometría del lugar de toma, el tendido se realiza de 112 metros con distancias de 7 metros entre geofonos.

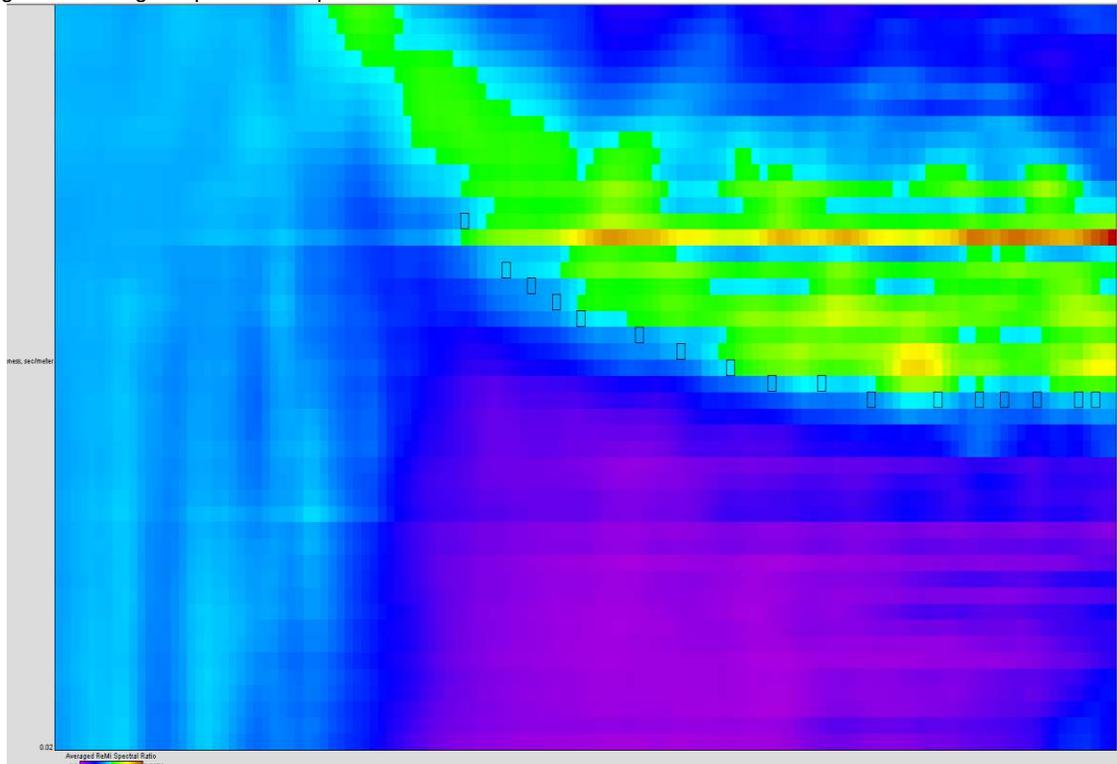
Figura 90. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.



Fuente: La investigación

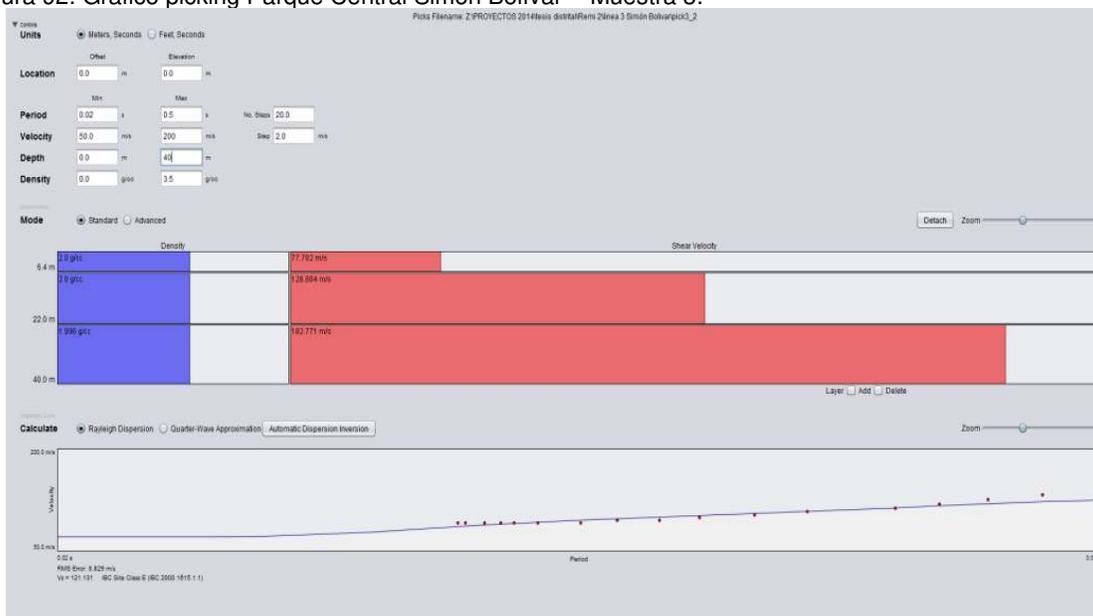
Se escogen la imágenes 0-1-3-4-6-8-10-11 (Figura 91).

Figura 91. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.



Fuente: La investigación

Figura 92. Grafico picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.



Fuente: La investigación

Figura 93. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.



Fuente: La investigación

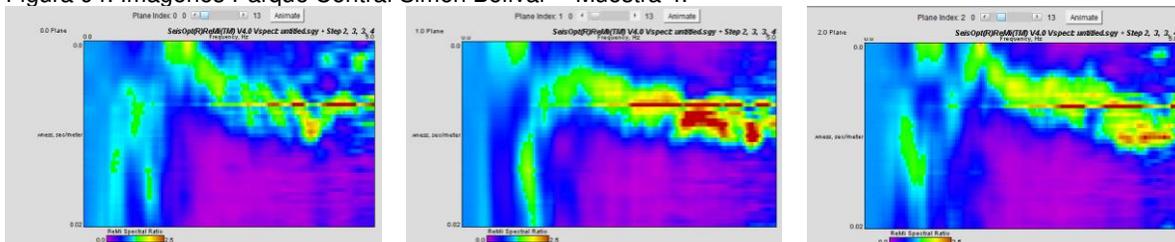
Tabla 11. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3

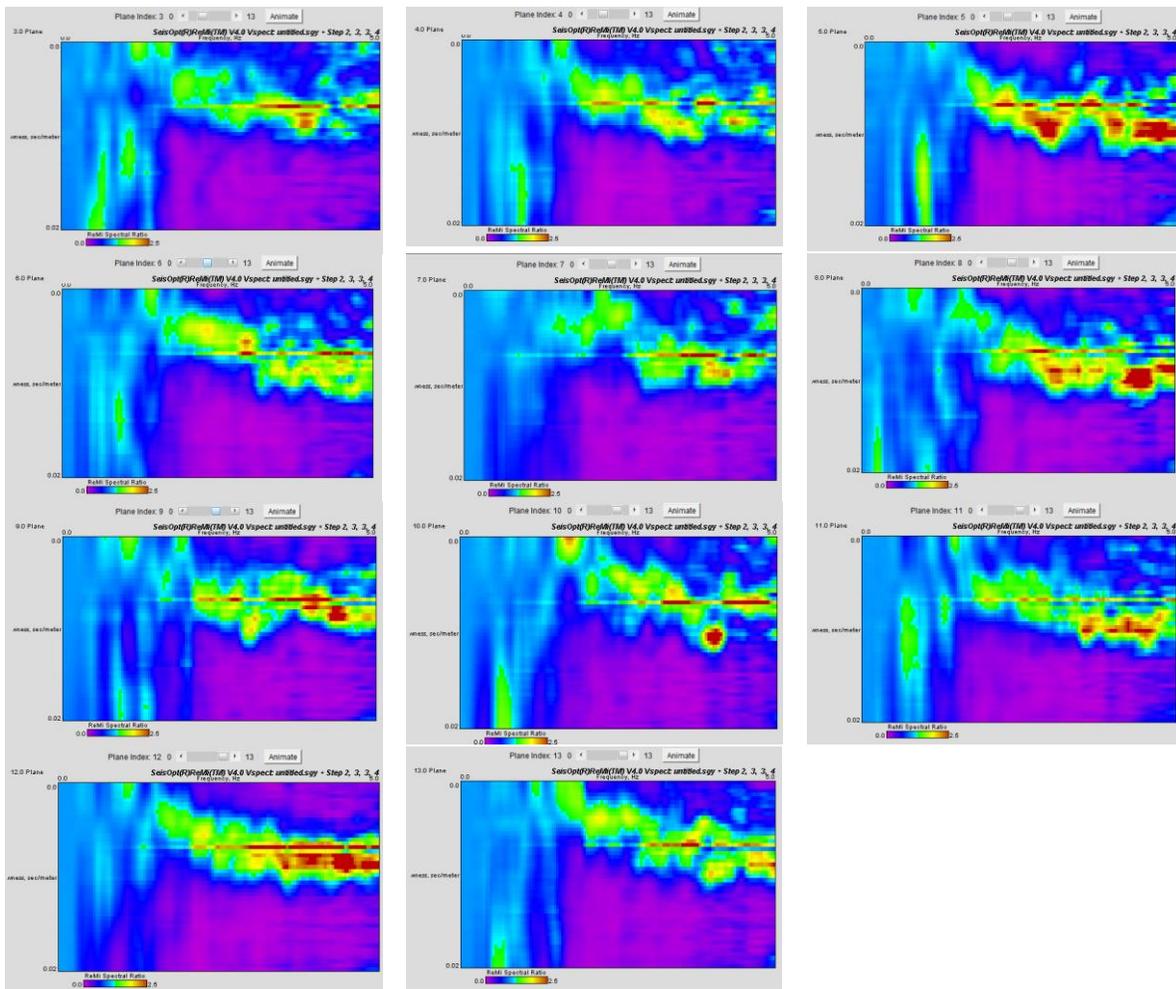
Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 - 6.4	77.781
6.4 - 22	126.884
22 - 40	182.77

#### Muestra 4

Debido a la geometría del lugar de toma, el tendido se realiza de 112 metros con distancias de 7 metros entre geofonos.

Figura 94. Imágenes Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4.

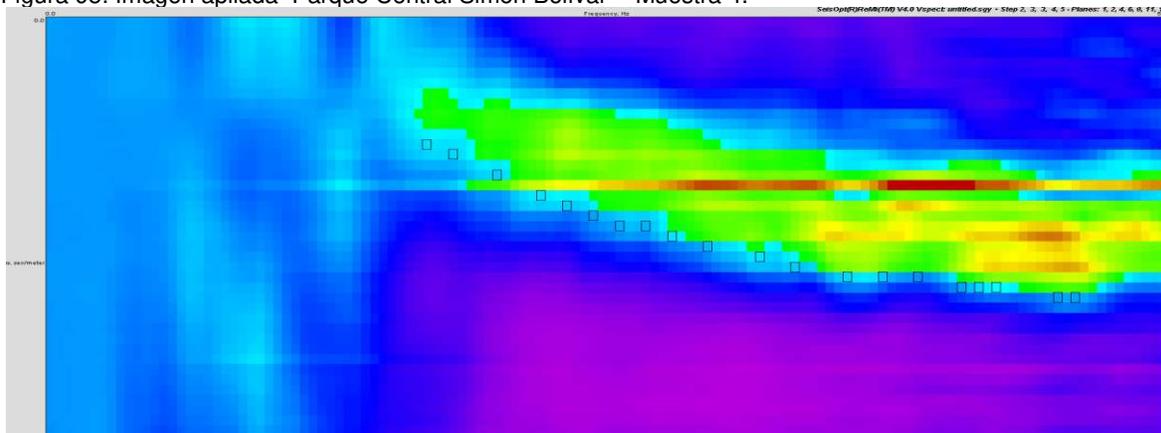




Fuente: La investigación

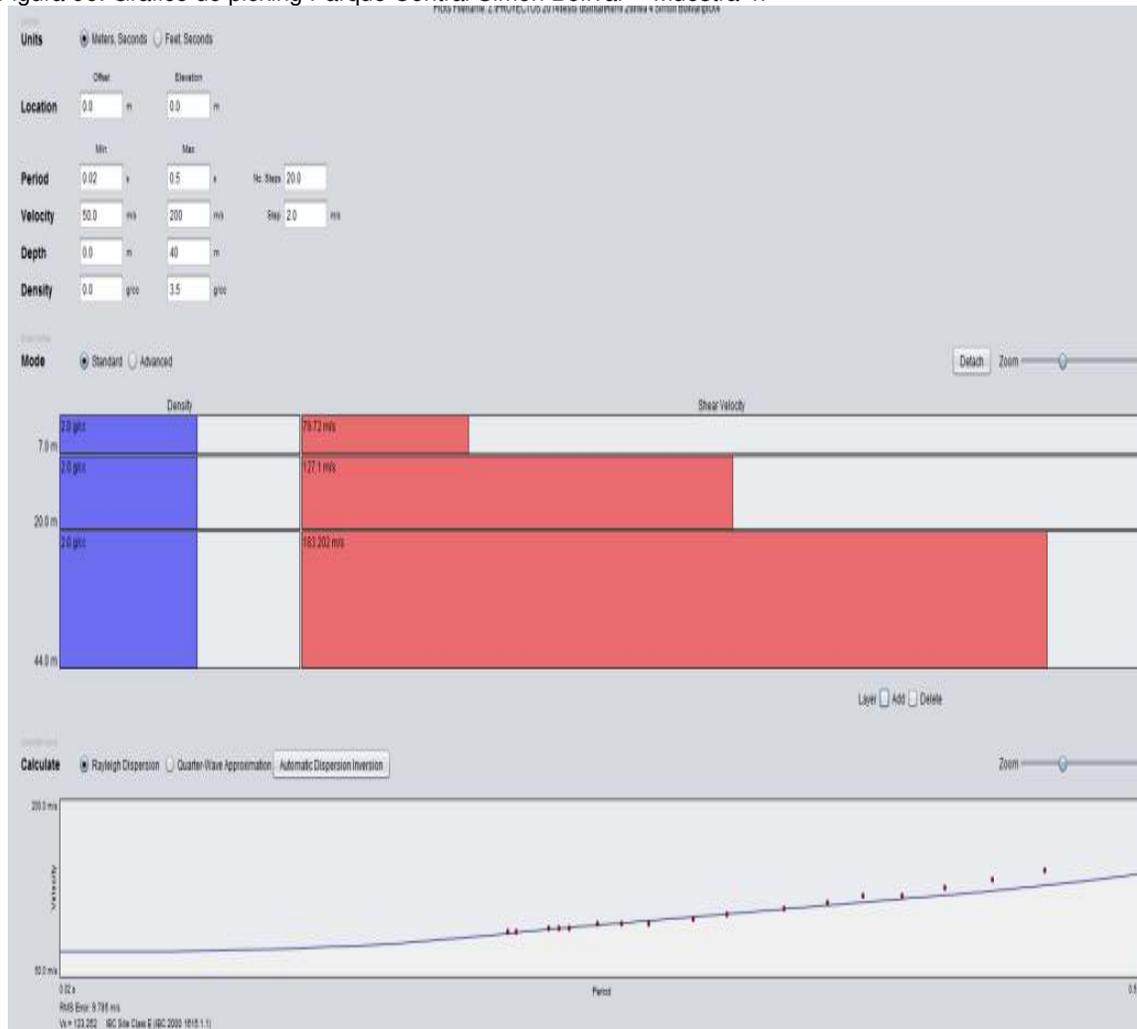
Se escogen las imágenes: 1-2-4-6-8-11-12 (Figura 93).

Figura 95. Imagen apilada Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4.



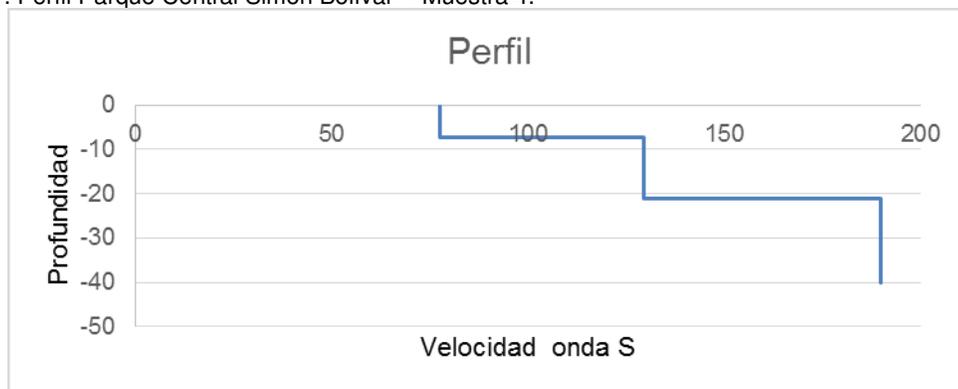
Fuente: La investigación

Figura 96. Gráfico de picking Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4.



Fuente: La investigación

Figura 97. Perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 4.



Fuente: La investigación

Tabla 12. Información de perfil Parque Central Simón Bolívar - Muestra 3.

Profundidad (m)	Velocidad onda S (m/s)
0 - 7.4	77.4587222
7.4 - 21	129.361091
21 - 40	189.77028