



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales.

Evaluation of the resolution of the method of analysis of surface wave dispersion MASW (multichannel analysis of surface waves) in residual soils.

Andrés Felipe Serna Vásquez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2015

Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales.

Evaluation of the resolution of the method of analysis of surface wave dispersion MASW (multichannel analysis of surface waves) in residual soils.

Andrés Felipe Serna Vásquez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería–Geotecnia

Director:

PhD., Gaspar Monsalve Mejía

Codirector

PhD., David Guillermo Zapata Medina

Línea de Investigación:

Geofísica

Grupo de Investigación:

Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2015

Dedicatoria

A mi madre por el apoyo incondicional que me brinda en todo momento y a mi padre -q.e.p.d.- que es mi motivación para seguir con mi crecimiento personal y profesional.

Agradecimientos

Al director de esta tesis Gaspar Monsalve Mejía, PhD.; por su voto de confianza desde mi ingreso al programa de la maestría, por todo su apoyo y por el acompañamiento incondicional durante la ejecución de la presente tesis.

Al codirector de esta tesis David Guillermo Zapata Medina, PhD., por los aportes realizados a la tesis, los conocimientos brindados durante el transcurso del programa de la maestría y por el acompañamiento incondicional durante la ejecución del presente documento.

A la empresa Vieco Ingeniería Ltda, por todo el aporte en el suministro de información para desarrollar la investigación.

A la empresa Soil Explorer S.A.S., por todo el aporte en el suministro de información y equipos para desarrollar la investigación.

A mi madre, Gloria Isabel Vásquez, por todo su apoyo y motivación que me brindo durante este proceso de formación.

Resumen

Tomando como punto de partida los procedimientos técnicos presentados en la literatura para la ejecución de los ensayos geofísicos tipo *MASW* (análisis multicanal de ondas superficiales), los cuales fueron desarrollados para obtener un alto grado de asertividad en la determinación de la velocidad de onda cortante y el espesor de cada geomaterial que conforma el perfil estratigráfico en ambientes litológicos sedimentarios, se propone realizar una evaluación de dichas metodologías en tres sitios de estudio de características geológico-geotécnicas del tipo residual, con horizontes de meteorización de gran espesor; para lo cual en cada uno de los sitios propuestos para el estudio se realizan doce (12) combinaciones de armados lineales, las cuales corresponden a una variación del espaciamiento entre los receptores y la localización de la fuente de energía; conservando como constantes las condiciones ambientales cada sitio de estudio, el medio generador de energía y número de receptores. Finalmente se procede a realizar una evaluación de los resultados obtenidos con respecto a sondeos de exploración directa para recuperación de muestras, análisis geológicos puntuales y el desarrollo de procedimientos de medida directa de la velocidad de onda cortante, entre los cuales se encuentran las metodologías *Down Hole* y *dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT)*.

Palabras clave: *MASW*, resolución, análisis de ondas multicanal, velocidad de onda cortante, suelo residual, geología, Espesor de capas.

Abstract

This work evaluates the applicability of the technical procedures reported in the literature to carry out geophysical tests type MASW (multichannel analysis of surface waves) on residual type deposits. The MASW method was developed to determine shear wave velocities and thicknesses of stratified sedimentary soil deposits. This research performed field work on three (3) different sites presenting subsoil profiles of thick weathering characteristics in residual soil deposits. At each of the proposed sites, twelve (12) different linear array combinations for the MASW testing were completed maintaining constant environmental conditions to evaluate the variation in spacing between the receivers and source, the average source power generation and number of receivers. The obtained results were validated by comparing to shear wave velocity profiles obtained from invasive and well established methodologies like the seismic downhole and the Marchetti dynamic dilatometer (SDMT).

Keywords: MASW, resolution, multi-channel analysis of surface waves, shear wave velocity, residual soil, geology, thickness of layers.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Astract	XV
Lista de figuras	XV
Lista de fotografías	XVIII
Lista de Tablas	XVIII
Lista de símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
1. Motivación, hipótesis y objetivos	5
1.1 Justificación.....	5
1.2 Hipótesis	8
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
2. Antecedentes y fundamento teórico	12
2.1 Antecedentes	12
2.2 Fundamento Teórico	14
3. Metodología	25
3.1 Determinación de los sitios de estudio	25
3.2 Exploración y ensayos de Validación	26
3.3 Ensayos experimentales tipo MASW	27
4. Descripción y caracterización de los sitios de estudio	35
4.1 Sitio de estudio I - sector Calasanz	39
4.1.1 Geología local.....	40
4.1.2 Exploración directa	41
4.1.3 Determinación directa de la velocidad de onda cortante	44
4.2 Sitio de estudio II: Alto de las palmas	48
4.2.1 Geología local.....	49
4.2.2 Exploración directa	51
4.2.3 Determinación directa de la velocidad de onda cortante	53

XIV Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales.

4.3	Sitio de estudio III La Macarena-Rionegro	57
4.3.1	Geología local	58
4.3.2	Exploración directa	59
4.3.3	Determinación directa de la velocidad de onda cortante.....	62
5.	Resultados, análisis y discusión	67
6.	Conclusiones	85
	Referencias	99

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Armado esquemático del equipo en campo, Fuente Dal Moro (2014).....	16
Figura 2. Registro tren de ondas. Fuente: elaboración propia del autor; Software: winMASW.....	18
Figura 3. Curva de dispersión esquemática (modo fundamental) Fuente: elaboración propia del autor; Software: winMASW	21
Figura 4. Perfil de velocidad de onda cortante esquemático Fuente: Ilustración propia del autor; Software: winMASW.....	22
Figura 5. Modo fundamental y modo superior, Fuente: Dal Moro (2014)	23
Figura 6. Esquema de la configuración de los ensayos en campo, adoptando diferentes separaciones entre los receptores.....	29
Figura 7. Placa y almádena usadas durante la ejecución de los ensayos.....	31
Figura 8. Esquema general de la prueba de dilatómetro. Tomada de Marchetti et al. (2013).....	38
Figura 9. Ubicación del sitio de estudio I. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.....	39
Figura 10. Registro de perforación y recuperación de muestras.....	43
Figura 11. Resultado ensayo Down Hole - sitio de estudio I.....	46
Figura 12. Ubicación del sitio de estudio II. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.....	48
Figura 13. Registro de perforación y recuperación de muestras.....	52
Figura 14. Resultado ensayo Down Hole - sitio de estudio II.....	55
Figura 15. Ubicación del sitio de estudio III. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.....	57
Figura 16. Registro de perforación y recuperación de muestras.....	61
Figura 17. Resultado ensayo dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT), sitio de estudio III.....	64
Figura 18. Curva de dispersión ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio I- sector Calasanz, para los 8 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).	69
Figura 19. Curva de dispersión ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio II - Alto de Las Palmas, para los 10 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).	70

Figura 20. Curva de dispersión ensayo MASW y SDMT, sitio de estudio I II – La Macarena Rionegro, para los 9 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).	70
Figura 21. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio I- Sector Calasanz; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente.....	75
Figura 22. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio II- Alto de Las Palmas; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente.....	75
Figura 23. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente.....	76
Figura 24. Perfil de Vs con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio I- Sector Calasanz; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.....	78
Figura 25. Perfil de Vs con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio II- Alto de Las Palmas; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.....	79
Figura 26. Perfil de Vs con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.....	79
Figura 27. Perfil de Vs con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y Down Hole sitio de estudio I- Sector Calasanz; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.....	80
Figura 28. Perfil de Vs con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y Down Hole sitio de estudio II- Alto de las Palmas; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.....	81
Figura 29. Perfil de Vs con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.....	82

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 1. Sitio de análisis I.	40
Fotografía 2. Registro fotográfico de la perforación ejecutada en el sitio de estudio I.....	42
Fotografía 3. Ensayo Down Hole realizado en el sitio de estudio I.....	44
Fotografía 4. Sitio de análisis II.	49
Fotografía 5. Localización aproximada de la perforación ejecutada en el sitio de estudio II	51
Fotografía 6. Ensayo Down Hole realizado en el sitio de estudio II.....	53
Fotografía 7. Sitio de estudio III.....	58
Fotografía 8. Localización aproximada de la perforación ejecutada en el sitio de estudio III	60
Fotografía 9. Ensayo dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT), sitio de estudio III	62

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Adquisición MASW, Fuente: elaboración propia del autor	16
Tabla 2. Unidad geológica de cada sitio de estudio	26
Tabla 3. Parámetros de registro.....	28
Tabla 4. Geometría y distribución de receptores.....	29
Tabla 5. Parámetros geométricos de adquisición.....	31
Tabla 6. Características de los sitios de análisis	35
Tabla 7. Resumen variación de la velocidad de onda cortante.....	45
Tabla 8. Resumen del modelo de velocidades de onda cortante para el sitio de estudio I	47
Tabla 9. Resumen variación de la velocidad de onda cortante.....	54
Tabla 10. Resumen de la velocidad media de onda cortante para cada estrato.....	56
Tabla 11. Resumen variación de la velocidad de onda cortante.....	63
Tabla 12. Resumen del modelo de velocidad media de onda cortante.....	64
Tabla 13. Calculo de la profundidad de exploración del ensayo MASW.....	68
Tabla 14. Resultados ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio I - Sector Calasanz	72
Tabla 15. Resultados ensayo MASW y Down Hole sitio de estudio II - Alto de Las Palmas	72
Tabla 16. Resultados ensayo MASW y SDMT sitio de estudio III – La Macarena Rionegro	72
Tabla 17. Porcentaje de error, calculado a partir de la diferencia entre los resultados de MASW y Down Hole, sitio de estudio I - Sector Calasanz	73
Tabla 18. Porcentaje de error, calculado a partir de la diferencia entre los resultados de MASW y Down Hole, sitio de estudio II - Alto de Las Palmas.....	74
Tabla 19. Porcentaje de error, calculado a partir de la diferencia entre los resultados de MASW y SDMT, sitio de estudio III – La Macarena Rionegro.....	74
Tabla 20. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio I - Sector Calasanz	77
Tabla 21. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio II - Alto de Las Palmas	77
Tabla 22. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio III – La Macarena Rionegro	77

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A()	Espectro de amplitud	---
Cf	Velocidad de fase	m/s
d	diferencial	---
f	Frecuencia	Hz
K	Número de onda	---
L	Onda Love	---
m	Mili	---
msnm	Metros sobre el nivel del mar	m
N	Número de golpes por pie del ensayo de penetración estándar	---
P	Onda compresional	---
P()	Espectro de fase	---
R	Onda Rayleigh	---
S	Onda cortante o cizalladura	---
t	Tiempo	S
u	Función	---
V()	Espectro de posición	---
VL	Velocidad de onda Love	m/s
VP	Velocidad de onda compresional	m/s
VR	Velocidad de onda Rayleigh	m/s
Vs	Velocidad de onda cortante	m/s
w	Frecuencia	Hz
x	Espacio	m
Z	Profundidad	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
λ	Longitud de onda	m
μs	micro	---
ω	Frecuencia angular	Hz
e	número de Euler o constante de Napier	---
ϕ	espectro de fase	---
ν	coeficiente de Poisson	---

Subíndices

Subíndice	Término
30	Treinta metros superficiales
máx	Máximo
p	Onda compresional
Prom	Promedio
s	Onda cortante o cizalladura

Superíndices

Superíndice	Término
°	Grado
‘	Minuto
“	Segundo

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ASTM	Sociedad Americana de Prueba de Materiales por sus siglas en ingles
CPT	Penetración del cono dinámico por sus siglas en ingles
Ksta	Batolito Antioqueño
MASW	Análisis multicanal de ondas superficiales
NSR-10	Norma sismo resistente 2010
PRmPP	Migmatitas de puente Peláez
PVC	Policloruro de vinilo
Pzni	Neis de la Iguaná
SASW	Análisis Espectral de Ondas Superficiales por sus siglas en ingles
SCPT	prueba de penetración con cono sísmico por sus siglas en ingles
SDMT	Ensayo dilatómetro dinámico de Marchetti por sus siglas en ingles
SPT	Ensayo de penetración estándar por sus siglas en ingles
UHMW	Ultra Alto Peso Molecular por sus siglas en ingles

Introducción

Con el transcurrir de los años y los avances técnicos y tecnológicos que se han alcanzado en el ámbito geotécnico, se ha observado que la tendencia al desarrollo del análisis de la mecánica de suelos básica o tradicional basada en análisis estáticos debe ser complementada con análisis dinámicos, buscando la optimización en la determinación de la respuesta sísmica local para cada zona de análisis.

Con el objetivo de obtener una caracterización dinámica localizada de un área específica se cuenta con diversas metodologías provenientes de la investigación mediante exploración directa (alteración del terreno, dependiente del tipo de muestreo y procedimiento empleado), como por ejemplo, ensayos de laboratorio del tipo triaxial cíclico, columna resonante y *bender element*; y ensayos en campo, tales como *Down Hole*, *Cross Hole*, prueba de penetración con cono sísmico *SCPT*, Penetración del cono dinámico *CPT* y dilatómetro sísmico *SDMT*.

Dichas metodologías cuentan con algunas desventajas: como ejemplo pueden ser mencionadas, para el caso de los ensayos de laboratorio, la alteración de la muestra durante el proceso de extracción y su preparación para la ejecución del respectivo ensayo; adicionalmente, la representatividad del comportamiento dinámico del estrato se ve limitado a un elemento diferencial que puede representar con mayor o menor objetividad dichas propiedades, según el grado de heterogeneidad de la masa de suelo de la cual se extrajo la muestra. En cuanto a los ensayos de campo, como la prueba de penetración con cono sísmico *SCPT*, la penetración del cono dinámico *CPT* y el dilatómetro sísmico *SDMT*, generalmente se ven limitados al material que conforma el subsuelo, ya que específicamente su aplicabilidad se encuentra asociada a suelos finogranulares o poco densos. Ensayos como el *Down Hole* y *Cross Hole* requieren de una instalación rigurosa y adecuada de una tubería que permita garantizar un contacto

íntegro y homogéneo con el suelo, además de los costos y tiempos de ejecución derivados de la perforación.

El desarrollo del componente aplicativo de métodos geofísicos de tipo sísmico, algunos de los cuales basan su estudio en el comportamiento, trayectoria y velocidad de onda de corte cerca de la superficie, ha permitido la prospección indirecta de la distribución estratigráfica y la determinación de las propiedades dinámicas de los suelos mediante diferentes métodos con fuentes de energía activa propuestos durante los últimos 50 años. Como ejemplo puede mencionarse la metodología *SASW*, denominado Análisis Espectral de Ondas Superficiales, propuesta en la década de 1980, Nazarian, Stokoe II, y Hudson (1983). Posteriormente, en 1998, se propone la metodología *MASW*, denominada como Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, obedeciendo a la necesidad de obtener una adquisición de datos mucho más amplia, ágil y con menor inversión de tiempo para la ejecución de los ensayos, Park, Miller, y Xia (1998a).

Durante el proceso de adquisición de datos en campo, se obtiene un registro compuesto por una serie de datos de distancia y tiempo, los cuales mediante la aplicación de la transformada de Fourier aplicado al dominio del tiempo, permite pasar de éste al dominio de la frecuencia; proceso que finalmente permite obtener un conjunto de velocidades de fase asociadas a una serie de frecuencias de onda Rayleigh. Finalmente dicho proceso nos permite definir una curva de dispersión (velocidad de fase versus. frecuencia) para las ondas Rayleigh, a partir de la cual, por medio de un proceso de inversión, se estiman posibles perfiles de velocidad de onda de cortante.

Diferentes autores como Xia et al. (2007), Jianghai Xia et al. (1999), Nazarian et al. (1983), Nazarian et al. (1983), Luo et al. (2008), han concluido que la resolución de la curva de dispersión depende en su totalidad del algoritmo de procesamiento de datos sísmicos y de la adquisición de los registros en campo en cuanto a parámetros como la fuente de energía, armado o geometría del conjunto de receptores, ruido ambiental y separación de la fuente de energía con respecto al armado. Es de aclarar que de acuerdo con el grado de resolución y condicionado por la determinación apropiada de la curva de dispersión, se alcanza con objetividad la definición de los espesores y velocidades de onda cortante que componen un perfil de suelo, y finalmente su respuesta ante efectos dinámicos.

De acuerdo con las ideas propuestas anteriormente, esta investigación se centra en encontrar una metodología práctica para determinar de forma objetiva y apropiada la adquisición de registros experimentales de armados en campo de distribución lineal, con diferentes separaciones de receptores y de la fuente de energía, manteniendo como constante el tipo de fuente, que consiste en un impacto de martillo de 18 Lb. El procedimiento de inversión de la curva de dispersión para obtener los perfiles de velocidad de la onda de cortante, está basado en los denominados algoritmos genéticos, que permiten obtener resultados más ajustados en comparación con los métodos de inversión tradicionales como los basados en la matriz Jacobiana, J Xia et al. (2007).

Los métodos de prospección geofísica basan sus análisis, aplicabilidad y grado de incertidumbre en la variabilidad de los espesores de suelo, y en la posibilidad de registrar durante la adquisición la presencia en profundidad de la roca fresca o de un material rígido Dal Moro, Pipan, Forte, y Finetti (2003). En suelos residuales de horizontes de meteorización de espesor variable, en los cuales en casos particulares alcanzan a ser superiores a 30 m, no se obtiene información del basamento rocoso durante la adquisición del registro en campo; asociado a esta condición, la determinación de la velocidad de onda cortante V_s y el espesor de las capas, se vuelve compleja y de alta incertidumbre, por lo cual se propone realizar como desarrollo de la presente investigación una campaña experimental en la cual se pueda observar de forma directa el armado que mejor se ajuste a cada sitio de estudio.

Se busca lograr una aplicación coherente para la obtención de resultados confiables en el campo de los estudios geofísicos en ambientes geológico-geotécnicos heterogéneos, característicos de zonas tropicales de montaña. Gran parte de los procedimientos estándares para la determinación de los espesores y las velocidades de onda de corte de las diferentes capas que componen el subsuelo, se establecen de acuerdo a metodologías generales que presentan los distribuidores de equipos y los diferentes programas de procesamiento de registros con los que se cuenta en el mercado, sin apropiarse de la aplicación a nuestros ambientes geológico-geotécnicos heterogéneos. Esto hace que en la práctica, en la mayoría de los casos, resulta más útil trabajar con rangos de valores aproximados, ya que no se cuenta con metodologías de validación para la determinación de la velocidad de onda cortante directa; por tanto resultaría útil

verificar qué tan confiable pueden ser los resultados obtenidos mediante metodologías de exploración indirecta, mediante comparación con la determinación directa de la velocidad de onda cortante con ensayos como son el dilatómetro sísmico y el *Down Hole*.

De lograrse resultados satisfactorios, se pretende recomendar una metodología experimental basada en la separación de la fuente y los receptores, que permita alcanzar la mejor confiabilidad posible o similar a la alcanzada en la presente tesis, en la ejecución de ensayos de análisis de ondas superficiales multicanal *MASW* en ambientes geológico-geotécnicos compuestos por suelos residuales, de características similares a los presentados en el presente documento.

1. Motivación, hipótesis y objetivos

1.1 Justificación

Debido a las características elásticas y a la anisotropía del suelo, en la práctica de la ingeniería geotécnica se hace estrictamente necesario realizar una caracterización apropiada de los geomateriales cercanos a la superficie, lo cual, desde el aspecto de la rigidez, puede ser posible mediante el uso de técnicas para la determinación de la velocidad de propagación de onda cortante V_s Stokoe, Wright, Bay, y Roesset (1994).

De acuerdo con la normatividad colombiana sismo resistente NSR-10 en su apartado A.2.4.5.3, se hace referencia a la prevalencia de los métodos geofísicos para la determinación directa de la velocidad de ondas de cizalladura, sobre cualquier método de correlación de la velocidad de onda cortante para la clasificación del tipo de suelo.

Aparte de la geofísica, la metodología más usada para la determinación del perfil de suelo, es la correlación con el número de golpes determinado mediante el ensayo de penetración estándar (*SPT* por sus siglas en inglés), que permite determinar una magnitud de la resistencia del suelo, práctica regida bajo la norma ASTM (2008), procedimiento que presenta la restricción de ser utilizado preferiblemente en arenas y suelos finos; sin embargo, se ha observado que su utilidad en rocas en proceso de meteorización que conforman los perfiles A, B y C, y en casos puntuales D, es limitada.

El ensayo de penetración estándar se puede utilizar para indicar de forma “cruda” la resistencia relativa del material, por lo cual la determinación de la velocidad de onda cortante debe ser establecida mediante ensayos geofísicos. De esto se deriva la importancia del método.

La exploración geofísica ha cobrado un papel predominante en la solución de diversos problemas asociados a determinar las condiciones físicas y mecánicas de la estructura del subsuelo; para esto se basa en diferentes técnicas, dentro de las cuales encontramos el método sísmico, el cual fundamenta sus análisis en las propiedades de densidad y elasticidad de los materiales del terreno.

Enmarcado en los métodos sísmicos, encontramos el ensayo de análisis multicanal de ondas superficiales “MASW”, el cual es un método de exploración indirecta, que permite la determinación de la velocidad de onda cortante V_s . En el campo de la Ingeniería Civil, ha tenido un gran auge y desarrollo en las últimas décadas debido a las innumerables aplicaciones que tiene en el área de la geotecnia Mohamed, Abu El Ata, Abdel Azim, y Taha (2013). Además de la integración en la normatividad de diseño y construcción nacional (NSR-10) que ha tenido dicho parámetro de clasificación V_{s30} , el cual es utilizado para determinar el perfil del suelo subdividido en los tipos A a E, correspondientes a una columna geoestática conformada por los 30 metros superficiales, dicha metodología es ampliamente utilizada en códigos de diseño y construcción internacionales, los cuales igualmente fundamentan la clasificación del perfil del suelo en la determinación del parámetro en mención.

Por lo mencionado anteriormente, durante el desarrollo de la tesis se realizará una revisión continua del estado del arte en el tema de investigación, enfocado en los fundamentos teóricos y prácticos del ensayo de dispersión de ondas, así como en algunas aplicaciones que presenta el ensayo para la obtención de los diferentes parámetros de clasificación del subsuelo.

Una vez revisada la base teórica referente al tema de investigación y mediante los ensayos preliminares realizados como avance del proceso de investigación, se observó que la metodología propuesta para el análisis y el desarrollo del procesamiento de los datos obtenidos mediante la ejecución del ensayo de análisis multicanal de ondas superficiales “MASW”, puede presentar gran variabilidad en los resultados obtenidos, si no se cuenta con la información complementaria suficiente que permita generar un modelo conceptual previo del sitio de estudio, por lo cual se puede ver afectada la confiabilidad del ensayo, premisa de la cual parte el presente tema de investigación. Se

hace entonces importante la evaluación de las variables de estudio como separación de la fuente y separación entre los geófonos receptores, buscando identificar cuál de éstas presenta mayor incidencia para alcanzar en el ensayo la resolución deseada; es de aclarar que de acuerdo al componente ambiental y a su difícil manipulación, se interpreta el ruido ambiental como una constante, tratando de realizar en campo los ensayos de tal manera que no se presente variabilidad significativa de dicho parámetro. Usualmente este tipo de ensayos se realizan con una fuente de impacto tipo almádana de 18 Lb, que para el caso de esta investigación se deja caer libremente desde una altura aproximada de 2.30m, manteniendo constante la energía de impacto.

Los parámetros variables y los que se mantienen constantes fueron definidos bajo el criterio de adaptar la metodología propuesta por la literatura especificada para condiciones de suelos y/o rocas con diferentes características y distribuciones propias de nuestro ambiente geológico-geotécnico, las cuales presentan condiciones de gran heterogeneidad y anisotropía, con horizontes de suelo o roca de espesores variables, características representativas de los suelos residuales.

1.2 Hipótesis

Una vez realizada la revisión del estado del arte de las técnicas propuestas en la actualidad como métodos para la determinación y medición de la velocidad de onda cortante (V_s) en un semi-espacio, y su respuesta ante la generación de ondas sísmicas de origen antrópico de baja magnitud, se encuentra que se ajustan muy bien para zonas homogéneas e isotrópicas con horizontes de suelo o roca de espesores amplios y con contactos litológicos horizontales, condiciones que para nuestros suelos de espesores residuales amplios difieren considerablemente.

Dichas técnicas apuntan al desarrollo de metodologías para el procesamiento de datos tomados en campo, como registro de ondas superficiales tipo Rayleigh y su posterior transformación en modelos de dispersión y de distribución de V_s en la vertical, fundamentados en algoritmos genéticos. Dicha relación específicamente permite la interpretación precisa de la velocidad de fase del tren de ondas analizado, mediante curvas de dispersión de ondas del tipo Rayleigh.

Para realizar el análisis de Ondas Superficiales se ha desarrollado un método activo denominado Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (*MASW*), que cuenta con una fuente de energía aplicada mediante explosivos o golpes de un objeto contundente, para el cual es de suma importancia el control de la distancia entre la fuente y el tendido de los geófonos receptores, ya que, que en gran parte de esto depende la obtención de registros de fácil y acertada interpretación.

Dada la situación descrita anteriormente, el desarrollo de la tesis está dirigido a formular una metodología de trabajo, en la cual se alcance un equilibrio entre la profundidad de exploración y la resolución, al definir capas de poco espesor en estratos superficiales, en suelos residuales de rocas cristalinas metamórficas e ígneas intrusivas., limitados al Valle de Aburrá y sus alrededores, realizando una variación de los parámetros de análisis como lo son el espaciamiento de receptores y la localización de la fuente de energía;

conservando como constantes las condiciones ambientales del sitio de estudio, el medio generador de energía, número de receptores y la geometría del armado. Es de aclarar que no se contempla durante la ejecución del ensayo el uso de ningún tipo de filtro para procesar la información.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la metodología de ejecución propuesta en la literatura, permitiendo validar la calidad de la resolución obtenida mediante la ejecución del ensayo *MASW*, con la finalidad de determinar los espesores de los materiales que componen el subsuelo y su velocidad de onda cortante V_s asociada, en ambientes geológicos-geotécnicos conformados por suelos residuales de rocas cristalinas metamórficas e ígneas intrusivas.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el rango de aproximación de la metodología de análisis que permite la generación del modo fundamental, para el ensayo *MASW* en suelos residuales.
2. Determinar cuál de las variables de estudio definidas como separación entre los geófonos receptores, y localización de la fuente, presenta mayor incidencia para alcanzar en el ensayo *MASW* una resolución óptima sin necesidad de sacrificar la profundidad de penetración.
3. Confrontar los resultados obtenidos y el análisis realizado con la metodología *MASW*, con respecto a metodologías directas para la determinación de velocidad de onda de corte (V_s) en campo.
4. Adaptar la metodología de ejecución del ensayo análisis multicanal de ondas superficiales *MASW*, de acuerdo con las variables analizadas, a las condiciones de suelos residuales de rocas cristalinas metamórficas e ígneas intrusivas. en un

ambiente tropical de montaña, con miras a mejorar la resolución de los resultados obtenidos.

2. Antecedentes y fundamento teórico-

2.1 Antecedentes

Colombia se encuentra ubicada en la zona de fallas activas denominada Anillo sísmico Circunpacifico. El territorio colombiano está compuesto por la confluencia de cuatro placas tectónicas denominadas como la placa Suramericana, la placa Nazca, la placa Caribe y la microplaca de Panamá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010) Manual sobre sismorresistencia. 2007; dicho contacto genera una actividad sísmica constante con magnitudes considerables, lo que permite realizar una subdivisión del país en zonas de amenaza sísmica, como lo determina la norma Sismo resistente NSR-10, definiendo zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta.

De acuerdo con lo planteado anteriormente se hace estrictamente necesaria una adecuada caracterización dinámica del subsuelo, lo cual es alcanzado mediante el análisis de la dispersividad de las ondas de corte V_s , que finalmente son las que pueden generar mayor daño a estructuras sometidas a cargas dinámicas.

Debido a la dificultad y a la carencia de los equipos para la determinación directa de la velocidad de onda cortante, se utilizaron correlaciones empíricas para la determinación de la velocidad de ésta en función del ensayo *SPT*, desarrolladas en diferentes partes del mundo, como las de Imai (1970); Uma et al. (2008); Ohba & Toriumi (1970); Hara et al. (1974); Ohta & Goto (1978); Wroth et al. (1979), entre otras y Alfaro (2007) en Colombia.

La ejecución de ensayos de penetración estándar *SPT*, en entornos geológicos de suelos residuales, generalmente presentan una dificultad para alcanzar una profundidad de exploración de 30m, ya a que es común encontrar bloques de roca debido al desarrollo de procesos de meteorización diferencial, que impiden el avance del muestreador

estándar; lo cual dificulta significativamente la obtención del parámetro N para los 30m superiores que conforman la columna estratigráfica, como lo estipula la NSR-10 en el ítem A.2.4.2. Adicionalmente dichas magnitudes de velocidad de onda cortante se determinan mediante el uso de las correlaciones anteriormente mencionadas y que han sido desarrolladas en ambientes geológicos diferentes, partiendo del parámetro N, proporcionando un mayor grado de incertidumbre en el análisis de respuesta dinámica del suelo ante la excitación impresa mediante una fuerza interna o externa.

La exploración del subsuelo actualmente se encuentra sometida al uso e interpretación mediante correlaciones empíricas del ensayo *SPT*. Sin embargo, se ha observado un amplio uso de este ensayo, lo cual no implica que este sea el más adecuado para el objetivo de caracterizar dinámicamente un perfil de suelo sea cual sea su litología; por el contrario, Robertson (2012) incita a los Ingenieros Geotécnicos a abandonar el ensayo *SPT* porque es primitivo y no confiable. Mayne et al. (2009) sostienen que con un valor sin unidad ingenieril, siendo este N (golpes/pie), se pierde el sentido real y físico cuando N es usado para correlacionar un gran espectro de parámetros geotécnicos de resistencia y rigidez del suelo. Esto puede resultar en grandes errores, especialmente para valores bajos y altos de N.

Park, R. D. Miller, et al. (1999) en Lawrence, Kansas, desarrollan la metodología denominada Análisis Multicanal de Ondas Superficiales *MASW*, sistema que permite determinar la velocidad de onda cortante V_s en función de la velocidad de dispersión de la onda Rayleigh, mediante una secuencia de transformadas de Fourier en el dominio de la frecuencia y de la velocidad de fase.

De acuerdo con lo estipulado en el apartado A.2.4.5.3 de la NSR-10, es superior la importancia de los métodos geofísicos sobre la de las correlaciones empíricas utilizadas para determinar la velocidad de onda cortante, lo cual genera una inquietud acerca de la efectividad que tiene la ejecución del ensayo *MASW* en nuestros ambientes geológicos geotécnicos de suelos residuales, ya que dicha metodología fue diseñada bajo condiciones de capas estratificadas horizontalmente y con contactos categóricos y muy marcados

Con el fin de reducir el grado de incertidumbre en la determinación de la velocidad de onda cortante, en función de las propiedades de dispersión de las ondas, se trata de ajustar el método de ejecución para su aplicabilidad en ambientes residuales.

La resolución obtenida en la curva de dispersión es directamente dependiente de la separación de los receptores, lo que implica que se castiga la profundidad de exploración, ya que esta última también depende de la separación y número de geófonos Luo, Xia, Liu, Xu, y Liu (2009).

2.2 Fundamento Teórico

El análisis de dispersión de ondas superficiales parte del estudio de la liberación de energía y el cambio del estado de esfuerzos en un semi-espacio elástico, derivado de la propagación de ondas de cuerpo denominadas P y S, y de ondas de superficie definidas como Rayleigh y Love en una masa de suelo caracterizada por cambios de rigidez en función de la profundidad o con discontinuidades presentes en el medio.

Las ondas de cuerpo se denominan compresionales P y de cortante S. Las ondas P se desplazan con una mayor velocidad. Las ondas superficiales se dividen en dos tipos, Rayleigh R y Love L, que presentan velocidades ligeramente similares a las de las ondas S, permitiendo así una facilidad de evaluación y determinación para la velocidad de onda cortante S, partiendo de registros de onda tipo Rayleigh, Sarria (1995).

Diferentes estudios han demostrado que la incertidumbre de medición en los datos de onda de superficie activa es típicamente por debajo de 5% en términos de coeficiente de variación de la velocidad de fase de la onda Rayleigh, J Xia et al. (2012); Marosi y Hiltunen (2004); Lai, Foti, y Rix (2005).

A medida que el conjunto de ondas superficiales se desplaza en un semi-espacio elástico, las frecuencias individuales se van separando las unas de las otras, lo que permite una evaluación de las velocidades a las que se propagan las distintas

frecuencias, con lo cual finalmente se puede obtener la curva de variación de la velocidad de propagación de las ondas S con la profundidad, Sarria (1995).

La dispersión de ondas tipo Rayleigh está definida como el cambio en la velocidad de propagación de las ondas en función de la frecuencia (f). Este tipo de ondas dispersivas son representativas de medios no homogéneos, caracterizados por una gran variabilidad de los valores de la velocidad de onda cortante V_s .

Una característica importante de la dispersión de ondas es que un conjunto de velocidades de fase puede estar asociado 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.

Los parámetros que afectan la velocidad de propagación de las ondas sísmicas son, en cuanto al estado de los materiales, la mineralogía, la porosidad, la cementación, el contenido de arcillas, la geometría de los poros, anisotropía, edad de la roca, entre otros; y en cuanto a agentes externos, se tiene la saturación de agua u otros fluidos, profundidad, presión de poros y presión litostática, temperatura, entre otros. Sarria (1995)

El avance tecnológico ha permitido integrar el principio de la impedancia y disipación de ondas acústicas a la ingeniería Geotécnica, desarrollando metodologías que permiten determinar las propiedades de rigidez del subsuelo a partir de los desplazamientos superficiales de partículas alteradas por un cambio en los esfuerzos de la masa de suelo por ondas superficiales tipo Rayleigh.

El método *MASW* tiene su base en el principio físico de la dispersión de ondas en el terreno, bajo los supuestos de que todos los medios son, en mayor o menor medida, dispersivos, y por lo tanto las distintas frecuencias que componen un determinado conjunto de ondas se propagan a diferentes velocidades, Park, Miller, y Xia (1996).

La técnica de análisis multicanal de ondas superficiales, utiliza un armado y equipo para registro similar al de la prueba de refracción sísmica, pero se analizan las ondas con una técnica que permite separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y finalmente

determinar la variación de velocidad de onda de corte (V_s) en profundidad, Park et al. (1998a).

Descripción del ensayo MASW.

Para la realización de la prueba se instala un tendido lineal con 12 o más geófonos como se observa en la Figura 1; el registro de la vibración se realiza con un sismógrafo digital, y se registra tanto vibración ambiental (microtremores) como vibración superficial inducida (impactos, vehículos en circulación, etc.) con frecuencias de onda generalmente superiores a 4.5 Hz. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las especificaciones generales para la adquisición del registro en el ensayo MASW.

Tabla 1. Adquisición MASW, Fuente: elaboración propia del autor

Adquisición MASW: (V_s)	
Formato de registro:	Seg-2
Intervalo de Muestreo:	125 μ s a 1 ms
Tiempo de Registro:	1024 ms
Numero de Adquisiciones	1 a 2
Número de golpes:	1 a 5
Fuente:	
Peso de la almádana	> 10 Lb
Número de receptores:	> 12
Frecuencia propia de los Geófonos Verticales	> 4.5 Hz

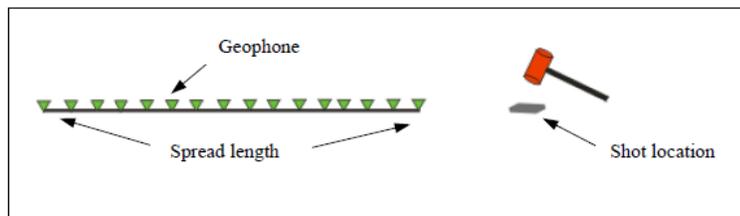


Figura 1. Armado esquemático del equipo en campo, Fuente Dal Moro (2014)

Procesamiento de datos MASW.

En la mayoría de los estudios sísmicos de superficie, más de dos tercios de la energía generada se imparte en ondas Rayleigh, Richart, Hall, y Woods (1971), y el componente primario de la onda viaja a través de la masa de suelo; suponiendo una variación de la velocidad en dirección vertical, cada componente de frecuencia (f) de una onda de superficie, tiene una velocidad de propagación diferente (llamada velocidad de fase, C_f).

Aunque el transporte de la onda por la masa de suelo se considera ruido, sus propiedades de dispersión pueden ser utilizadas para inferir propiedades elásticas cerca de la superficie Nazarian et al. (1983), Stokoe et al. (1994); Park et al. (1998a). La Velocidad de onda de corte (V_s) correspondiente a un perfil de análisis representado a través del modo fundamental conformado por ondas Rayleigh, es uno de los resultados más comunes al analizar las propiedades de dispersión de ondas superficiales Bullen y Bolt (1985). Este tipo de análisis proporciona los parámetros clave utilizados comúnmente para evaluar la rigidez cerca de la superficie, como una propiedad crítica para muchos estudios geotécnicos Stokoe et al. (1994).

Durante la etapa del registro sísmico es importante determinar el Ground roll o tren de ondas (ver Figura 2). Es de anotar que este contempla la adquisición de ruido, y sus propiedades de dispersión pueden utilizarse para inferir las propiedades cercanas a la superficie elástica.

Incluso con el predominio del tren de ondas en los datos sísmicos, un registro sísmico óptimo requiere configuraciones de campo y parámetros de adquisición favorables al plano de registro, ya que el modo fundamental de ondas de Rayleigh puede contener registros de ondas desfavorables, generalmente debido a los denominados efectos de campo cercano, los cuales son indeseables, y son reconocidos como una perturbación similar a un ruido constante en el registro, por lo que para que el registro contenga ondas de Rayleigh sólo puede contener un registro de ondas planas que se generan después de que se han propagado una cierta distancia entre el tendido y el punto fuente, Richart et al. (1971).

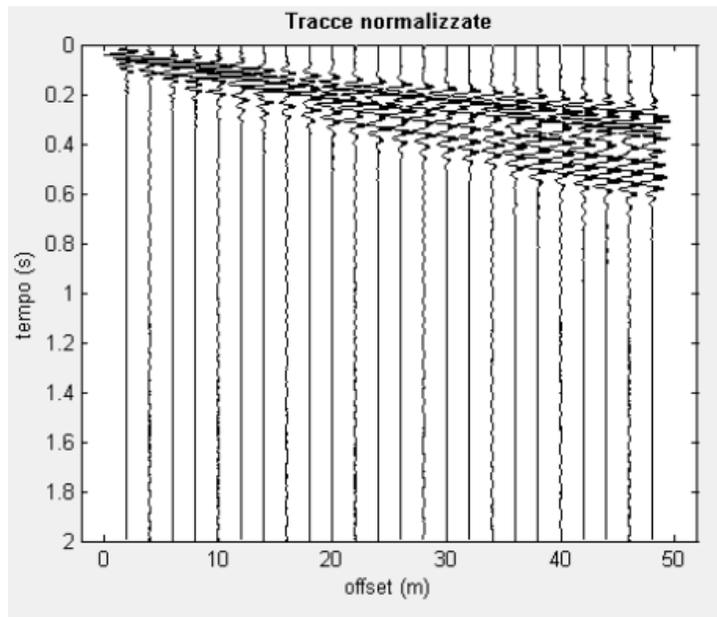


Figura 2. Registro tren de ondas. Fuente: elaboración propia del autor; Software: winMASW

Al igual que con toda la energía acústica que se desplaza en la masa de suelo, con altas frecuencias (longitud de onda corta) los componentes de las ondas de superficie tienden a presentar una atenuación bastante rápida; lo anterior se presenta si se cuenta con una distancia del armado lejana de la fuente; Bullen y Bolt (1985). Si el desplazamiento máximo entre el receptor y la fuente es demasiado grande, los componentes de alta frecuencia de la energía de la onda de superficie no entran en el dominio y son reemplazados por los componentes de mayor frecuencia de las ondas de cuerpo. La contaminación por ondas de cuerpo debido a la atenuación de alta frecuencia genera un aumento en la velocidad de fase Stokoe et al. (1994).

Construcción de la curva de dispersión

La determinación de una curva de dispersión de alta confiabilidad es el paso de mayor importancia durante el análisis y ejecución de la metodología *MASW*, procedimiento para el cual se cuenta con el desarrollo de tres algoritmos denominados:

- Transformada f-K: la cual consiste en realizar la conversión de los datos en función de la distancia y el tiempo $u(x-t)$ al dominio de frecuencia – número de onda $u(f-K)$, permitiendo así la identificación velocidad de fase asociada a la frecuencia f ; Yilmaz (1987).
- Transformada tau-p, la cual consiste transformación Frecuencia-Lentitud (F-P), que es una transformación bidimensional combinada con una transformación P-Tau o “slant-stack”, de los registros de tiempo de los geófonos y la suma del espectro de potencia de las trazas transformadas para cada frecuencia; McMechan y Yedlin (1981).
- Cambio de fase “Phase-Shift” la cual puede ser considerada como un esquema compuesto por los métodos P-Tau y F-K, Dal Moro et al. (2003); Park, Miller, y Xia (1998b).

Dal Moro et al. (2003) realizó la evaluación las tres metodologías enunciadas anteriormente y proponen que “el enfoque de cambio de fase (phase shift) funciona relativamente bien, incluso cuando se consideran un número limitado de trazas” partiendo de la metodología propuesta por C Park et al. (1998).

Choon Park et al. (1998), determina que el punto de partida para el análisis es la función espacio-tiempo de desplazamiento de la onda generada $u(x-t)$; la transformación mediante el espectro de Fourier se puede aplicar en el dominio del tiempo, para transformarla al dominio de la frecuencia, de lo que se obtiene $U(x, w)$:

$$U(x, w) = \int u(x, t)e^{i\omega t} dt \quad (1)$$

$U(x, w)$ puede entonces expresarse como la multiplicación de dos términos separados:

$$U(x, w) = P(x, w)A(x, w) \quad (2)$$

Donde $P(x, w)$ y $A(x, w)$ corresponden al espectro de fase y espectro de amplitud, respectivamente, en el dominio $U(x, w)$; cada componente de frecuencia se encuentra

completamente separada de otras frecuencias, conservando el registro del tiempo de llegada en el espectro de fase $P(x, w)$.

El espectro de fase $P(x, w)$ conserva todo el registro de las propiedades dispersivas de las ondas generadas, y el espectro de amplitud $A(x, w)$, está compuesto de las propiedades de atenuación de la onda y la divergencia esférica, por lo que permite expresar el dominio de $U(x, w)$ como:

$$U(x, w) = e^{-i\varphi x} A(x, w) \quad (3)$$

De una transformación de la posición $U(x, w)$ en (3) se obtiene la velocidad de fase en función de la frecuencia y del espectro de fase $V(w, \varphi)$:

$$V(w, \varphi) = \int e^{-i\varphi x} \left[\frac{U(x, w)}{|U(x, w)|} \right] dx \quad (4)$$

$$V(w, \varphi) = \int e^{-i(\Phi - \varphi)x} \left[\frac{U(x, w)}{|U(x, w)|} \right] dx$$

La integral puede ser considerada como la sumatoria de los desplazamientos de onda asociados a la frecuencia, dando lugar a la determinación de la velocidad de fase $c_w = \frac{w}{\varphi}$

Dicha expresión puede ser representada en el dominio del tiempo equivalente de $\frac{U(x, W)}{|U(x, w)|}$ para cada frecuencia. Para obtener una igualdad en la ponderación debido al efecto de atenuación y de la divergencia esférica se realiza una normalización para una determinada frecuencia w , $V(w, \varphi)$; dicha velocidad de fase tiene un máximo expresado en la función:

$$\varphi = \Phi = \frac{w}{c_w} \quad (5)$$

Donde $\varphi = w / c_w$, w = frecuencia en radianes, y c_w = velocidad de fase de frecuencia w

La función de amplitud $A(x, w)$ equivale a un número real positivo, y para un valor de φ mínimo se puede determinar una velocidad de fase pico en función de la frecuencia y del espectro de fase $V(w, \varphi)$.

La generación de la curva de dispersión, como la que se ilustra en la Figura 3, parte del planteamiento anteriormente mencionado y es uno de los pasos más críticos para la construcción del perfil unidimensional, que representa la variación de la velocidad de onda de cizalladura en profundidad; por tanto su precisión debe ser maximizada mediante la eliminación de perturbaciones en el procedimiento de adquisición y con una excelente coherencia que permita con facilidad el aislamiento de cada componente de frecuencia Yilmaz (1987).

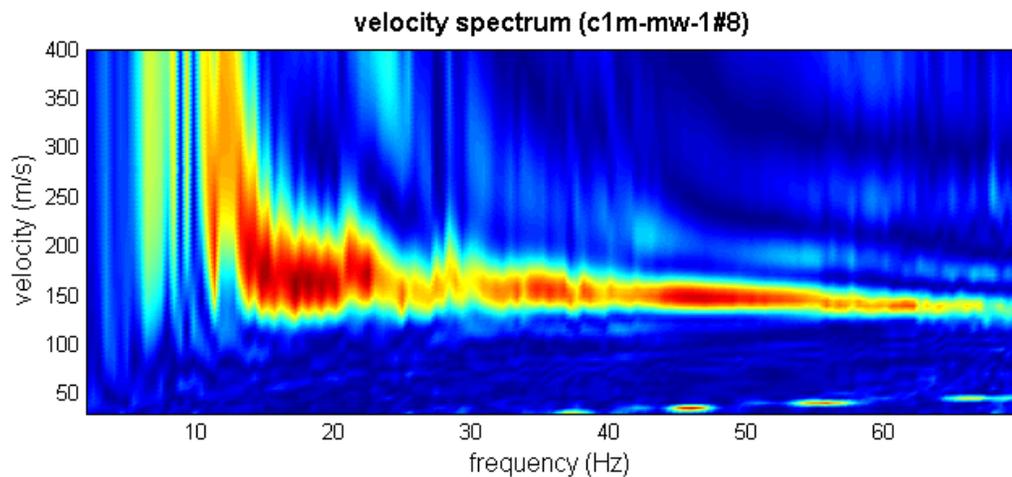


Figura 3. Curva de dispersión esquemática (modo fundamental) Fuente: elaboración propia del autor; Software: winMASW

Inversión de los datos.

Los perfiles de velocidad de la onda cortante V_s , como el que se ilustra en la Figura 4, se calculan utilizando un proceso de inversión iterativo que requiere de los datos de dispersión y de estimaciones a-priori de la distribución de la densidad y del módulo de Poisson. Posterior a dicha determinación se recurre a metodologías de inversión de los

registros obtenidos por medio de un proceso de optimización denominado algoritmos genéticos (GAs) por medio del cual, se obtiene un resultado más fiable y presenta una estimación de resultados ajustados; Dal Moro, Pipan, y Gabrielli (2007), donde sólo la velocidad de onda cortante V_s y el espesor se consideran como variables después de cada iteración, con el coeficiente de Poisson y la densidad del modelo permaneciendo invariantes a lo largo de la inversión. Jianghai Xia, Miller, y Park (1999).

Es necesario especificar un modelo inicial como un punto de partida para el proceso de inversión iterativo. El modelo consta de la velocidad de la onda compresional y la velocidad de la onda de corte, la densidad, y parámetros de espesor. Entre estos cuatro parámetros, V_s tiene el efecto más significativo en la convergencia fiable del algoritmo. Varias metodologías de análisis permiten asegurar la convergencia fiable y precisa, dependiendo específicamente de la definición apropiada de un modelo inicial aproximado de la velocidad de onda de corte Vardoulakis y Vrettos (1988).

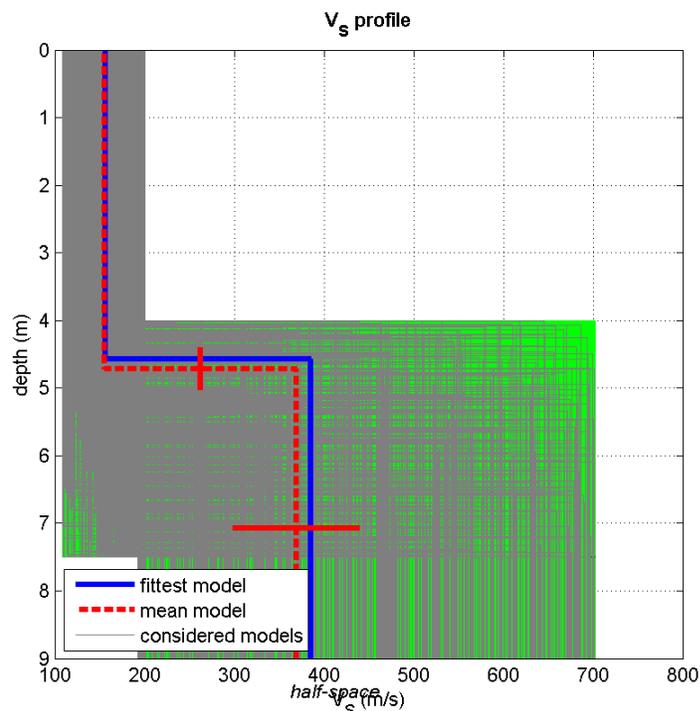


Figura 4. Perfil de velocidad de onda cortante esquemático Fuente: Ilustración propia del autor; Software: winMASW

Las propiedades derivadas del análisis de la dispersión de ondas superficiales representan aportes en cuanto a la aplicabilidad del método en diferentes ambientes geotécnicos Stokoe et al. (1994). Para proyectos de ingeniería, el análisis de la dispersión de ondas superficiales se realiza basado en la determinación del modo fundamental; como se observa en la Figura 5, se puede presentar un modo superior, el cual comúnmente es ignorado. Sin embargo dichos modos deben ser considerados debido a la cantidad de energía que pueden representar en la definición del modelo de capas; principalmente los modos superiores tienden a corresponder a las frecuencias más altas, pudiendo afectar la dispersión característica del modo fundamental Gucunski y Woods (1991), Stokoe et al. (1994).

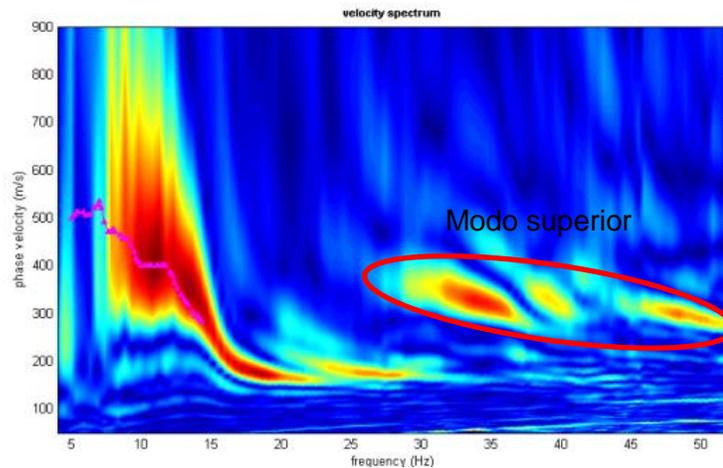


Figura 5. Modo fundamental y modo superior, Fuente: Dal Moro (2014)

Se sugiere realizar el análisis de cada modo como una función individual, siendo éstos los que finalmente definen el modelo de capas en función de la frecuencia y la separación de los receptores, por lo cual para el análisis de velocidad de onda mediante el método multi-canal se usan los modelos numéricos de frecuencia número de onda ($f - K$) del espectro y lentitud frecuencia ($P - w$) de transformación McMechan y Yedlin (1981). Es de aclarar que para la obtención de un modelo representativo y ajustado se requiere de la obtención de un registro de alta resolución y con una amplia gama de frecuencias que le den continuidad al modo fundamental.

La degradación de la resolución del modo fundamental, depende en gran magnitud de la localización de la fuente de energía con respecto al primer receptor (offset), de la

cantidad de receptores y la separación entre elementos. Para aplicaciones del análisis de ondas superficiales en ambientes geotécnicos, en la actualidad es útil limitar el rango de la separación de la fuente a lugares cercanos, ya que los desplazamientos son más estrechos debido a varias razones, como el predominio de campos de ondas de cuerpo en desplazamientos lejanos, el uso de un sismógrafo con número limitado de canales de registro, y la heterogeneidad lateral comúnmente presente cerca de la superficie Park et al. (1996).

3. Metodología

El presente capítulo describe el conjunto de actividades y procedimientos realizados con el fin de lograr el objetivo principal de la presente tesis, el cual consiste en evaluar la metodología de ejecución propuesta en la literatura, permitiendo validar la calidad de la resolución obtenida mediante la ejecución del ensayo *MASW*, en ambientes geológicos-geotécnicos conformados por suelos residuales de rocas cristalinas metamórficas e ígneas intrusivas.

3.1 Determinación de los sitios de estudio

De acuerdo con la idea fundamental de validar la calidad de los resultados obtenidos mediante la ejecución del ensayo *MASW*, para la determinación indirecta de velocidad de onda cortante en ambientes geológicos-geotécnicos conformados por suelos residuales, se definen los tres sitios de estudio presentados en la Tabla 2.

Dentro de las principales características de los sitios de estudio determinados se encuentran perfiles que contemplan amplios espesores de horizontes de meteorización, estratigrafía sin contrastes marcados en la impedancia de capas consecutivas, profundidad del basamento rocoso superior a la profundidad de exploración, morfología conformada por baja pendiente y posibilidad de presentar capas de menor rigidez entre horizontes de mayor densidad.

Tabla 2. Unidad geológica de cada sitio de estudio

Sitio de estudio	Nombre del sector	Unidad geológica
I	Calasanz	Neis de La Iguana (Pzni)
II	Alto de las Palmas	Migmatitas de puente Peláez (PRMPP)
III	La Macarena-Rionegro	Batolito Antioqueño (Ksta)

3.2 Exploración y ensayos de Validación

Con el objetivo de determinar la distribución estratigráfica de los materiales que componen el perfil de cada sitio de estudio, y la variación de la velocidad de onda cortante V_s en profundidad; se propone realizar un estudio particular para cada uno de los tres sitios de estudio presentados en la Tabla 2. A continuación; se mencionan los procesos metodológicos llevados a cabo para la adquisición de la información a priori, y el respectivo análisis de cada sitio de estudio, los cuales serán abordados con mayor énfasis en el capítulo 4.

El programa de exploración de campo comprende la ejecución de una (1) perforación en cada sitio objeto de estudio, procedimiento mediante el cual se realiza una extracción de muestras que permitan conocer la secuencia estratigráfica y definir directamente los espesores de cada una de las capas que componen el perfil.

Para cada uno de los tres sitios de análisis, se realizó una descripción geológica de acuerdo al entorno donde se encuentra ubicado, posteriormente se procede a definir específicamente la distribución estratigráfica, con un análisis detallado de cada horizonte de acuerdo con la recuperación de muestras extraídas en el proceso de exploración directa.

La determinación directa de la velocidad de propagación de la onda cortante para los sitios de estudio I y II contempló la ejecución de un ensayo tipo *Down Hole*; finalmente,

para el sitio de estudio III, se determinó mediante un ensayo con dilatómetro dinámico de Marchetti (*SDMT*).

3.3 Ensayos experimentales tipo MASW

En el presente capítulo se realiza una descripción de los procesos realizados para la adquisición de registros de campo, definiendo las variables y constantes, y las suposiciones que se hacen en cada caso.

Las variables determinantes en los ensayos geofísicos tipo *MASW* son el espesor de cada una de las capas que componen el perfil y su respectiva velocidad de onda de corte asociada. Para cada caso de análisis parámetros como la densidad y Poisson de una de las capas fueron asignadas a priori con valores típicos, debido a la poca sensibilidad que presenta la curva de dispersión de onda Rayleigh en función a la variación de dichos parámetros Nazarian et al. (1983).

El sismógrafo PASI Modelo 16S-U, consiste en una unidad central que se conecta a una computadora portátil, la cual mediante el software de recopilación, brinda las posibilidades de adquirir registros sísmicos y adicionalmente funciona como unidad de visualización en tiempo real de los registros almacenados durante la ejecución de los ensayos.

El equipo permite tiempos de muestreo de 0,125 a 2 milisegundos en cada uno de los 24 canales, con suficiencia de una duración máxima de registro de 65000 milisegundos, y permite el uso de filtros digitales una vez realizada la adquisición del registro sísmico.

Topográficamente los sitios de estudio no presentan variaciones en cuanto a la inclinación del terreno, definiendo características superficiales con pendientes inferiores al 3%

El registro de datos en campo se realizó mediante los parámetros establecidos en la Tabla 3. Es de aclarar que con la intención de evitar mayor incertidumbre en la

adquisición de los registros, se hace uso de una ganancia automática, la cual se ajusta al nivel de ruido ambiental y de la calidad de la fuente; adicionalmente, mediante el uso de una ganancia automática, se evita el uso de filtros que pueden alterar la calidad del registro.

Tabla 3. Parámetros de registro.

Adquisición ensayo MASW	
Ganancia	Automática
Formato de registro:	Seg-2
Intervalo de Muestreo:	1 ms
Tiempo de Registro:	1024 ms

La distribución de los receptores en campo se realizó mediante una línea recta fija, en la cual los sensores son instalados a una separación S entre ellos, con el primer sensor colocado a una distancia predefinida de la fuente; a esta configuración se le conoce como arreglo con eje de simetría, propuesto por Sánchez (1987), permitiendo así obtener un balance de los efectos de campo cercano.

El número de canales a utilizar es definido de acuerdo con la longitud de armado máxima posible en campo de aproximadamente 60 m, y con la separación mínima de receptores 1.0 m, por lo que se obtiene un total de 18 canales, garantizando así una pendiente del armado inferior al 5% y una linealidad de los receptores. Durante la ejecución de los ensayos se utilizaron geófonos verticales con una frecuencia mínima de registro de 4.5 Hz.

Separación de geófonos receptores

Con esta investigación se busca la estimación del espesor de las capas que componen el perfil estratigráfico y la velocidad de onda cortante correspondiente a cada horizonte. Para estudiar los efectos de la separación entre geófonos en la determinación de esta estructura subterránea, se determinan tres arreglos para la adquisición de los registros, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Geometría y distribución de receptores

Arreglo	Geometría	Número de receptores	Espaciamiento de receptores [m]	Longitud Armado [m]
1	Lineal	18	1.0	17
2	Lineal	18	2.0	34
3	Lineal	18	3.0	51

Nota: la longitud máxima del arreglo fue definida debido a que las condiciones del terreno para longitudes mayores a 51.0 m generarían una influencia en los registros asociadas a cambios bruscos en la pendiente del armado y/o la no linealidad entre receptores.

Dado que la onda se propaga en función del modo fundamental, que la propagación aumenta en profundidad y que esta última se encuentra asociada a la longitud máxima de onda λ_{max} , la longitud del armado en superficie, la separación de la fuente, la calidad del registro (alteración por ruido) y al rango mínimo de frecuencias que alcancen a ser registradas, se propone que el proceso de adquisición de los registros esté fundamentado sobre la base de un aumento progresivo en la separación de los geófonos, asociados a diferentes espaciamentos de la fuente de energía, como se puede observar en la Figura 6, lo cual permita obtener curvas de dispersión con un amplio rango de frecuencias que proveen información para realizar la caracterización del terreno, alcanzando progresivamente profundidades de exploración mayores.

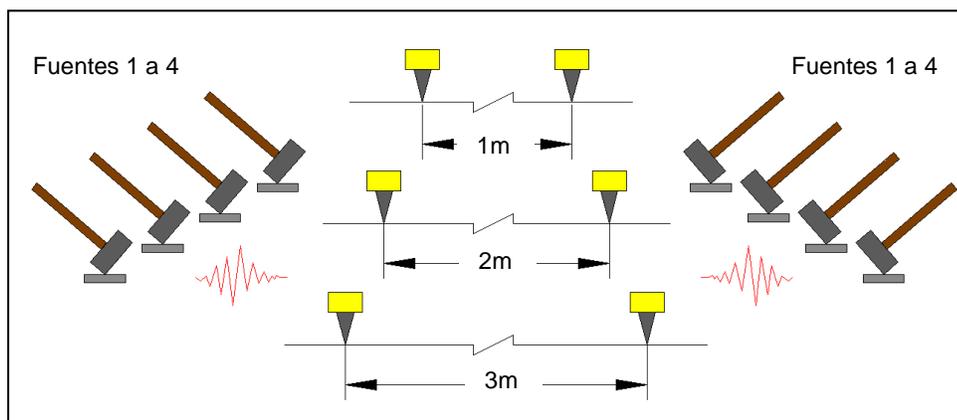


Figura 6. Esquema de la configuración de los ensayos en campo, adoptando diferentes separaciones entre los receptores.

Localización y tipo de la fuente (Offset)

En la disposición del armado se cuenta con que la distancia desde la fuente hasta el punto central de la geometría lineal es generalmente tal que los efectos de campo cercano pueden considerarse de poca influencia, dado que la distancia entre centros fuente-armado es típicamente más grande que la mitad de la longitud de onda experimental máxima; Rosenblad, Li, Menq, y Stokoe (2007).

El componente de energía aferente a ondas superficiales generado mediante la fuente, se desplaza por el subsuelo, el cual es denominado como un espacio heterogéneo, elástico (bajas deformaciones), anisotrópico y poroso, características que permiten que dicho componente de las ondas se atenúen con alta rapidez; Bullen y Bolt (1985); por lo cual si la distancia entre la fuente de energía y el conjunto de receptores es demasiado grande, los componentes de alta frecuencia de la energía de la onda de superficie no alcanzan a ser registrados, debido a la atenuación que sufre la onda en su recorrido hasta alcanzar el tendido de receptores (geófonos de 4.5 Hz), característica fundamental por la cual puede obtenerse en la fase de adquisición, un registro alterado compuesto parcialmente por el registro de ondas de cuerpo. La contaminación por ondas de cuerpo debido a la atenuación de alta frecuencia, es denominada en la literatura como efecto de desplazamiento lejano; Park, Miller, y Xia (1999b).

De acuerdo con los criterios establecidos anteriormente se determina un rango de variación de localización de la fuente para cada registro de 1.0 m, 2.0 m, 4.0 m y 6.0 m con respecto a la posición del primer geófono, tal como se presenta en la Tabla 5, incluyendo disparos en ambos extremos de la línea sísmica, permitiendo disminuir el grado de incertidumbre en cuanto posibles distorsiones debido a la no unicidad de la fuente, a posibles variaciones laterales, el poco grado de no horizontalidad de las capas que componen el subsuelo y condiciones de no homogeneidad del terreno comunes generalmente en ambientes geológicos complejos.

Tabla 5. Parámetros geométricos de adquisición

sitio de estudio	Número de receptores	Separación receptores [m]	Longitud Armado [m]	Separación de la fuente [m]	Número de registros por cada fuente	Número de registros totales
I	18	1	17	1-2-4-6	4	16
		2	34	1-2-4-6	4	16
		3	51	1-2-4-6	4	16
II	18	1	17	1-2-4-6	4	16
		2	34	1-2-4-6	4	16
		3	51	1-2-4-6	4	16
III	18	1	17	1-2-4-6	4	16
		2	34	1-2-4-6	4	16
		3	51	1-2-4-6	4	16

Existe una variedad de enfoques para determinar experimentalmente una curva de dispersión de ondas de superficie en sitios específicos. En las pruebas de fuente activas, las ondas se generan usando una fuente sísmica tipo almádana; Stokoe et al. (1994); Park et al. (1999b); Foti (2002), la cual transfiere la energía al suelo mediante una placa de polietileno UHMW, de dimensiones 0.30x0.30x0.04m, tal como se puede observar en la Figura 7.



Figura 7. Placa y almádana usadas durante la ejecución de los ensayos.

Finalmente cabe anotar que durante el desarrollo del procedimiento de adquisición de los registros, se ejecutan tres perturbaciones por cada registro sísmico (fuente a cada lado del armado de geófonos); finalmente se genera un cuarto registro que se compone de un

promedio de las tres perturbaciones realizadas para cada fuente; dicho proceso se realiza con la finalidad de contrarrestar el ruido existente en cada una de las adquisiciones mejorando la razón señal-ruido.

Software de procesamiento

Durante el proceso de inversión de los registros obtenidos para cada una de las tres zonas de estudio se hizo uso del software *winMASW* versión *7.0 beta*, producido por *ELIOSOFT*, utilizado para la etapa de obtención del perfil vertical de la velocidad de onda cortante V_s mediante la inversión de la curva de dispersión, siguiendo estrictamente el procedimiento de modelado directo propuesto por Moro et al. (2007).

El proceso de inversión de los registros obtenidos se realiza por medio de un proceso de optimización denominado algoritmos genéticos (GAs) por medio del cual, se obtiene un resultado más fiable y presenta una estimación de resultados ajustados; Dal Moro et al. (2007), ya que la principal ventaja de esta clase de optimizadores es que tienden a eludir a la atracción de los mínimos locales y sus esquemas de búsqueda conducidos al azar, y por lo tanto tratan de llegar a una solución óptima teniendo en cuenta todas las regiones de un espacio de búsqueda definida mediante un modelo previo de análisis, a diferencia de los métodos lineales comunes, que no requieren de la definición de un modelo inicial para iniciar el proceso de optimización.

En cada caso de análisis el software contempla cuatro parámetros que afectan la propagación de ondas de Rayleigh, los cuales son la velocidad de onda cortante, velocidad de onda compresional, densidad y espesor de las subcapas. Del conjunto de los parámetros anteriormente mencionados, la velocidad de ondas de corte y espesor de la capa, son determinados como los más importantes y los que presentan una mayor incidencia en la propagación de ondas de tipo Rayleigh; Jianghai Xia et al. (1999), de modo que con el objetivo de disminuir el grado de incertidumbre y la carga computacional, el modelo de análisis permite disponer y reducir el número de variables del sistema, mediante el establecimiento de valores de la velocidad de onda compresional de acuerdo a estimativos de relación de Poisson y densidad de los

materiales, definidos de acuerdo con las condiciones particulares de cada sitio de estudio.

Cada uno de los modelos de análisis contempla mediante el proceso de inversión el espesor de cada capa, mediante la fijación de la distribución de velocidades de onda en un perfil vertical. Esto puede ser útil para invertir varias curvas de dispersión cuando los datos geológicos sugieren que las variaciones laterales se deben principalmente a las variaciones geométricas; este caso se puede presentar en situaciones en las que el espesor de la capa varía a lo largo del perfil, dando lugar a modificaciones de las propiedades elásticas de los materiales, por lo cual los espesores tienden a tener un rango de variación de acuerdo con el grado de variación de la pendiente de dicha capa.

El elemento principal para la optimización es la evaluación del modelo, la cual en la presente investigación se realiza por medio de una función objetivo, que permite una estimación cuantitativa de la bondad del modelo, la cual comúnmente es denominada función individual o de solución candidato.

Limitantes del ensayo.

De acuerdo con las limitantes topográficas para de los sitios de análisis I y III, no es posible trabajar con armados superiores a 60.0 m, lo cual limita la longitud final del tendido de receptores.

La no homogeneidad del subsuelo, asociada a condiciones de variación en las propiedades elásticas de los materiales que conforman cada uno de los horizontes de análisis y las condiciones de borde heterogéneas, fue analizada en el presente estudio mediante la interpretación de modelos con registros obtenidos mediante la variación de la fuente, localizándola simétricamente en cada uno de los extremos del armado.

De acuerdo con la litología presente en cada una de los sitios de estudio, se cuenta con una baja impedancia acústica, relacionado a que no existen contrastes considerablemente marcados en la densidad o rigidez de los materiales que componen el perfil estratigráfico en profundidad, debido a los procesos de meteorización característicos de los suelos residuales.

El registro del ruido ambiental es inherente a cada una de las zonas de estudio, por lo cual para su mitigación o disminución se recurre al apilado de tres registros.

Para evitar posibles alteraciones del registro sísmico y debido a que durante el procedimiento de adquisición de los registros se obtienen señales “limpias” con bajo contenido de frecuencias asociadas al ruido ambiental, se evita la utilización de filtros.

Es de aclarar que debido a que los registros sísmicos fueron obtenidos en la misma configuración de prueba, las variaciones laterales en este tipo de ambientes geológicos complejos y las condiciones ambientales inducidas durante la adquisición, no fueron contabilizadas, y simplemente se asume que se conservan como constantes durante cada uno de los ensayos ejecutados. Los intentos de propagar la incertidumbre en mediciones sobre el perfil estimado de velocidad de onda de corte, también se reportan en la literatura; Comina, Foti, Boiero, y Socco (2011); Asten y Boore (2006); Lai et al. (2005).

Los métodos invasivos generalmente se consideran con un mayor rango de precisión en la determinación directa de la velocidad de onda cortante, pero cabe aclarar que estos no están libres de incertidumbre, dicha incertidumbre no fue contabilizada en la presente investigación.

4. Descripción y caracterización de los sitios de estudio.

Con la finalidad de determinar los espesores de los materiales que componen el subsuelo y su velocidad de onda cortante Vs asociada, en ambientes geológicos-geotécnicos compuestos por perfiles del tipo residual; se propone realizar un estudio particular para cada uno de los tres sitios de estudio, de los cuales su componente estratigráfica se encuentra conformada por procesos de meteorización de la roca parental. A continuación; en la Tabla 6 se presentan los procesos metodológicos llevados a cabo para el análisis de cada sitio de estudio.

Tabla 6. Características de los sitios de análisis

Sitio de estudio	Nombre del sector	Coordenadas		Unidad geológica	Exploración directa		Medida directa de Vs	
		Latitud	Longitud		Tipo sondeo	Profundidad	Ensayo	Profundidad
I	Calasanz	6°16'13.50"	75°36'12.40"	Neis de La Iguana (Pzni)	Roto-percusión	30.0 m	Down Hole	30.0 m
II	Alto de las Palmas	6°9'26.81"	75°30'53.41"	Migmatitas de puente Peláez (PRMPP)	Roto-percusión	25.5 m	Down Hole	24.0 m
III	La Macarena-Rionegro	6°09'09.43"	75°21'00.74"	Batolito Antioqueño (Ksta)	Roto-percusión	27.0 m	Dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT)	12.0 m

Exploración directa

Con el fin de conocer la estratigrafía y caracterizar cualitativamente los materiales que componen el subsuelo, se planteó un programa de exploración de campo que comprende la ejecución de una (1) perforación sobre cada sitio objeto de estudio con las características presentadas en la Tabla 6.

La perforación se realizó mediante los sistemas de percusión y rotación para alcanzar la profundidad proyectada, en las cuales se tomaron muestras alteradas e inalteradas para la clasificación geológica del perfil estratigráfico.

Estudio geológico

De acuerdo con la recuperación de muestras durante la ejecución del proceso de exploración directa, y al entorno donde se encuentra ubicado cada uno de los tres sitios de análisis, se realizó una descripción geológica que permite definir específicamente la distribución estratigráfica de cada sitio.

Ensayos para la determinación directa de la velocidad de onda cortante

Como objetivo para determinar directamente la velocidad de propagación de la onda cortante representativa de cada horizonte que conforma el subsuelo en cada sitio de análisis, se contempla para los sitios de análisis I y II la ejecución de un ensayo *Down Hole*, y para el sitio de estudio III, se contempla la ejecución de un ensayo con dilatómetro dinámico de Marchetti (*SDMT*). A continuación se presentan las características propias de cada una de las dos metodologías de ensayos utilizadas para la determinación directa de la velocidad de onda cortante V_s .

Down Hole

Este tipo de ensayo permite obtener la magnitud de la velocidad de onda cortante en intervalos predefinidos de un (1) metro, por lo cual se pueden asociar conjuntamente con la exploración directa los espesores de cada horizonte y la velocidad de propagación de onda cortante representativa. Durante la ejecución del *Down Hole* se garantizó la adherencia de la tubería de protección de la perforación, mediante la implementación de lechada fluida mezclada con bentonita, para evitar zonas de vacío entre la masa de suelo y la tubería.

La metodología contempla la inserción de un torpedo con sensores triaxiales que permiten detectar cualquier tipo de onda o vibración que se presente en la zona a evaluar, dentro de una perforación revestida con tubería tipo PVC, la cual debe estar en

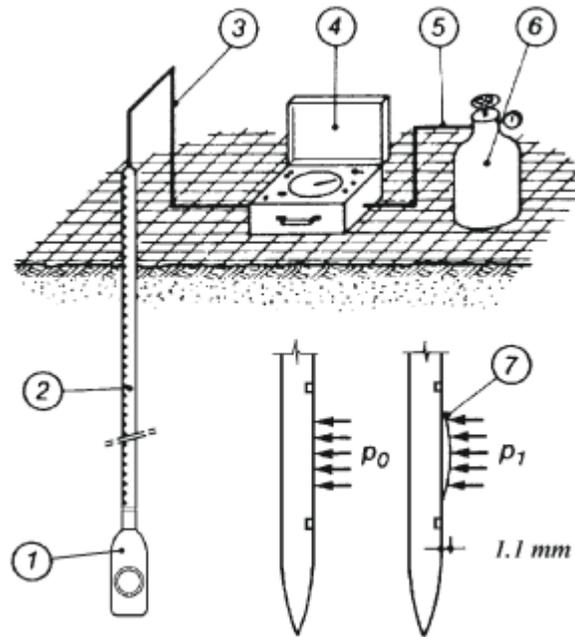
completo contacto con la masa de suelo que se desea analizar. El torpedo es controlado mediante una consola que permite controlar el mecanismo de sujeción para asegurar el geófono a la tubería y garantizar su descenso alineando con respecto a sus componentes ortogonales; además permite asignar los canales de lectura correspondientes a los geófonos del torpedo.

El torpedo se introduce en la perforación para determinar los tiempos de llegada de las ondas generadas en superficie; dichos registros son transmitidos por medio de un cable al Sismógrafo, el cual finalmente es transferido a un computador que permite así visualizar y guardar los datos entregados por el sismógrafo.

ENSAYO DE DILATÓMETRO DINÁMICO DE MARCHETTI (SDMT)

El ensayo con dilatómetro dinámico de Marchetti, permite obtener la magnitud de la velocidad de onda cortante en intervalos predefinidos de 0.50 metros, por lo cual se pueden asociar conjuntamente con la exploración directa los espesores de cada horizonte y la velocidad de propagación de onda cortante representativa. Dicho ensayo fue ejecutado en el sitio de análisis III (ver Tabla 6), hasta una profundidad máxima de 12.0 m, ya que dada la consistencia del suelo a dicha profundidad, es imposible dar continuidad al sondeo.

El equipo básico utilizado para el ensayo de dilatómetro se compone de los elementos mostrados en la Figura 8



1. Hoja del dilatómetro	5. Cable neumático
2. Varas de penetración (CPT)	6. Tanque de gas
3. Cable neumático	7. Expansión membrana
4. Caja de control	

Figura 8. Esquema general de la prueba de dilatómetro. Tomada de Marchetti et al. (2013)

Por medio de la Hoja y la membrana el sistema proporciona información sobre la rigidez del suelo, información que no se puede obtener a partir de otros ensayos de penetración; adicionalmente el sistema cuenta con una incorporación de sensores sísmicos, lo cual permite la medición de la velocidad de ondas de corte V_s , además de la determinación de los parámetros estáticos.

La unidad de control dispuesta en la superficie del terreno, se encuentra equipada con dos medidores de presión a diferentes escalas, para los tipos de suelo según su consistencia, que va de muy suave a muy dura, lo cual permite determinar las presiones generadas en la membrana a cada profundidad de ensayo. Cabe anotar que la fuente de presión es un tanque de Nitrógeno o aire comprimido.

4.1 Sitio de estudio I - sector Calasanz

El sitio de estudio I se encuentra ubicado en el barrio Calasanz, al Occidente del municipio de Medellín en el Departamento de Antioquia (ver Figura 9). El sitio de estudio está a unos 1620 msnm, y referenciado geográficamente en las coordenadas latitud Norte 6°16'13.50" y longitud Oeste 75°36'12.40".

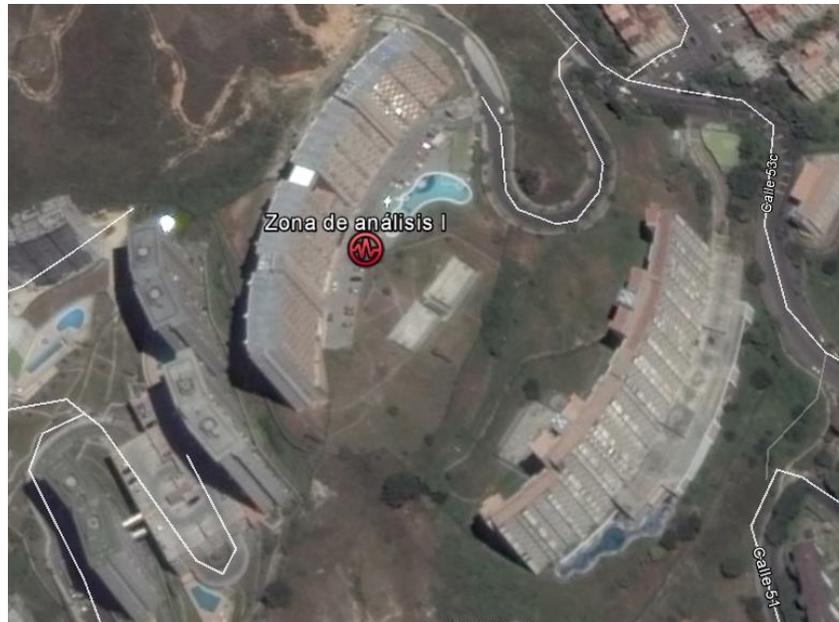


Figura 9. Ubicación del sitio de estudio I. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.



Fotografía 1. Sitio de análisis I.

4.1.1 Geología local

Desde un punto de vista local, la zona de Calasanz donde se localiza el sitio de estudio I, se caracteriza por un basamento dado por la roca tipo gneis feldespático con cuarzo conocido, como neis de La Iguana (Pzni), en contacto con rocas ígneas del batolito de Altavista AMVA (2006).

A una escala local, el Estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá. AMVA (2006), sitúa la zona sobre los suelos residuales del gneis feldespático conocido como neis de La Iguana, sobre el que reposan algunos depósitos de vertiente o llenos antrópicos.

NEIS DE LA IGUANA (PZNI)

El gneis es una roca metamórfica foliada, macroscópicamente es fanerítica (textura granular), de grano medio, compuesta por cuarzo y feldespato principalmente, de color blanco moteado, con bandeamiento composicional marcado por concentraciones de láminas finas de biotita, aunque no presenta foliación clara, pues la biotita tiende a estar desordenada González (2002).

En general la roca se presenta en avanzado estado de meteorización, y genera suelos colores cremas con tonalidades pardas y blanquecinas.

El suelo presenta estructuras heredadas, tipo diaclasa, en algunos casos con caras oxidadas y en los afloramientos muestra un perfil de meteorización que desarrolla suelos limosos y arcillosos de colores cremas con tonalidades pardas y blanquecinas con variaciones a arenas finas de colores claros.

Los terrenos desarrollados sobre esta unidad litológica son susceptibles a la erosión laminar y concentrada, evidenciada por una gran cantidad de cicatrices de surcos y cárcavas, en especial hacia los sectores donde se explotan como material de construcción.

En los taludes cercanos al sitio de estudio, se observa desarrollado un saprolito espeso de color amarillo claro y texturas limo-arcillosa y arenosas, con zonas de caolines de color crema.

4.1.2 Exploración directa

SONDEO PARA RECUPERACIÓN DE MUESTRA

Con el fin de conocer la estratigrafía y caracterizar cualitativamente los materiales que componen el subsuelo hasta una profundidad de 30 m, en el programa de exploración de campo se planeó la ejecución de una (1) perforación sobre el sitio objeto de estudio I (Fotografía 2).

La perforación se encuentra geográficamente referenciada en las coordenadas latitud Norte 6°16'13.50" y longitud Oeste 75°36'12.40".

En el sondeo de exploración directa se evidenció suelo residual y saprolítico, además de las zonas de caolín y roca alterada.



Fotografía 2. Registro fotográfico de la perforación ejecutada en el sitio de estudio I

En la Figura 10, se puede observar el registro de perforación y la recuperación de muestras obtenidas mediante la exploración directa, así como los resultados del ensayo de penetración estándar; adicionalmente se relacionan los materiales encontrados con el respectivo horizonte geológico asociado a su espesor.

EXPLORACIÓN DE CAMPO					
Profundidad (m)	Muestreador	Espesor del estrato (m)	Nivel Freático	Descripción visual de la muestra	Litología
0.00- 0.45		0.0-0.5		Suelo vegetal de textura limo arenosa, con gravas de Color marrón.	
1.00- 1.45		0.5 - 5.5		Fragmentos de grava con matriz limosa de color blanco, diámetro máximo de partícula 0.06m (LLENO)	
2.00- 2.45	SPT				
3.00- 3.45					
4.00- 4.45	SPT				
5.00- 5.45					
6.00- 6.45	SPT	5.5 - 9.0		Arena limosa, con finos y fragmentos de gravas color gris verdoso (RESIDUAL MADURO VI)	
7.00- 7.45					
8.00- 8.45	SPT				
9.00- 9.45		9.0 - 20.0		Limos arenosos con fragmentos de gravas diámetro máximo 0.02 m a 0.06 m, de color ocre (RESIDUAL MADURO VI)	
10.00- 10.45	SPT				
11.00- 11.45					
12.00- 12.45	SPT				
13.00- 13.45					
14.00- 14.45					
15.00- 15.45	SPT				
16.00- 16.45					
17.00- 17.45					
18.00- 18.45	SPT				
19.00- 19.45					
20.00- 20.45		20.0 - 26.0	Arenas limosas con fragmentos de gravas diámetro máximo 0.08 m, de color marrón verdoso (SAPROLITO V)		
21.00- 21.45	SPT				
22.00- 22.45					
23.00- 23.45					
24.00- 24.45	SPT				
25.00- 25.45	NQ	26.0 - 30.0	Roca, color gris verdoso presenta tres familias de juntas, se observan platinas de oxidación y moteado en las junta (ROCA SANA IV)		
26.00- 26.45	NQ				
27.00- 27.45	NQ				
28.00- 28.45	NQ				
29.00- 29.45	NQ				

Profundidad del nivel freático: -

Observaciones:

Figura 10. Registro de perforación y recuperación de muestras

4.1.3 Determinación directa de la velocidad de onda cortante

Como objetivo para determinar directamente la velocidad de propagación de la onda cortante representativa de cada horizonte que conforma el subsuelo en el sitio de análisis I, se contempla el ensayo *Down Hole*. Durante la ejecución de dicho ensayo se garantizó la adherencia de la tubería de protección de la perforación, mediante la implementación de lechada fluida mezclada con bentonita, para evitar zonas de vacío entre la masa de suelo y la tubería.

El ensayo *Down Hole* se encuentra geográficamente referenciado en las coordenadas latitud Norte $6^{\circ}16'13.50''$ y longitud Oeste $75^{\circ}36'12.40''$.

En la Fotografía 3, se observa la ejecución del ensayo *Down Hole* llevado a cabo en el sitio de análisis I.



Fotografía 3. Ensayo Down Hole realizado en el sitio de estudio I

El ensayo fue ejecutado en la perforación de 30m. El intervalo de toma de registros usado fue de 1.0 m, y el punto generación de las ondas o fuente se localizó a 0.30 m en promedio desde el eje de la perforación. Las velocidades de onda de corte (S) son presentadas en la Figura 11, y se indican a manera de resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen variación de la velocidad de onda cortante

Z	Dist. Fuente	Tiempo	Vs
[m]	[m]	[ms]	[m/s]
1	0.3	4.5	232
2	0.3	8.6	235
3	0.3	12.8	236
4	0.3	16.6	242
5	0.3	18.2	275
6	0.3	17.3	347
7	0.3	20.2	347
8	0.3	21.9	366
9	0.3	27.4	329
10	0.3	21.5	465
11	0.3	24.1	457
12	0.3	26.5	453
13	0.3	27.6	471
14	0.3	30.7	456
15	0.3	30.8	487
16	0.3	33.9	472
17	0.3	34.3	496
18	0.3	37.5	480
19	0.3	46.4	410
20	0.3	39.9	501
21	0.3	24.5	857
22	0.3	25.4	866
23	0.3	28.4	810
24	0.3	26.7	899
25	0.3	29.1	859
26	0.3	22.6	1151
27	0.3	24.2	1116
28	0.3	27.3	1026
29	0.3	28.4	1021

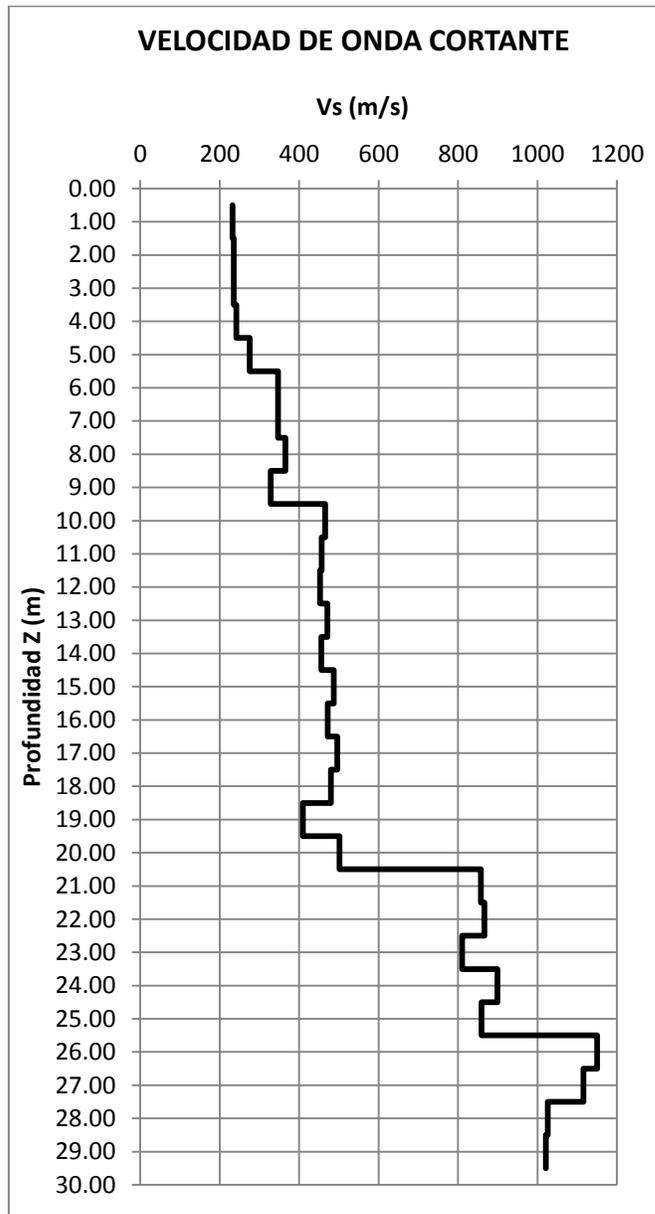


Figura 11. Resultado ensayo Down Hole - sitio de estudio I

De acuerdo con el análisis geológico, el registro de exploración directa y el ensayo geofísico tipo *Down Hole*, realizado para la determinación directa de la velocidad de onda cortante, se define como modelo estratigráfico para el sitio de estudio I, la distribución presentada en la Tabla 8, en la cual se asocia cada horizonte a la velocidad de onda cortante promedio.

Tabla 8. Resumen del modelo de velocidades de onda cortante para el sitio de estudio I

Horizonte	Espesor [m]	$V_{s_{prom}}$ [m/s]
Lleno	4.5	244
Residual maduro VI	4.5	347
Residual VI	11.0	468
Residual V	6.0	956

La distribución estratigráfica definida hasta la profundidad explorada de 30.0 m, se encuentra constituida por cuatro (4) estratos que conforman el subsuelo en el sitio de estudio, dicho perfil estratigráfico fue determinado mediante un análisis geológico de las muestras recuperadas en el sondeo de exploración directa; adicionalmente las velocidades de onda cortante asociadas a cada estrato, fueron determinadas mediante el ensayo *Down Hole*, presentado en la Figura 11.

Superficialmente se encuentra un lleno antrópico con un espesor aproximado de 4.5 m, asociado a una velocidad de onda cortante promedio de 244 m/s, subyaciendo el lleno antrópico se encuentra el perfil correspondiente a suelo residual, el cual en la zona superior entre 4.5 m y 9.0 m de profundidad, se observa un horizonte residual maduro VI, asociado directamente al incremento observado a dicha profundidad en la velocidad de onda cortante promedio correspondiente a una magnitud de 347 m/s. A partir de una profundidad aproximada de 9.0 m hasta 20.0 m, se encuentra un tercer horizonte denominado residual VI, correspondiente a una velocidad de onda cortante promedio de 468 m/s, finalmente a partir de 20.0 m hasta la profundidad de exploración, se evidencia el estrato denominado residual V, el cual se encuentra asociado a una velocidad de onda cortante media de 956 m/s.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar un comportamiento ascendente de la distribución de la velocidad de onda cortante con respecto a la profundidad.

4.2 Sitio de estudio II: Alto de las palmas

El sitio de estudio II se encuentra ubicado al Oriente del municipio de Medellín en el Departamento de Antioquia (ver Figura 12), a unos 2550 msnm, y referenciado geográficamente en las coordenadas latitud Norte $6^{\circ}9'26.81''$ y longitud Oeste $75^{\circ}30'53.41''$.



Figura 12. Ubicación del sitio de estudio II. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.



Fotografía 4. Sitio de análisis II.

4.2.1 Geología local

El sitio de estudio se encuentra al oriente del valle de Aburrá, en el flanco occidental de la Cordillera Central, y está compuesta por unidades de diversas litologías y edades, donde predominan en su núcleo rocas de tipo metamórfico de edades paleozoicas, subyaciendo depósitos más recientes a lo largo de la vertiente, compuestos por diferentes flujos de lodos y escombros en las zonas altas y medias, y depósitos coluviales y aluviales en las zonas bajas de las vertientes al occidente del altiplano en el que se encuentra la zona de análisis; además, depósitos de cenizas volcánicas cubren estos suelos residuales AMVA (2006).

MIGMATITAS DE PUENTE PELÁEZ (PRmPP):

Hacen parte de las diversas unidades metamórficas que conforman el núcleo de la Cordillera Central, y se agrupan dentro de las denominadas “Anfibolitas de Medellín” o “Anfibolitas de Santa Elena”. Este cuerpo alargado de forma irregular en sentido norte

sur, presenta características texturales asociadas a neises y granofels cuarzo feldespático, con presencia a nivel local de biotita y silimanita. Se caracterizan a nivel macroscópico por la presencia de bandeamientos claros y oscuros intercalados, además de la textura neísica y granofels de grano medio. En general este cuerpo se encuentra altamente meteorizado. Tanto los esquistos como los gneises y migmatitas, presentan localmente intrusiones compuestas por cuarzo y feldespato. Este material félsico, al exponerse a los procesos de meteorización, desarrolla caolín en el caso de los feldespatos, y material sacaroidal cuando la intrusión es más cuarzosa, AMVA (2006).

Constituye la unidad de mayor relevancia en el sitio de estudio, se caracteriza por presentar un extenso perfil de meteorización, superior a 25 m de profundidad, desarrollando todos los horizontes descritos a continuación, y observados en el estudio geológico realizado en el sitio de análisis.

- **Horizonte VI:** Presentan coloraciones café rojizo en la zona más superficial y café con zonas amarillentas y verdosas en profundidad, compuestos por un material limoso con presencia de gravas de diámetro máximo 0.02 m a 0.05 m, de compresibilidad alta y alto grado de humedad, caracterizado por la presencia en la zona superior de horizontes tipo Gley y cenizas volcánicas, sobre las cuáles se desarrolla un horizonte orgánico de aproximadamente 80 cm de espesor. Este horizonte presenta para la zona de estudio espesores entre 0.8 y 17.0 m.
- **Horizonte V:** Material de textura limoarcillosa con fragmentos de gravas diámetro máximo 0.08 m, de coloraciones verdosas con zonas cafés, presenta un grado de humedad medio-alto y compresibilidad media. En el sondeo de exploración directa se encontró un espesor considerable, entre los 17.0 m hasta los 25.5 m (profundidad final del sondeo). En la exploración no se alcanzó el horizonte de roca sana o parcialmente meteorizada.

Entre los 20 y 25.5 m de profundidad, se observaron materiales de coloraciones más verdosas, con algunos rasgos heredados de la roca parental, con mayor grado de consistencia.

4.2.2 Exploración directa

SONDEO PARA RECUPERACIÓN DE MUESTRA

Con el fin de conocer la estratigrafía y caracterizar cualitativamente los materiales que componen el subsuelo hasta una profundidad de 25.50 m, en el programa de exploración de campo se planeó la ejecución de una (1) perforación sobre el sitio objeto de estudio II (ver Fotografía 5).

La perforación se encuentra geográficamente referenciada en las coordenadas latitud Norte $6^{\circ}09'28.60''$ y longitud Oeste $75^{\circ}30'53.80''$.



Fotografía 5. Localización aproximada de la perforación ejecutada en el sitio de estudio II

En la Figura 13, se puede observar el registro de perforación y la recuperación de muestras obtenidas mediante la exploración directa; adicionalmente se relacionan los materiales encontrados con el respectivo horizonte geológico asociado a su espesor.

EXPLORACIÓN DE CAMPO					
Profundidad (m)	Muestreador	Espesor del estrato (m)	Nivel Freático	Descripción visual de la muestra	Litología
0.00- 0.45	SPT	0.0 - 0.8		Suelo vegetal de textura arcillosa de color gris con presencia de ceniza volcánica	
0.45- 1.00	SPT				
1.45- 2.00	SPT	0.8 - 5.0		Limo de color café rojizo, con presencia de material orgánico, estado muy blando, (RESIDUAL VI)	
2.45- 3.00	SPT				
3.45- 4.00	SPT				
4.45- 5.00	SPT				
5.45- 6.00	SPT				
6.45- 7.00	SPT	5.0 - 12.0		Limo arenoso, con feldespatos, material de color café con zonas rojizas y verdosas, estado blando. (RESIDUAL VI)	
7.45- 8.00	SPT				
9.00- 9.45	SPT				
10.45- 11.00	SPT				
11.00- 11.45	SPT				
11.45- 12.00	SPT	12.0 - 17.0		Limo arenoso con presencia de gravas de diámetros entre 0.01 m a 0.04 m, y feldespatos, material de color café con zonas amarillentas y verdosas, estado blando. (RESIDUAL VI)	
12.00- 12.45	SPT				
12.45- 13.00	SPT				
13.00- 13.45	SPT				
13.45- 14.00	SPT				
14.00- 14.45	SPT				
14.45- 15.00	SPT				
15.00- 15.45	SPT				
15.45- 16.00	SPT				
16.00- 16.45	SPT				
16.45- 17.00	SPT	17.0 - 25.5		Limo arenoso con fragmentos de gravas diámetro máximo 0.08 m, de color verdoso con zonas cafés, estado medio. (SAPROLITO V)	
17.00- 17.45	SPT				
17.45- 18.00	SPT				
18.00- 18.45	SPT				
18.45- 19.00	SPT				
19.00- 19.45	SPT				
19.45- 20.00	SPT				
20.00- 20.45	SPT				
20.45- 21.00	SPT				
21.00- 21.45	SPT				
21.45- 22.00	SPT				
22.00- 22.45	SPT				
22.45- 23.00	SPT				
23.00- 23.45	SPT				
23.45- 24.00	SPT				
24.00- 24.45	SPT				
24.45- 25.00	SPT				
25.00- 25.45	SPT				

Profundidad del nivel freático: 2.5 m

Observaciones:

Figura 13. Registro de perforación y recuperación de muestras.

4.2.3 Determinación directa de la velocidad de onda cortante

Con el objetivo de determinar directamente la velocidad de propagación de la onda cortante representativa de cada horizonte que conforma el subsuelo en el sitio de análisis II, se contempla el ensayo *Down Hole*. Durante su ejecución se garantizó la adherencia de la tubería de protección de la perforación, mediante la implementación de lechada fluida mezclada con bentonita, para evitar zonas de vacío entre la masa de suelo y la tubería.

El ensayo *Down Hole* se encuentra geográficamente referenciado en las coordenadas latitud Norte $6^{\circ}09'28.60''$ y longitud Oeste $75^{\circ}30'53.80''$.

En la Fotografía 6, se observa la ejecución del ensayo *Down Hole* con una profundidad de 24 m.



Fotografía 6. Ensayo Down Hole realizado en el sitio de estudio II

El intervalo de toma de registros usado fue de 1.0 m, y el punto generación de las ondas o fuente se localizó a 0.80 m en promedio desde el eje de la perforación. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la ejecución del ensayo.

Las velocidades de onda de corte (S) son presentadas en la Figura 14, y se indican a manera de resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen variación de la velocidad de onda cortante

Z	Dist. Fuente	Tiempo	Vs
[m]	[m]	[ms]	[m/s]
1	0.8	9.3	138
2	0.8	13.5	160
3	0.8	19.7	158
4	0.8	28.6	143
5	0.8	22.1	229
6	0.8	25.5	237
7	0.8	26	271
8	0.8	25.7	313
9	0.8	29.4	307
10	0.8	31.3	321
11	0.8	32.2	343
12	0.8	29.8	404
13	0.8	32.4	402
14	0.8	31.1	451
15	0.8	30.8	488
16	0.8	32.8	488
17	0.8	33.8	504
18	0.8	34.1	528
19	0.8	34.2	556
20	0.8	35.2	569
21	0.8	36.1	582
22	0.8	36.6	601
23	0.8	33.6	685
24	0.8	36.2	663

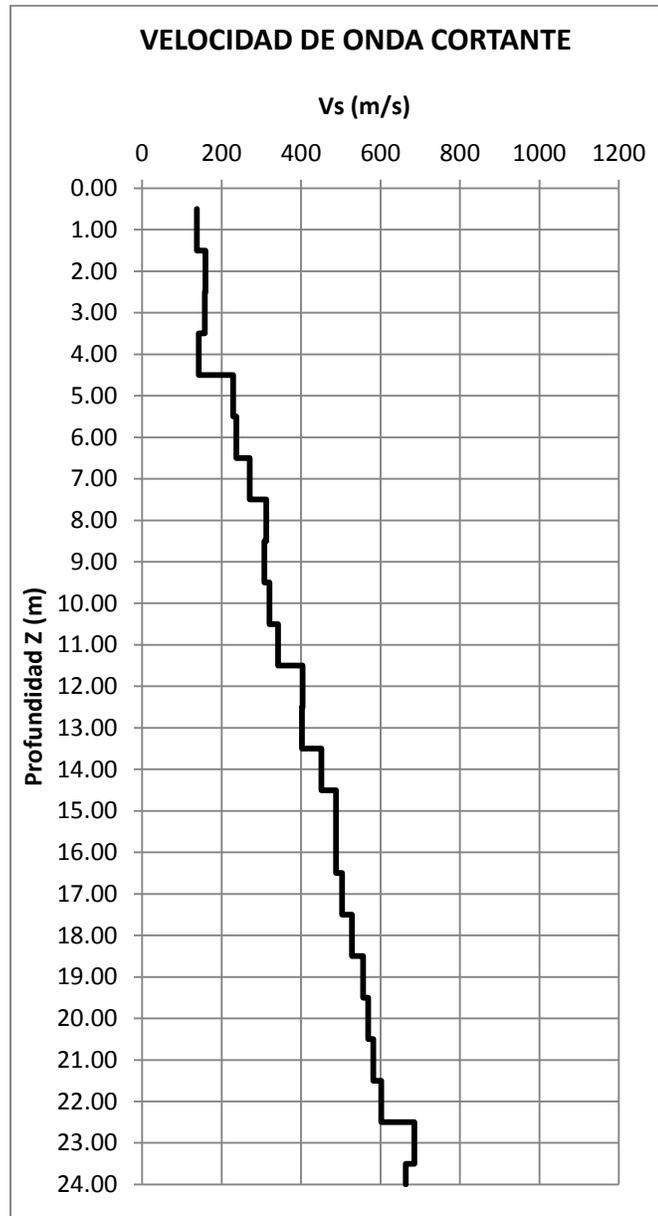


Figura 14. Resultado ensayo Down Hole - sitio de estudio II

De acuerdo con el análisis geológico, el registro de exploración directa y el ensayo geofísico tipo *Down Hole*, realizado para la determinación directa de la velocidad de onda cortante, se define como modelo estratigráfico para el sitio de estudio II, la distribución presentada en la Tabla 10, en la cual se asocia cada horizonte a la velocidad de onda cortante promedio.

Tabla 10. Resumen de la velocidad media de onda cortante para cada estrato

Horizonte	Espesor [m]	$V_{s_{prom}}$ [m/s]
Residual VI (superior)	4.5	149
Residual VI (intermedio)	7.0	289
Residual VI (inferior)	6.0	456
Residual V	6.5	598

La distribución estratigráfica definida hasta la profundidad explorada de 24.5 m, se encuentra constituida por cuatro (4) estratos que conforman el subsuelo en el sitio de estudio, dicho perfil estratigráfico fue determinado mediante un análisis geológico de las muestras recuperadas en el sondeo de exploración directa; adicionalmente las velocidades de onda cortante asociadas a cada estrato, fueron determinadas mediante el ensayo *Down Hole*, presentado en la Figura 14.

En el sitio de estudio, superficialmente se encuentra el perfil correspondiente a suelo residual, denominado como horizonte VI, el cual se encuentra subdividido en tres capas superficial, intermedia e inferior. La capa superior se encuentra definida con un espesor de 4.5 m, y se encuentra asociada a una velocidad de onda cortante de 149 m/s, la capa intermedia se define entre una profundidad de 4.5 m a 11.5 m, y se encuentra relacionada a una velocidad de onda cortante de 289 m/s, posteriormente a una profundidad entre 11.5 m y 17.5 m, se observa la capa inferior del horizonte VI, la cual se encuentra asociada a una velocidad de onda cortante de 456 m/s. Subyaciendo la condición anteriormente mencionada, a partir de una profundidad de 17.5 m hasta la profundidad de exploración, se encuentra el horizonte denominado residual V, correspondiente a una velocidad de onda cortante promedio de 598 m/s.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar un comportamiento ascendente de la distribución de la velocidad de onda cortante con respecto a la profundidad.

4.3 Sitio de estudio III La Macarena-Rionegro

El sitio de estudio III se encuentra ubicado en el municipio de Rionegro en el Departamento de Antioquia, en cercanías del club La Macarena (ver Figura 15). El sitio de estudio está a unos 2107 msnm, y referenciado geográficamente en las coordenadas latitud Norte $6^{\circ}09'09.43''$ y longitud Oeste $75^{\circ}21'00.74''$.



Figura 15. Ubicación del sitio de estudio III. Tomado Google Earth 2015. Modificado por el autor.



Fotografía 7. Sitio de estudio III.

4.3.1 Geología local

Desde un punto de vista local, el sitio de estudio III se encuentra ubicado hacia el nororiente del casco urbano del Municipio de Rionegro, se caracteriza por un basamento dado por la roca tipo granodiorita conocida como Batolito Antioqueño (Ksta), INGEOMINAS (2012).

BATOLITO ANTIOQUEÑO (Ksta):

El nombre de esta unidad proviene del departamento de Antioquia; AMVA (2006), donde aflora sobre la parte axial de la Cordillera Central, cubriendo un área aproximada de 7.800 km², sin incluir los cuerpos satélites. En la plancha 147 Medellín Oriental, aflora 1.100 km², un 14% de la extensión total; hacia la parte oriental.

El saprolito que cubre gran parte de los afloramientos del Batolito Antioqueño en la plancha 147 Medellín Oriental, está constituido por feldespatos caolinizados, láminas

finas de biotita y ocasionalmente moscovita, algunos cristales de hornblenda y granos de cuarzo sacaroidal de color blanco a gris. A pesar del avanzado estado de meteorización, el saprolito conserva en gran parte, la estructura ígnea fanerítica granular de la roca original, con un color moteado blanco a crema de cuarzo; Rodríguez y González (2005).

La baja resistencia a la alteración de las rocas de Batolito Antioqueño origina un perfil de meteorización profundo, de 10 a 50 m, donde es común encontrar bloques esféricos residuales parcialmente meteorizados, constituidos por gravas y arenas y que en conjunto forman un paisaje de colinas subredondeadas de baja altura. AMVA (2006)

Este cuerpo aflora en el sitio de estudio como un suelo residual según la clasificación de Dearman (1991), que se caracteriza por ser un material limo arenoso de color amarillo rojizo, con algunos materiales oxidados, de humedad media. Suprayaciendo este horizonte se encuentra el horizonte V; Dearman (1991), que se caracteriza por presentar la estructura de la roca y donde se pueden diferenciar los minerales que la componen, como son la plagioclasa, la hornblenda, el cuarzo y algunas biotitas. El material es limo arenoso, con una humedad media; se pueden observar algunos fragmentos de roca fresca; en general presenta más de 20 m de profundidad. Cabe anotar que en el proceso de exploración directa no se encuentra roca meteorizada ni fresca.

4.3.2 Exploración directa

SONDEO PARA RECUPERACIÓN DE MUESTRA

Con el fin de conocer la estratigrafía y caracterizar cualitativamente los materiales que componen el subsuelo hasta una profundidad de 27.00 m, en el programa de exploración de campo se planeó la ejecución de una (1) perforación sobre el área objeto de estudio III (ver Fotografía 8).

La perforación se encuentra geográficamente referenciada en las coordenadas latitud Norte 6°09'09.00" y longitud Oeste 75°21'03.20".



Fotografía 8. Localización aproximada de la perforación ejecutada en el sitio de estudio III

En la Figura 16, se puede observar el registro de perforación y la recuperación de muestras; adicionalmente se relacionan los materiales encontrados con el respectivo horizonte geológico asociado a su espesor.

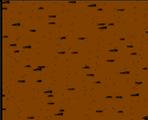
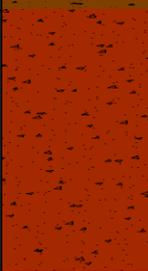
EXPLORACIÓN DE CAMPO					
Profundidad (m)	Muestreador	Espesor del estrato (m)	Nivel Freático	Descripción visual de la muestra	Litología
0.00 - 0.45		0.0 - 1.5		Ceniza volcánica	
1.00 - 1.45	SPT				
2.00 - 2.45	SPT	1.5 - 4.5		Arena limosa con mica y fragmentos de cuarzo de color café (RESIDUAL VI)	
3.00 - 3.45	SPT				
4.00 - 4.45	SPT				
5.00 - 5.45	SPT	4.5 - 11.0		Limo arenoso, con cuarzo, feldespato y óxido de color café rojizo, estado blando. (RESIDUAL V)	
6.00 - 6.45	SPT				
7.00 - 7.45	SPT				
8.00 - 8.45	SPT				
9.00 - 9.45	SPT				
10.00 - 10.45	SPT				
11.00 - 11.45	SPT	11.0 - 27.0		Limo arenoso, con mica feldespato y óxido de color gris verdoso, estado medio. (RESIDUAL IV)	
12.00 - 12.45	SPT				
13.00 - 13.45	SPT				
14.00 - 14.45	SPT				
15.00 - 15.45	SPT				
16.00 - 16.45	SPT				
17.00 - 17.45	SPT				
18.00 - 18.45	SPT				
19.00 - 19.45	SPT				
20.00 - 20.45	SPT				
21.00 - 21.45	SPT				
22.00 - 22.45	SPT				
23.00 - 23.45	SPT				
24.00 - 24.45	SPT				
25.00 - 25.45	SPT				
26.00 - 26.45	SPT				
27.00 - 27.45					
Profundidad del nivel freático:			5.00		
Observaciones:					

Figura 16. Registro de perforación y recuperación de muestras

4.3.3 Determinación directa de la velocidad de onda cortante

Como objetivo para determinar directamente la velocidad de propagación de la onda cortante representativa de cada horizonte que conforma el subsuelo en el sitio de estudio III, se contempla el ensayo con dilatómetro dinámico de Marchetti, el cual permite obtener la magnitud de la velocidad de onda cortante en intervalos de 0.50 metros, por lo cual se pueden asociar conjuntamente con la exploración directa los espesores de cada horizonte y la velocidad de propagación de onda cortante representativa.



Fotografía 9. Ensayo dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT), sitio de estudio III

El ensayo con dilatómetro dinámico de Marchetti (*SDMT*), fue ejecutado a una profundidad máxima de 12.0 m, ya que dada la consistencia del suelo a dicha profundidad, es imposible dar continuidad al sondeo. El intervalo de toma de registros usado fue de 0.50 m, y el punto generación de las ondas o fuente se localizó en promedio a 0.30 m desde el eje del sondeo.

Las velocidades de onda de corte (S) son presentadas en la Figura 17, y se indican a manera de resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen variación de la velocidad de onda cortante

Z	Vs	Go	Rho	Vs Repeatability	Var Coeff.
[m]	[m/s]	[Mpa]	[Kg/m ³]	[m/s]	[%]
1.0	416.0	312.0	1800	415, 416	0.38
1.5	NA*	503.0	1700	515, 416, 614, 630	15.79
2.0	237.0	95.5	1700	262, 228, 222	7.43
2.5	232.0	96.9	1800	232, 231	0.30
3.0	194.0	67.7	1800	193, 195	0.52
3.5	160.0	43.5	1700	161, 160	0.44
4.0	153.0	39.8	1700	146, 172, 142	8.70
4.5	120.0	23.8	1650	118, 121	1.32
5.0	139.0	32.8	1700	136, 141, 141	1.71
5.5	152.0	38.1	1650	151, 154	1.04
6.0	134.0	30.5	1700	132, 135	1.18
6.5	154.0	40.3	1700	155, 152	1.03
7.0	156.0	41.4	1700	154, 157	1.01
7.5	151.0	42.2	1850	149, 153	1.32
8.0	160.0	46.1	1800	162, 159	0.99
8.5	160.0	44.8	1750	160, 160	0.00
9.0	178.0	53.9	1700	176, 179	0.89
9.5	158.0	43.7	1750	150, 167	5.39
10.0	174.0	54.5	1800	174, 175	0.41
10.5	193.0	67.0	1800	193, 193	0.00
11.0	193.0	67.0	1800	192, 194	0.52
11.5	238.0	102.0	1800	240, 237	0.66
12.0	261.0	123.0	1800	260, 262	0.38

La magnitud de la velocidad de onda cortante correspondiente a la profundidad de 1.5 m, no es tenido en cuenta debido a la alta dispersión de las velocidades registradas, representada mediante un coeficiente de variabilidad de 15.79%.

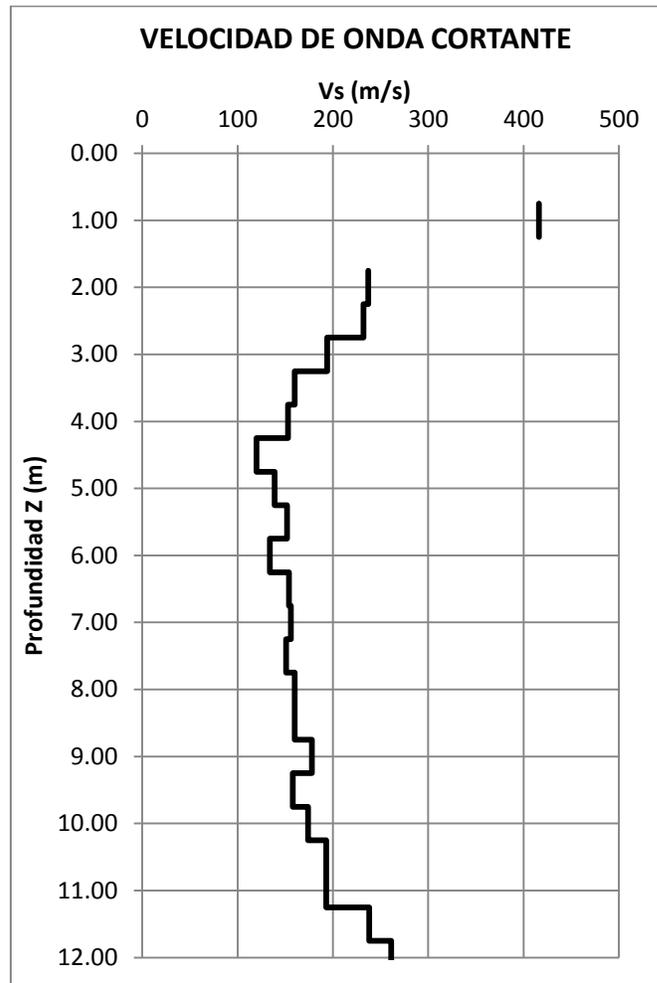


Figura 17. Resultado ensayo dilatómetro dinámico de Marchetti (SDMT), sitio de estudio III

De acuerdo con el análisis geológico, el registro de exploración directa y el ensayo geofísico tipo dilatómetro dinámico de Marchetti, realizado para la determinación directa de la velocidad de onda cortante, se define como modelo estratigráfico para el sitio de estudio III, la distribución presentada en la Tabla 12, en la cual se asocia cada horizonte a la velocidad de onda cortante promedio.

Tabla 12. Resumen del modelo de velocidad media de onda cortante

Horizonte	Espesor [m]	Vs _{prom} [m/s]
Residual VI	4.5	232
Residual V	4.5	151
Residual IV	2.0	212

La distribución estratigráfica definida hasta la profundidad explorada de 27.5 m, se encuentra constituida por cuatro (4) estratos que conforman el subsuelo en el sitio de estudio, dicho perfil estratigráfico fue determinado mediante un análisis geológico de las muestras recuperadas en el sondeo de exploración directa; adicionalmente las velocidades de onda cortante asociadas a cada estrato, fueron determinadas mediante el ensayo *SDMT*, presentado en la Figura 17, el cual alcanzó una profundidad máxima de exploración de 12.0 m, debido a las condiciones del terreno, adicionalmente dicho ensayo fue realizado con una separación de aproximadamente 3.0m con respecto a la perforación, por lo cual los espesores de cada capa pueden presentar cierta variabilidad.

En el sitio de estudio, superficialmente se encuentra una capa de ceniza volcánica de un espesor aproximado de 1.5 m, para la cual los resultados obtenidos en el ensayo *SDMT* no se contabilizan debido a que presentan un alto coeficiente de variabilidad, y a que por su poco espesor es difícil de detectar mediante metodologías indirectas como el *MASW*, por lo cual para efectos prácticos se asume que dicha capa forma parte del horizonte VI. Por tal razón el perfil estratigráfico de la zona se representa únicamente por tres (3) horizontes.

El perfil estratigráfico representativo del sitio de estudio corresponde a un perfil de meteorización de suelo residual, subdividido en tres (3) capas. Superficialmente con un espesor de 4.5 m, se localiza el horizonte VI, el cual se encuentra asociado a una velocidad de onda cortante de 232 m/s, dicha capa se encuentra subyacente hasta una profundidad aproximada de 9.0 m, por el horizonte V, el cual se encuentra relacionado a un descenso en la velocidad de onda cortante con una magnitud media de 151 m/s, Finalmente desde los 9.0 m hasta la profundidad de 12.0 m, se encuentra el horizonte IV, el cual está asociado a un aumento en la velocidad de onda cortante promedio de 212 m/s.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar un descenso en la velocidad de onda cortante, representativo de materiales menos densos localizados entre dos materiales de mayor rigidez, lo cual puede estar asociado a flujos de agua internos que generan problemas de erosión o arrastre de material particulado, afectando la densidad de dicho horizonte.

5. Resultados, análisis y discusión

Shapiro & Campillo (1996) demostraron que las soluciones obtenidas a partir de metodologías clásicas de inversión de ondas de superficie, pueden presentar cierta incertidumbre en la determinación del perfil de velocidad de ondas de corte, respecto a que el resultado obtenido es altamente sensible al modelo inicialmente predefinido. Teniendo en cuenta que el proceso de inversión puede ser fácilmente desviado en cuanto a la parametrización inicial inducida al modelo, y al amplio rango de búsqueda de la solución, durante el desarrollo de la presente investigación se limitaron los rangos de búsqueda en cuanto al número de capas de acuerdo con la información preliminar compuesta por la exploración directa y el análisis geológico.

la profundidad de exploración de cada uno de los sondeos se estima directamente mediante las relaciones presentadas por Foti (2002), para la cual se tienen tres diferentes posibilidades ($\lambda_R/2$; $\lambda_R/2.5$ y $\lambda_R/3$) de acuerdo con la hipótesis sobre la longitud de onda (λ_R)

$$\text{Dónde: } \lambda_R = \frac{C_{f_{\text{máx}}}}{f}$$

$C_{f_{\text{máx}}}$ = Velocidad de fase máxima

f = Frecuencia asociada a dicha velocidad de fase máxima

La posibilidad establecida para determinar la profundidad de exploración corresponde a la expresión $Z = \lambda_R/2$ permitiendo así obtener una mayor profundidad explorada dentro de los rangos admisibles.

En la Tabla 13, se presentan los cálculos de la profundidad explorada para cada uno de los tres sitios de estudio, de acuerdo con el planteamiento anteriormente mencionado.

Tabla 13. Cálculo de la profundidad de exploración del ensayo MASW

Sitio de estudio	Número de receptores	Separación receptores [m]	Longitud Armado [m]	Velocidad de fase máxima $C_{f_{máx}}$ [m/s]	Frecuencia mínima $f_{mín}$ [Hz]	Longitud de onda $\lambda_{máx}$ [m]	Profundidad de exploración máxima [m]
I	18	1	18	350	9.0	39	19
		2	36	330	8.5	39	19
		3	54	290	7.5	39	19
II	18	1	18	300	8.0	38	19
		2	36	260	6.5	40	20
		3	54	230	5.5	42	21
III	18	1	18	230	6.0	38	19
		2	36	250	6.0	42	21
		3	54	230	6.0	38	19

En la Tabla 13, se puede observar que la profundidad de exploración registrada para cada uno de los tres sitios de estudio, se encuentra muy cercana a veinte (20) metros, por lo cual para tener una mejor apreciación de los resultados, ésta es definida como la profundidad máxima de exploración.

Bajo la premisa de que la definición de la curva de dispersión es el paso de mayor importancia durante el análisis y ejecución de la metodología MASW, en la Figura 18, 19 y 20 se presenta cada una de las curvas de dispersión asociadas a las respectivas configuraciones de ensayo realizadas en campo, las cuales fueron definidas y presentadas en la Tabla 5; adicionalmente se presenta la curva de dispersión asociada a las condiciones locales del sitio de estudio, determinada mediante el uso de un procedimiento inverso a partir de la información de referencia obtenida de los sondeos de exploración directa, como se define a continuación.

Mediante el uso de la información adquirida en el proceso de exploración directa y el análisis del componente geológico, se definen los espesores de cada capa que conforma el perfil estratigráfico del sitio en estudio; posteriormente a cada horizonte se le asocia una velocidad de onda cortante definida por medio del ensayo *Down Hole*. La interacción

de ambos componentes (espesor de capa y velocidad de onda cortante) permite determinar un modelo integrado y ajustado a las condiciones locales, las cuales pueden estimarse mediante un análisis inverso donde es posible conocer la curva de dispersión representativa de dicho modelo. Adicionalmente, en la Figura 18, 19 y 20 se disponen gráficamente dos bandas equivalentes a un treinta y seis por ciento (36%) superior e inferior a la velocidad de fase determinada por medio del ensayo *Down Hole* y del proceso inverso mencionado anteriormente.

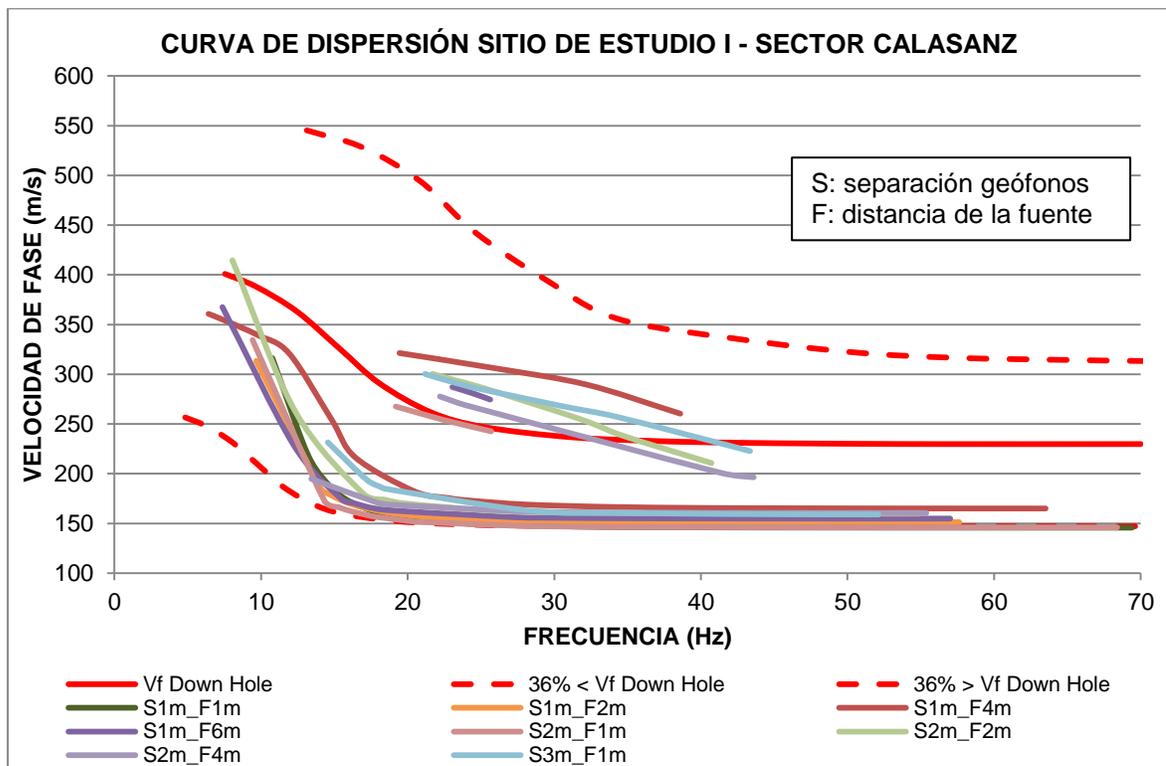


Figura 18. Curva de dispersión ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio I- sector Calasanz, para los 8 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).

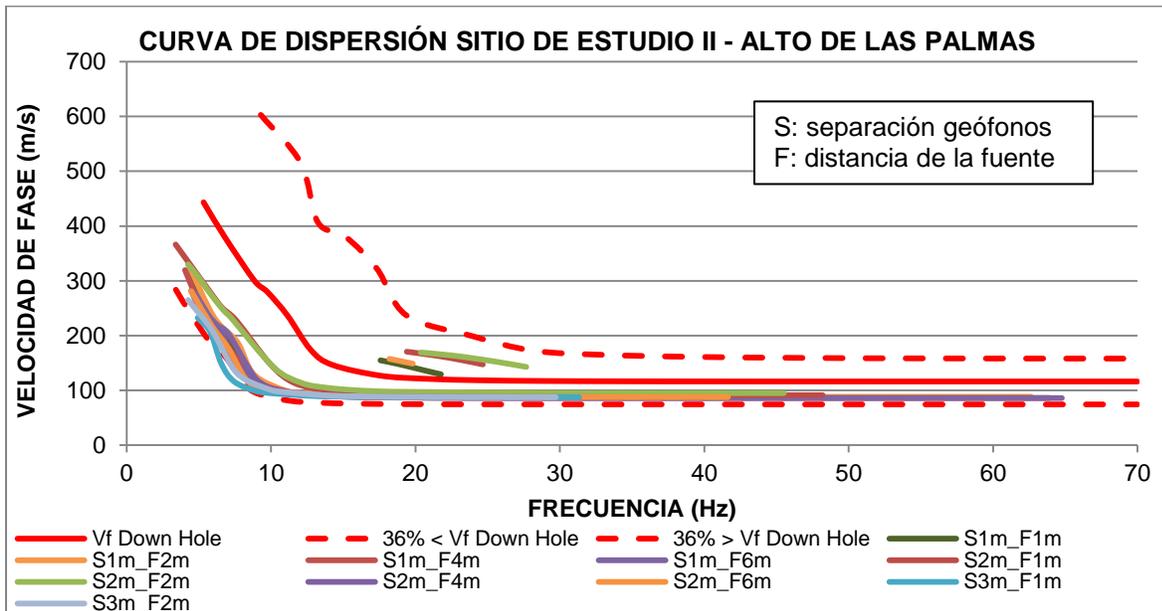


Figura 19. Curva de dispersión ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio II - Alto de Las Palmas, para los 10 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).

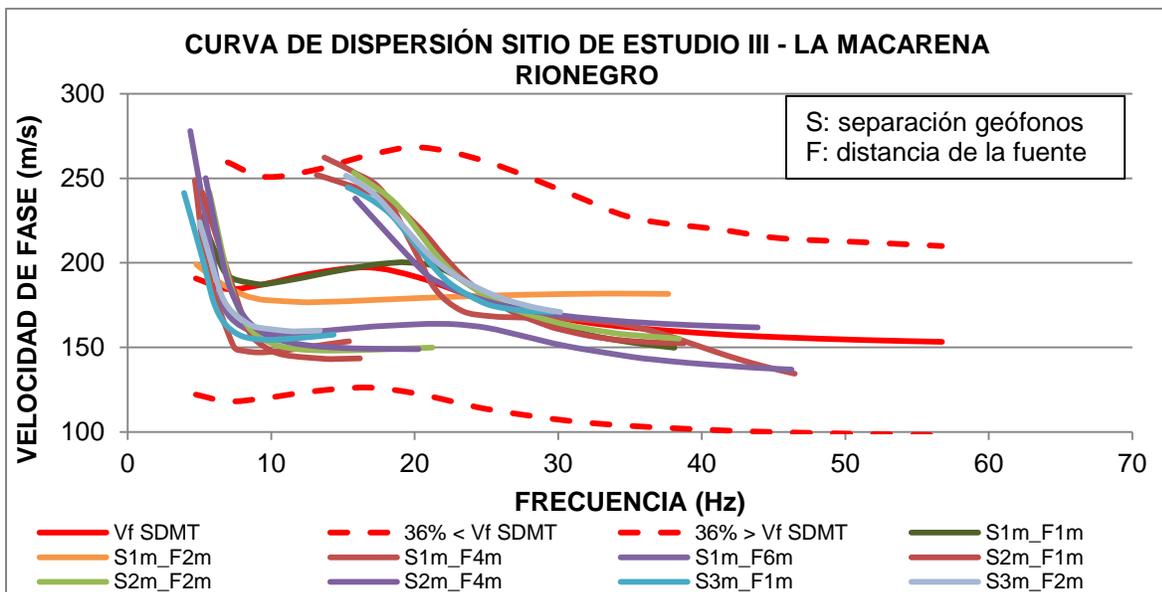


Figura 20. Curva de dispersión ensayo MASW y SDMT, sitio de estudio I II – La Macarena Rionegro, para los 9 ensayos realizados las curvas rojas a trazos representan un incremento y un decremento del 36% respecto a la velocidad de fase estimada con los resultados del ensayo Down Hole (Curva roja continua).

La generación de las curva de dispersión, como las que se ilustran en la Figura 18 a Figura 20, son parte esencial y uno de los pasos más críticos para la construcción del perfil unidimensional, ya que ésta se encuentra estrechamente ligada a la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible observar que las curvas de dispersión correspondientes al ensayo *MASW* se encuentran muy cercanas al límite inferior representado en las gráficas, correspondiente a un sesenta y cinco por ciento (64%) de la velocidad de fase determinada mediante el uso de metodologías directas de velocidad de onda cortante.

Por medio de la evaluación de la curva de dispersión aferente a cada uno de los registros obtenidos en la ejecución del ensayo *MASW*, se aprecia que la resolución en la curva de dispersión presenta alta sensibilidad a la máxima longitud de onda registrada en los procedimientos de adquisición; tal que para armados con separación de receptores de tres metros (3m) se obtienen registros de frecuencias f y velocidades de fase máxima $C_{f_{\text{máx}}}$, con magnitudes muy similares a las registradas en arreglos con separación de receptores de uno y dos metros, lo cual genera que la profundidad explorada se encuentre muy limitada con tendencia a aproximadamente veinte (20) metros.

En la Tabla 14 a Tabla 16, se presentan los resultados de la velocidad de onda cortante y el espesor de cada una de las capas que componen los tres perfiles de estudio, los cuales fueron determinados mediante las metodologías de ensayo *MASW* y *Down Hole*.

Las secciones en las cuales se indica “ND” hacen referencia a que durante la ejecución del procesamiento de los datos adquiridos en las pruebas experimentales, no se observa un registro marcado de amplitudes máximas asociadas a un rango de frecuencias que permitan generar la curva de dispersión apropiada al modelo. De acuerdo con lo anteriormente mencionado se puede inferir que en la fase de adquisición implementando estas características de distribución de receptores y fuente, se obtuvo un registro alterado compuesto parcialmente por ondas de cuerpo, lo que se puede definir como efecto de campo lejano Park et al. (1999b).

Tabla 14. Resultados ensayo MASW y Down Hole, sitio de estudio I - Sector Calasanz

VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE Vs SITIO DE ESTUDIO I - SECTOR CALASANZ														
MASW														DOWN HOLE
Separación receptores		1 m				2 m				3 m				
Localización fuente		1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	
Lleno	Espesor (m)	5.1	5.5	5.0	6.8	5.3	5.6	5.9	ND	4.7	ND	ND	ND	5.0
	Velocidad (m/s)	155	162	177	158	156	170	171	ND	169	ND	ND	ND	244
Residual maduro VI	Espesor (m)	5.9	5.6	6.1	5.2	5.6	5.3	5.0	ND	5.6	ND	ND	ND	4
	Velocidad (m/s)	331	316	408	460	275	330	281	ND	303	ND	ND	ND	347
Residual VI	Espesor (m)	8.0	7.9	7.9	7.0	9.1	9.1	9.1	ND	9.7	ND	ND	ND	11
	Velocidad (m/s)	461	468	421	539	522	547	517	ND	542	ND	ND	ND	468
Residual V	Espesor (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
	Velocidad (m/s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	956

Tabla 15. Resultados ensayo MASW y Down Hole sitio de estudio II - Alto de Las Palmas

VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE Vs SITIO DE ESTUDIO II - ALTO DE LAS PALMAS														
MASW														DOWN HOLE
Separación receptores		1 m				2 m				3 m				
Localización fuente		1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	
Residual VI (superior)	Espesor (m)	4.8	4.9	4.7	4.7	4.3	4.3	5.0	5.2	5.7	5.0	ND	ND	4.5
	Velocidad (m/s)	91	94	91	92	97	102	93	94	94	93	ND	ND	130
Residual VI (intermedio)	Espesor (m)	6.0	6.0	6.2	6.0	6.4	5.7	5.4	6.1	5.9	7.1	ND	ND	7
	Velocidad (m/s)	242	240	210	216	234	233	185	214	199	184	ND	ND	289
Residual VI (inferior)	Espesor (m)	5.9	6.3	6.1	6.5	6.1	6.6	6.2	6.3	5.4	5.5	ND	ND	6
	Velocidad (m/s)	357	324	346	347	357	342	364	374	316	340	ND	ND	456
Residual V	Espesor (m)	3.3	2.8	3.1	3.3	3.2	3.4	3.4	2.4	3.0	2.4	ND	ND	2.5
	Velocidad (m/s)	462	470	443	411	446	429	498	483	541	455	ND	ND	597

Tabla 16. Resultados ensayo MASW y SDMT sitio de estudio III – La Macarena Rionegro

VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE Vs SITIO DE ESTUDIO III - LA MACARENA RIONEGRO														
MASW														SDMT
Separación receptores		1 m				2 m				3 m				
Localización fuente		1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	
Residual VI	Espesor (m)	5.6	5.6	5.0	5.5	4.0	4.7	5.4	ND	5.6	6.0	ND	ND	4.5
	Velocidad (m/s)	254	197	193	189	164	167	159	ND	186	181	ND	ND	232
Residual V	Espesor (m)	5.2	5.6	4.2	4.6	4.0	4.3	5.0	ND	4.2	4.6	ND	ND	4.5
	Velocidad (m/s)	137	171	106	129	130	138	157	ND	121	140	ND	ND	151
Residual IV	Espesor (m)	9.2	8.8	11	9.9	12	11	9.6	ND	10	9.6	ND	ND	2
	Velocidad (m/s)	299	232	319	348	295	318	338	ND	290	297	ND	ND	212

Tabla 18. Porcentaje de error, calculado a partir de la diferencia entre los resultados de MASW y Down Hole, sitio de estudio II - Alto de Las Palmas

PORCENTAJE DE ERROR ESPESOR Y Vs SITIO DE ESTUDIO II - ALTO DE LAS PALMAS													
MASW - DOWN HOLE													
Separación receptores		1 m				2 m				3 m			
Localización fuente		1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m
Residual VI (superior)	Espesor (m)	7%	9%	3%	4%	4%	4%	11%	16%	27%	11%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	30%	28%	30%	29%	25%	22%	28%	28%	28%	28%	ND	ND
Residual VI (intermedio)	Espesor (m)	14%	14%	11%	14%	9%	19%	23%	13%	16%	1%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	16%	17%	27%	25%	19%	19%	36%	26%	31%	36%	ND	ND
Residual VI (inferior)	Espesor (m)	2%	5%	2%	8%	2%	10%	3%	5%	10%	8%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	22%	29%	24%	24%	22%	25%	20%	18%	31%	25%	ND	ND
Residual V	Espesor (m)	32%	12%	22%	32%	28%	36%	36%	4%	20%	4%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	23%	21%	26%	31%	25%	28%	17%	19%	9%	24%	ND	ND

Tabla 19. Porcentaje de error, calculado a partir de la diferencia entre los resultados de MASW y SDMT, sitio de estudio III – La Macarena Rionegro

PORCENTAJE DE ERROR ESPESOR Y Vs SITIO DE ESTUDIO III - LA MACARENA RIONEGRO													
MASW - SDMT													
Separación receptores		1 m				2 m				3 m			
Localización fuente		1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m	1m	2m	4m	6m
Residual VI	Espesor (m)	24%	24%	11%	22%	11%	4%	20%	ND	24%	33%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	9%	15%	17%	19%	29%	28%	31%	ND	20%	22%	ND	ND
Residual V	Espesor (m)	16%	24%	7%	2%	11%	4%	11%	ND	7%	2%	ND	ND
	Velocidad (m/s)	9%	13%	30%	15%	14%	9%	4%	ND	20%	7%	ND	ND
Residual IV	Espesor (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Velocidad (m/s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

De los porcentajes de error determinados en la Tabla 17 a Tabla 19 se puede observar que bajo las condiciones de ejecución del ensayo MASW en comparación con metodologías de determinación directa de la velocidad de onda cortante, y espesores de las capas que componen el perfil estratigráfico definidas mediante la exploración directa y el estudio geológico de las muestras recuperadas, se alcanzó un porcentaje máximo de error cercano al treinta y seis por ciento (36%), el cual es representado gráficamente en la Figura 21, a Figura 23. Adicionalmente se puede observar en las figuras anteriormente mencionadas la relación de la velocidad de onda cortante y su variación con respecto a la profundidad, determinadas mediante la metodología indirecta MASW, versus el uso de las pruebas de determinación directa de la velocidad de onda cortante como *Down Hole* y *SDMT*.

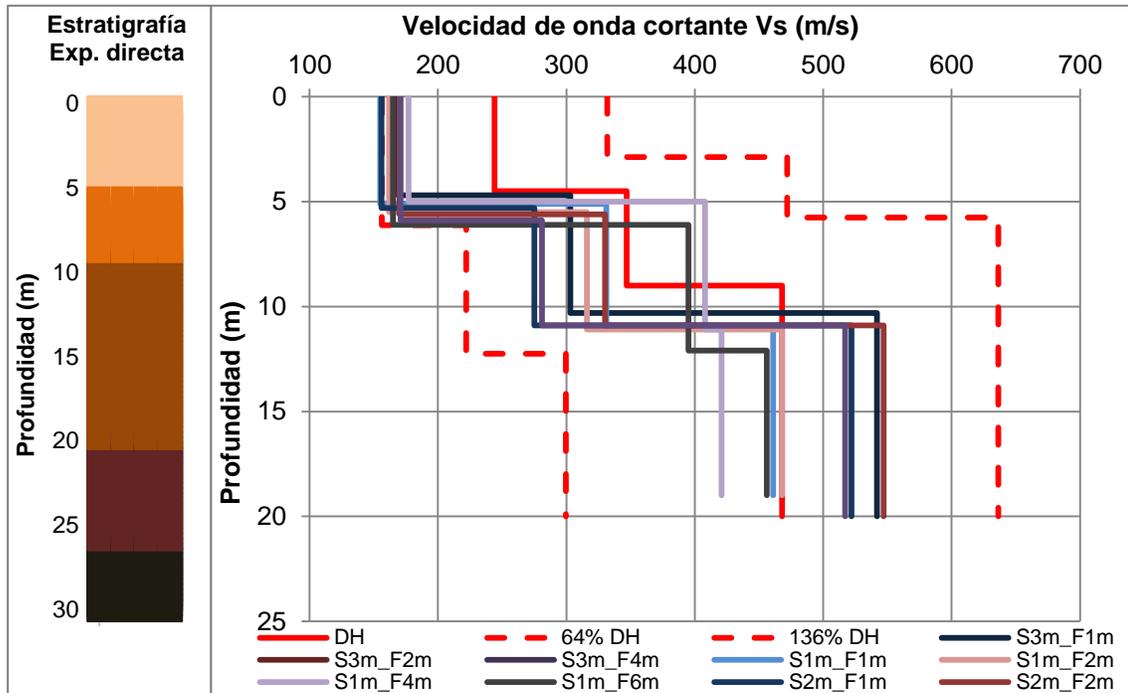


Figura 21. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio I- Sector Calasanz; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente

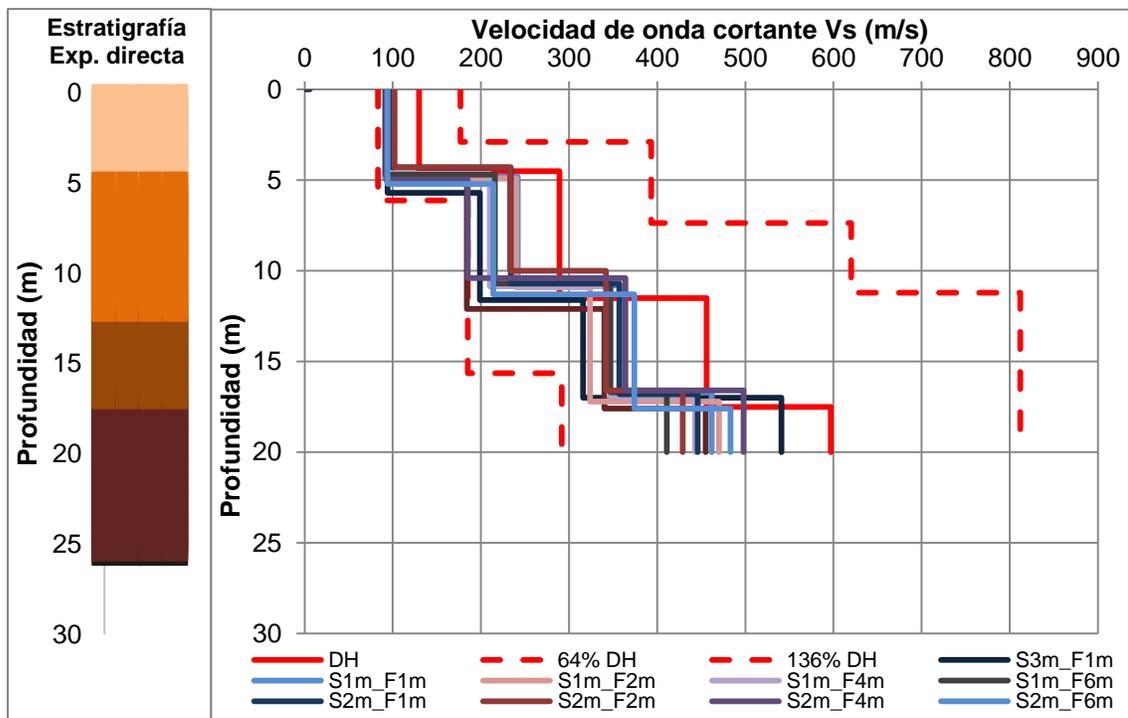


Figura 22. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio II- Alto de Las Palmas; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente

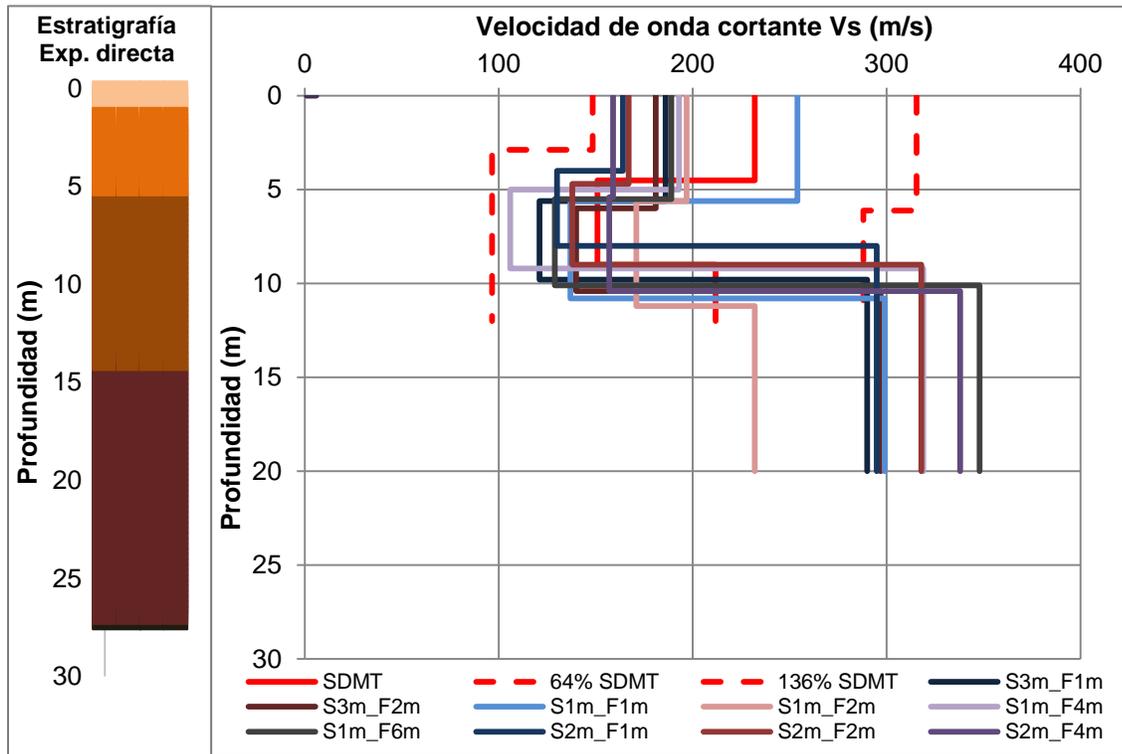


Figura 23. Perfil de variación de Velocidad de onda cortante en profundidad para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; S: separación geófonos y F: distancia de la fuente

Como se puede observar en la Figura 21 a la Figura 23, los modelos de distribución estratigráfica y velocidad de onda definidos con la metodología *MASW*, presentan una tendencia a subestimar la magnitud de la velocidad de onda cortante con respecto al uso de metodologías de medición directa de velocidad de onda cortante. A excepción del sitio de estudio I, en el cual a una profundidad superior a cinco metros, únicamente entre dos y cinco modelos de los nueve analizados, sobreestiman la velocidad de onda cortante, con respecto a la determinación directa de dicho parámetro.

En el sitio de estudio III- La Macarena Rionegro, se observa que a una profundidad superior a diez metros (10m), se presenta un incremento en la velocidad de onda cortante con respecto al parámetro de comparación; es de aclarar que dicho análisis no es apto para representar este comportamiento, ya que esta capa presenta un espesor de aproximadamente seis metros (6m) y solo se cuenta con la caracterización de la velocidad de onda cortante correspondiente a dos metros (2m), debido al incremento en

la rigidez del suelo a una profundidad de doce metros (12m) que impide la continuidad de la probeta de ensayo del *SDMT*.

Se puede observar en la Figura 23, que la metodología *MASW* aplicada a suelos de origen residual, permite definir claramente la presencia de capas de menor rigidez localizados en medio de materiales más rígidos, aunque es de aclarar que se presenta una dispersión máxima del 30% en la magnitud de la velocidad de onda cortante, y del orden del 24% en el espesor de la capa; tal como se puede observar en la Tabla 19.

En la Tabla 20 a Tabla 22 se presenta para cada uno de los tres sitios de estudio, la determinación de los parámetros estadísticos media aritmética y dispersión, definidos a partir de los resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante y el espesor de cada capa, determinados mediante el ensayo *MASW*.

Tabla 20. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio I - Sector Calasanz

HORIZONTE	VELOCIDAD (m/s)		ESPESOR (m)	
	MEDIA	DESV. EST	MEDIA	DESV. EST
Lleno	165.6	7.6	5.4	0.5
Residual maduro VI	329.9	48.8	5.6	0.4
Residual VI	491.8	46.2	8.5	0.9
Residual V	-	-	-	-

Tabla 21. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio II - Alto de Las Palmas

HORIZONTE	VELOCIDAD (m/s)		ESPESOR (m)	
	MEDIA	DESV. EST	MEDIA	DESV. EST
Residual VI (superior)	94	3.3	4.9	0.4
Residual VI (intermedio)	216	21.5	6.1	0.4
Residual VI (inferior)	347	17.6	6.0	0.4
Residual V	464	37.1	3.0	0.4

Tabla 22. Media y desviación estándar de la velocidad y espesor, calculado a partir de los resultados del ensayo MASW para el sitio de estudio III – La Macarena Rionegro

HORIZONTE	VELOCIDAD (m/s)		ESPESOR (m)	
	MEDIA	DESV. EST	MEDIA	DESV. EST
Residual VI	188	28.2	5.3	0.6
Residual V	136.6	19.0	4.6	0.5
Residual IV	304	33.6	10.1	1.0

De los resultados de desviación estándar entre los modelos definidos mediante el uso de la metodología *MASW*, se puede observar que se presenta un buen ajuste en los resultados obtenidos de los espesores de las capas de aproximadamente 0.5 m; a excepción de las capas inferiores correspondientes a los sitios de estudio I y III, debido a que presentan una desviación máxima de la media aritmética de 0.9 y 1.0 m respectivamente.

En cuanto al análisis de la desviación estándar obtenida de los resultados de velocidad de onda cortante determinada a partir del ensayo *MASW*, se observa que se presentan desviaciones máximas de la media aritmética del orden de 48.8 m/s, 37.1 m/s y 33.6 m/s correspondientes a los sitios de estudio I, II y III respectivamente; dichas desviaciones corresponden a los estratos inferiores de cada perfil. Es de aclarar que las desviaciones estándar correspondientes a los horizontes residuales en el sitio de estudio I son muy similares, del orden de 46.2 m/s y 48.8 m/s.

A continuación, entre la Figura 24 y Figura 26, se presenta la distribución de los resultados obtenidos del perfil de velocidad de onda cortante para cada sitio de estudio, según la separación de los receptores.

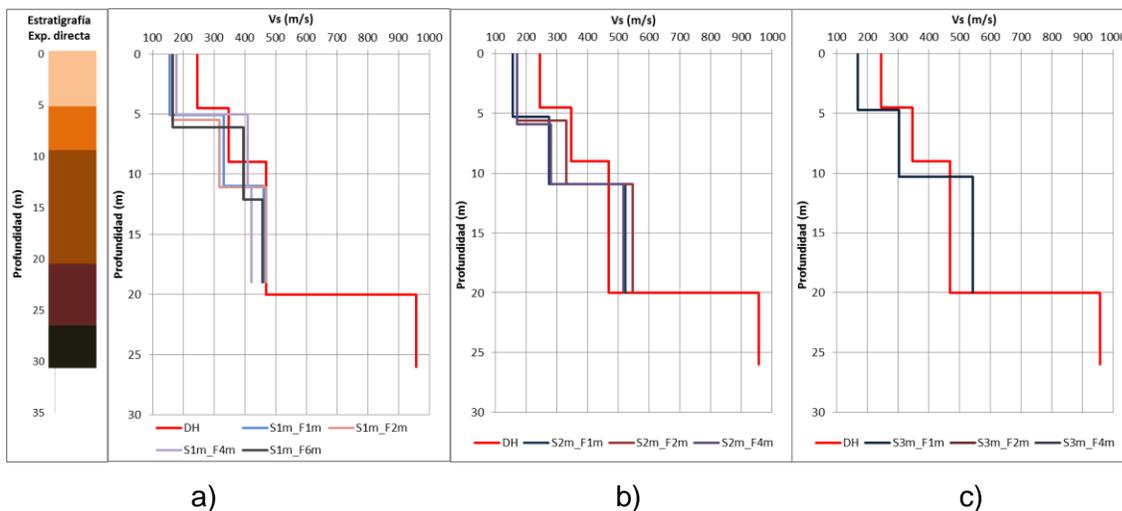
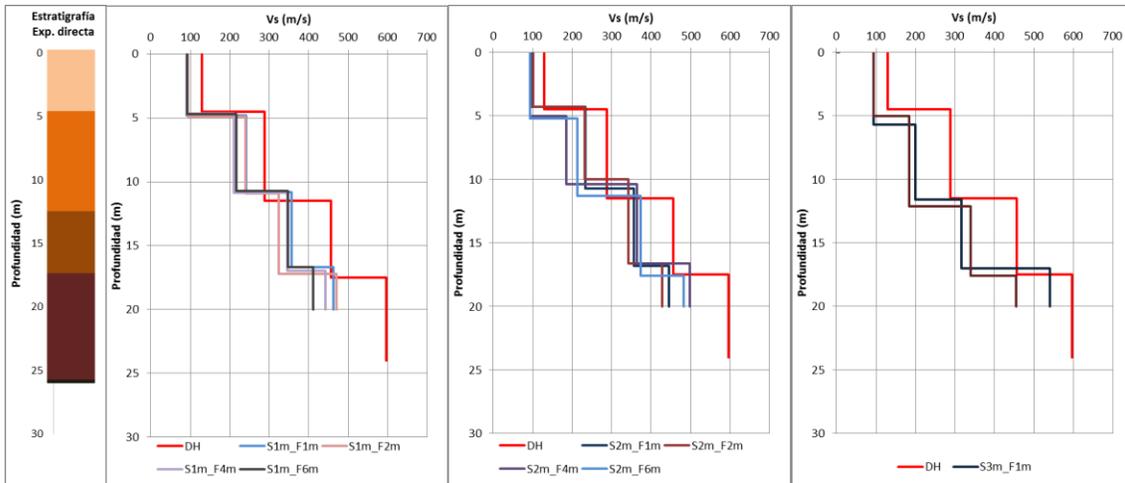
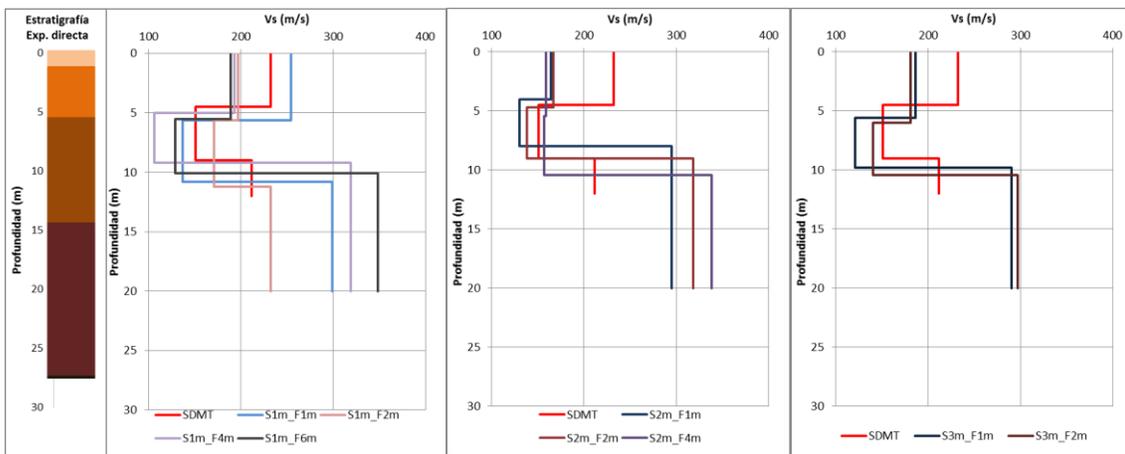


Figura 24. Perfil de V_s con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio I- Sector Calasanz; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.



a) b) c)
Figura 25. Perfil de Vs con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y Down Hole, sitio de estudio II- Alto de Las Palmas; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.



a) b) c)
Figura 26. Perfil de Vs con separación de receptores de 1m, 2m y 3m para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; a) separación de 1m; b) separación de 2m y c) separación de 3m.

En la Figura 24 a la Figura 26, se puede observar que la mayor aproximación de los resultados de velocidad de onda cortante obtenidas mediante la ejecución del ensayo MASW, con respecto al perfil de referencia, corresponde la separaciones de receptores entre uno y dos metros figuras a y b.

A continuación, entre la Figura 27 y Figura 29, se presentan la distribución de los resultados obtenidos del perfil de velocidad de onda cortante para cada sitio de estudio, según la localización de la fuente.

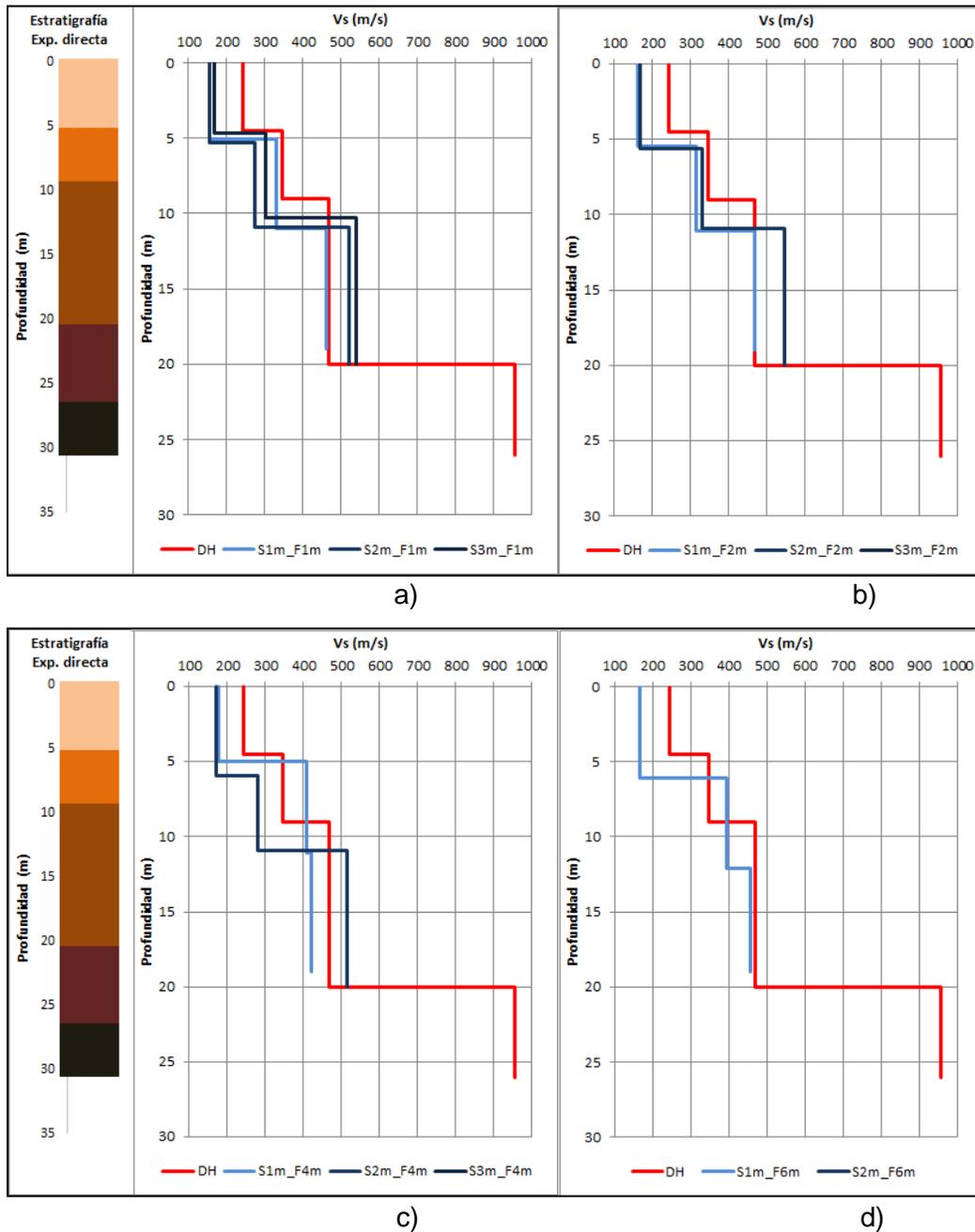


Figura 27. Perfil de V_s con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y Down Hole sitio de estudio I- Sector Calasanz; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.

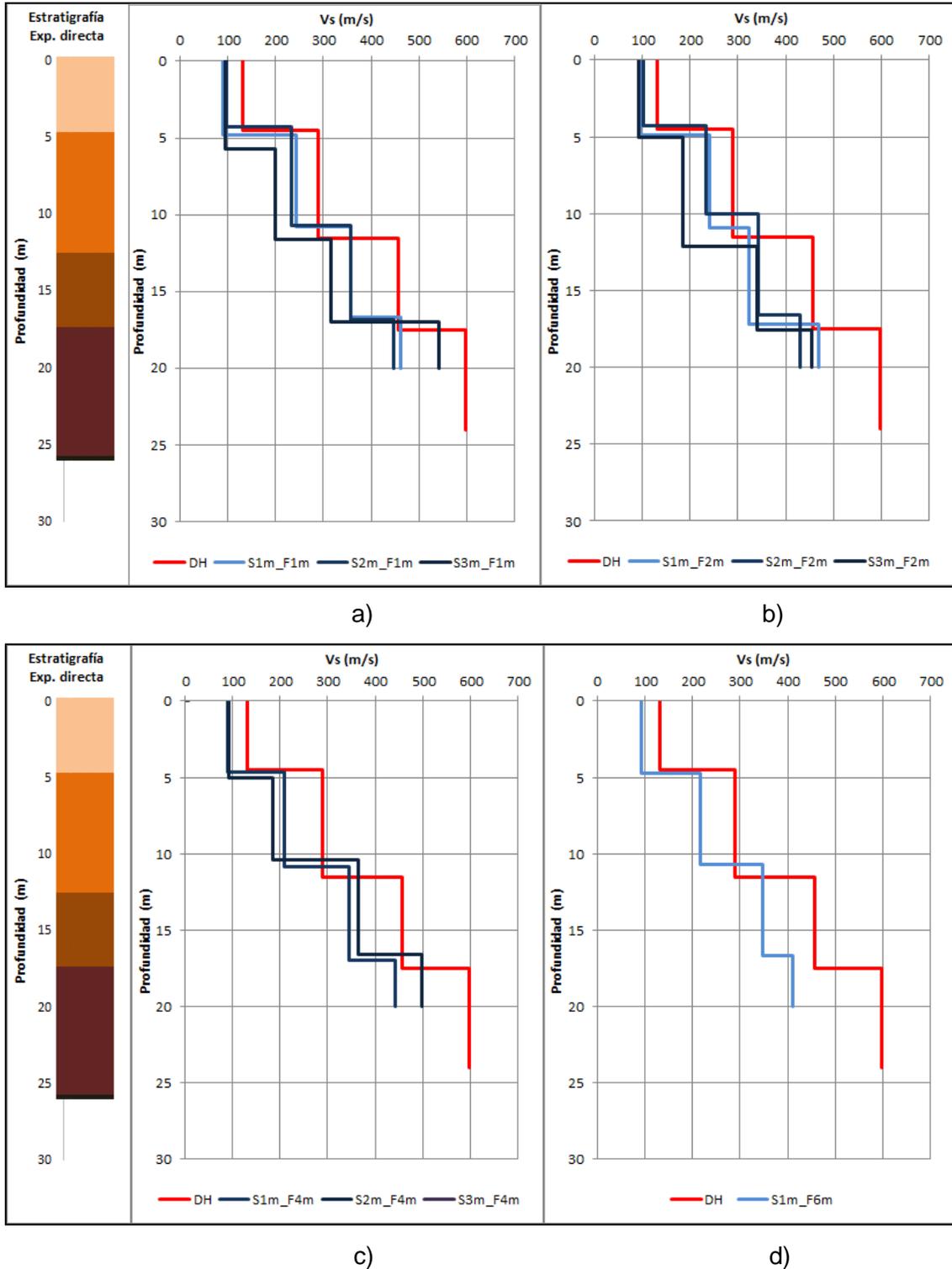


Figura 28. Perfil de V_s con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y Down Hole sitio de estudio II- Alto de las Palmas; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.

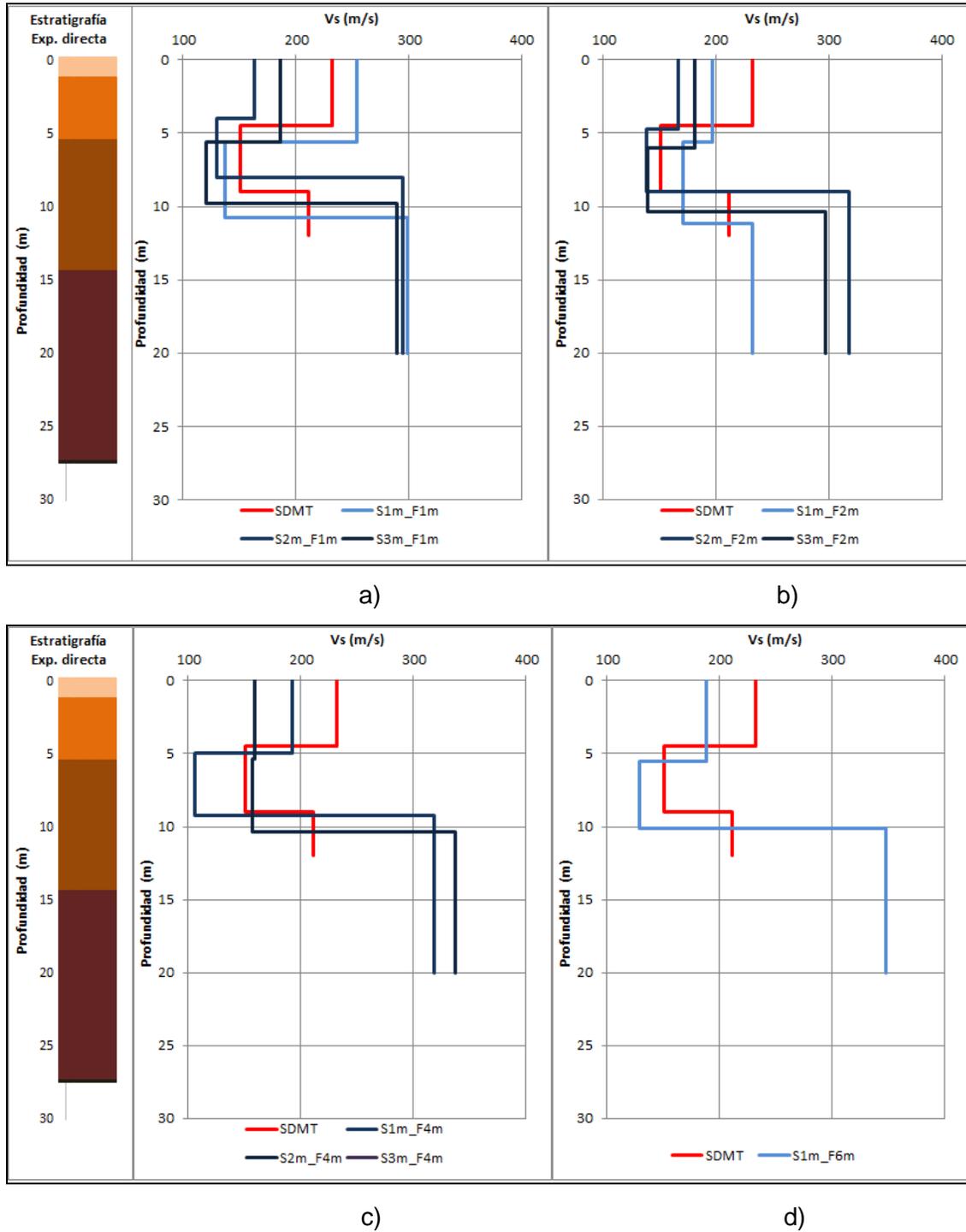


Figura 29. Perfil de Vs con separación de la fuente a 1m, 2m, 4m y 6m para los ensayos MASW y SDMT sitio de estudio III- La Macarena Rionegro; a) localización a 1m; b) localización a 2m; c) localización a 4m y d) localización a 6m.

En la Figura 27 a la Figura 29, se puede observar que la mayor aproximación de los resultados de velocidad de onda cortante obtenidas mediante la ejecución del ensayo *MASW*, con respecto al perfil de referencia, corresponde a una localización de la fuente entre uno (1m) y dos metros (2m), correspondientes a las figuras a y b.

De acuerdo con los análisis realizados de los resultados obtenidos mediante el uso de la metodología para la determinación indirecta de la velocidad de onda cortante *MASW*, con respecto a metodologías directas *Down Hole* o *SDMT*, se observa que en las capas más superficiales, el ensayo *MASW* subestima la velocidad de onda cortante, a excepción de algunos modelos puntuales en los sitios de estudio I y II, adicionalmente para estos mismos sitios de estudio, se puede observar que en los horizontes explorados de mayor profundidad se presenta una tendencia a sobreestimar la velocidad de onda cortante.

En general, de los resultados obtenidos en los ensayos *MASW* realizados en cada uno de los tres sitios de estudio, presentan una mayor tendencia a subestimar las velocidades de onda cortante representativas de modelos estratigráficos en ambientes geológicos geotécnicos derivados de los procesos de meteorización de la roca parental, denominados suelos residuales.

Se puede observar según el análisis estadístico de dispersión presentado en las tablas 17 a 19, que los mayores grados de dispersión en la magnitud de las velocidades de onda cortante determinadas con el ensayo *MASW*, se encuentran en los estratos más profundos, generando un mayor grado de incertidumbre.

De acuerdo con la distribución aferente a cambios en la rigidez y a la determinación de los espesores de las capas que conforman el perfil estratigráfico de cada sitio de estudio obtenidos mediante el análisis de onda superficial tipo *MASW*, se observa que en la definición del espesor se presentan dispersiones del orden de treinta y seis por ciento (36%). Es de notar que se presenta una buena representación de la distribución en cambios de rigidez con respecto a la profundidad, tal que dichos modelos permiten detectar capas de menor rigidez, localizadas entre mapas más densas, como es el caso del sitio de estudio III, adicionalmente para los sitios de estudio I y II se puede observar

claramente que la rigidez de los materiales que componen el subsuelo incrementa con la profundidad.

De acuerdo con la determinación del espesor de cada una de las capas que conforman el perfil estratigráfico en cada sitio de estudio, el cual fue determinado con el análisis de onda superficial tipo MASW, se observa que se presentan dispersiones del orden de treinta y seis por ciento (36%). En cuanto a la distribución aferente a cambios en la rigidez se puede observar que se obtiene una buena representación de la distribución en cambios de rigidez con respecto a la profundidad, tal que dichos modelos permiten detectar capas de menor rigidez, localizadas entre mapas más densas, como es el caso del sitio de estudio III, adicionalmente para los sitios de estudio I y II se puede observar claramente que la rigidez de los materiales que componen el subsuelo incrementa con respecto a la profundidad.

6. Conclusiones

Se puede determinar que armados experimentales con separación de receptores iguales o superiores a tres (3) metros o longitudes de armado lineal superiores a treinta y cuatro metros (34m), con una fuente de energía similar a la usada y definida en la presente investigación, pueden presentar problemas en la definición de la curva de dispersión, ya que se observa la ausencia de grandes rangos de frecuencias que alteran los resultados obtenidos mediante el proceso de inversión.

La importancia de obtener una resolución que permita determinar el modo fundamental en un amplio rango de frecuencias, determina el grado de asertividad en la identificación de los parámetros del modelo del suelo en superficie (velocidades de las ondas de cizalla y espesores de un medio horizontalmente estratificado), por lo cual se recomienda para suelos conformados por ambientes geológicos similares, la ejecución de ensayos tipo *MASW*, con armados cortos que contemplen separaciones entre receptores de uno (1) a dos metros (2m) y una separación de la fuente de energía ente uno (1) y cuatro metros (2m).

Se puede observar mediante los ensayos realizados en los tres sitios de estudio, que la metodología de análisis de ondas superficiales *MASW*, la cual se encuentra fundamentada en la similitud entre la velocidad de onda Rayleigh y la velocidad de onda cortante ($0.86 < V_R/V_S < 0.96$, Foti, 2002), tiende a subestimar la velocidad de onda cortante V_s en capas superficiales hasta aproximadamente un treinta y seis por ciento (36%).

La diferencia observada entre la magnitud de la velocidad de onda cortante determinada a partir de metodologías indirectas con respecto a métodos directos como *Down Hole* y *SDMT*, se encuentra posiblemente asociada a la falta de contraste brusco en la rigidez de las capas que componen el perfil de meteorización que dan origen a suelos residuales; adicionalmente, durante la etapa de registro en campo no se tiene la posibilidad de registrar la presencia en profundidad de la roca fresca o de un material rígido, debido al espesor considerable de la capa de suelo en superficie, característica que genera alta complejidad e incertidumbre en la determinación de la velocidad de onda cortante V_s y el espesor de las capas Dal Moro et al. (2003).

De acuerdo con la metodología de análisis usada para el procesamiento de registros de ondas superficiales con ensayos tipo *MASW*, ésta se encuentra basada en la solución de un problema inverso, por lo cual el resultado obtenido se encuentra directamente relacionado con la limitante de la no unicidad de la solución y el problema de equivalencia. Estos inconvenientes afectan la mayor parte de los problemas geofísicos con enfoque de solución de orden inverso. Esta ambigüedad inherente de la metodología de análisis permite que varios perfiles unidimensionales de velocidad de onda cortante V_s puedan ser asociados a una misma curva de dispersión de ondas Rayleigh. Esta problemática conlleva a identificar un número de conjuntos de parámetros del suelo que son intrínsecamente equivalentes, es decir, su desajuste asociado es relativamente pequeño si se compara con la incertidumbre experimental causada por mediciones y técnicas de procesamiento adoptadas para la estimación de la curva de dispersión experimental, Foti y Cesare (2009) por lo cual se puede concluir que el nivel de ambigüedad en la determinación del perfil de velocidad de ondas de corte final presenta un mejor ajuste que las metodologías que basan su desarrollo de inversión en técnicas deterministas, Socco y Boiero (2008), búsqueda local Menke (1989), y mínimos cuadrados Shapiro y Campillo (1996).

Para obtener una adecuada respuesta sísmica de sitio, se requiere una caracterización ajustada de la media ponderada de las velocidades de onda de corte, según lo estipulado en el artículo A.2.4.5.3 de la NSR-10, empleando la evaluación de la dispersión de onda

elástica mediante el parámetro de velocidad de onda cortante V_{s30} correspondiente a los 30 m superficiales del perfil estratigráfico. Debido a las profundidades alcanzadas en los ensayos realizados, se considera prudente incluir el uso combinado de los métodos pasivos y activos para mejorar la profundidad de investigación.

Es importante subrayar que ninguno de los métodos geofísicos proporciona "lo que puede ser considerado como una estimación no sesgada" Moss (2008) y que una correcta evaluación de la incertidumbre es crucial; por lo cual se puede concluir que para el desarrollo de metodologías de investigación o prospección del subsuelo indirectas como el ensayo *MASW*, se debe contar con información a priori que permita la interpretación y validación de los resultados obtenidos.

Anexo A: Registros de frecuencia y velocidad de fase, curvas de dispersión MASW

CURVAS DE DISPERSIÓN SITIO DE ESTUDIO I - SECTOR CALASANZ

	S1m F1m		S1m F2m		S1m F4m		S1m F6m		S2m F1m		S2m F2m		S2m F4m		S2m F6m		S3m F1m		S3m F2m		S3m F4m		S3m F6m		
	f(Hz)	VR(m/s)																							
MODO FUNDAMENTAL	10.8	316.3	9.7	313.5	6.4	360.7	7.4	367.6	9.4	334.4	8.1	414.6	13.4	194.8			14.6	231.5							
	13.2	217.5	14.1	185.4	7.5	354.0	12.2	229.4	14.3	173.1	12.3	263.4	17.9	170.7			17.2	194.1							
	15.0	183.0	14.7	179.2	9.8	339.2	15.4	175.2	15.3	166.3	16.9	180.3	18.8	168.9			18.2	186.5							
	15.0	183.0	15.4	173.6	11.9	320.8	16.3	170.5	15.9	163.1	18.4	173.8	29.8	161.5			18.4	184.9							
	15.7	174.9	16.3	168.7	14.8	254.5	18.4	163.7	17.2	158.4	19.8	170.0	46.4	160.5			28.2	163.0							
	16.5	169.1	16.9	166.0	16.4	216.3	27.4	156.1	17.9	156.4	25.5	163.1	48.5	160.5			35.2	160.3							
	17.2	164.7	18.6	161.1	20.4	182.3	28.9	155.8	20.2	152.2	29.1	161.5	50.5	160.5			47.2	159.1							
	17.9	161.3	19.7	158.8	22.8	175.4	30.0	155.6	20.8	151.5	30.3	161.2	53.7	160.5			49.6	159.0							
	19.5	156.3	21.7	156.2	24.1	173.2	32.6	155.3	27.7	147.4	45.4	159.9	55.4	160.5			52.1	159.0							
	23.7	150.1	25.1	153.7	28.1	169.0	35.5	155.1	29.2	147.1	48.1	159.9													
	25.3	148.9	26.8	153.0	33.8	166.5	38.8	155.0	30.8	146.8	50.6	159.8													
	31.6	146.8	30.0	152.2	39.3	165.7	42.1	154.9	34.0	146.5	53.0	159.8													
	35.0	146.3	32.3	151.9	42.2	165.4	44.4	154.9	35.5	146.4	54.9	159.8													
	41.3	145.9	36.7	151.5	44.7	165.3	45.9	154.9	41.0	146.2															
	46.9	145.8	41.4	151.4	48.0	165.2	50.0	154.9	41.9	146.1															
	49.4	145.8	43.6	151.3	49.6	165.1	52.8	154.8	47.0	146.1															
	58.5	145.7	50.0	151.3	57.1	165.0	57.0	154.8	48.7	146.0															
	62.4	145.7	52.9	151.2	59.1	165.0			49.2	146.0															
	66.3	145.7	55.2	151.2	63.0	165.0			66.0	146.0															
	69.4	145.7	57.6	151.2	63.5	165.0			68.4	146.0															
MODO SUPERIOR					19.4	321.3	23.1	287.2	19.2	267.6	21.7	300.4	22.2	277.7			21.2	300.3							
					26.0	306.1	24.5	280.8	22.1	255.6	22.1	298.8	23.2	272.5			22.1	296.3							
					32.2	289.6	25.6	274.6	23.2	251.4	23.1	294.7	23.8	269.4			23.9	288.6							
					38.6	260.4			24.2	247.8	23.3	293.7	41.4	200.9			24.5	286.7							
									25.7	242.6	25.2	286.0	43.6	196.4			30.6	267.8							
											31.8	254.6					34.3	256.9							
											34.7	238.0					41.6	229.5							
										40.7	210.7					43.4	222.7								

Anexo B: Registros de frecuencia y velocidad de fase, curvas de dispersión *Down Hole* y *SDMT*

CURVAS DE DISPERSIÓN DOWN HOLE SITIO DE ESTUDIO I - SECTOR CALASANZ					
Vf Down Hole		36% < Vf Down Hole		36% > Vf Down Hole	
f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)
7.5	401.0	4.8	256.6	10.3	545.3
9.6	388.3	6.2	248.5	13.1	528.0
12.5	363.0	8.0	232.4	16.9	493.7
15.4	325.7	9.8	208.5	20.9	443.0
18.1	290.9	11.6	186.2	24.6	395.6
21.6	261.8	13.8	167.5	29.4	356.0
25.2	247.0	16.1	158.1	34.3	335.9
31.1	236.7	19.9	151.5	42.3	321.9
37.1	232.7	23.8	148.9	50.5	316.5
42.3	231.2	27.0	148.0	57.5	314.4
47.8	230.3	30.6	147.4	65.0	313.3
51.9	230.0	33.2	147.2	70.6	312.8
56.1	229.8	35.9	147.1	76.3	312.5
70.0	229.8	70.0	147.1	95.2	312.5

CURVAS DE DISPERSIÓN SDMT SITIO DE ESTUDIO II - ALTO DE LAS PALMAS					
Vf Down Hole		36% < Vf Down Hole		36% > Vf Down Hole	
f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)
5.3	443.3	3.4	283.7	7.2	603.0
6.8	378.4	4.4	242.2	9.3	514.6
8.9	299.4	5.7	191.6	12.1	407.2
9.7	280.2	6.2	179.3	13.2	381.0
11.1	236.9	7.1	151.6	15.1	322.3
12.7	174.2	8.2	111.5	17.3	236.9
14.2	146.6	9.1	93.8	19.4	199.3
17.6	126.9	11.2	81.2	23.9	172.5
20.7	121.2	13.2	77.6	28.1	164.8
24.3	118.5	15.6	75.8	33.1	161.2
28.9	117.1	18.5	75.0	39.2	159.3
34.2	116.5	21.9	74.6	46.5	158.5
40.0	116.3	25.6	74.4	54.4	158.2
45.7	116.2	29.3	74.4	62.2	158.0
51.6	116.2	33.0	74.3	70.2	158.0
70.0	116.2	70.0	74.3	70.0	158.0

Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales.

CURVAS DE DISPERSIÓN DOWN HOLE SITIO DE ESTUDIO III - LA MACARENA RIONEGRO					
Vf SDMT		36% < Vf SDMT		36% > Vf SDMT	
f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)	f(Hz)	VR(m/s)
4.8	190.8	4.8	122.1	4.8	259.4
7.0	184.5	7.0	118.1	7.0	250.9
9.5	187.4	9.5	119.9	9.5	254.8
13.0	193.9	13.0	124.1	13.0	263.7
16.8	197.3	16.8	126.2	16.8	268.3
20.4	191.0	20.4	122.2	20.4	259.8
25.0	177.3	25.0	113.5	25.0	241.2
30.7	166.5	30.7	106.5	30.7	226.4
35.3	161.6	35.3	103.4	35.3	219.8
41.2	157.8	41.2	101.0	41.2	214.6
45.4	156.0	45.4	99.9	45.4	212.2
51.2	154.4	51.2	98.8	51.2	209.9
56.7	153.3	56.7	98.1	56.7	208.5

Referencias

- Alfaro, A. (2007). Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte para las arcillas de Bogotá.
- AMVA. (2006). Microzonificación Sísmica Detallada de Los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Informe Final. *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*, 745.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 530–827 (2010).
- Asten, M. W., & Boore, D. (2006). Comparison of Shear-Velocity Profiles of Unconsolidated Sediments Near the Coyote Borehole (CCOC) Measured with Fourteen Invasive and Non-invasive Methods Editorial. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(2), 85–85. <http://doi.org/10.2113/JEEG10.2.85>
- ASTM. (2008). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM Standard Test Method, D1586-08a*, 1–9. <http://doi.org/10.1520/D1586-11.2>
- Bullen, K., & Bolt, B. (1985). An introduction to the theory of seismology.
- Comina, C., Foti, S., Boiero, D., & Socco, L. V. (2011). Reliability of Evaluation from Surface-Wave Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(6), 579–586. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000452](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000452)
- Dal Moro, G. (2014). User Manual winMASW. *Sleep (Rochester)*.
- Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E., & Finetti, I. (2003). Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments. En *2003 SEG Annual Meeting*.
- Dal Moro, G., Pipan, M., & Gabrielli, P. (2007). Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and Marginal Posterior Probability Density estimation. *Journal of Applied Geophysics*, 61, 39–55. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.04.002>
- Dearman, R. (1991). Engineering Geological Mapping. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltda.

- Foti, S. (2002). *Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves* *Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica*. Politecnico di Torino.
- Foti, S., & Cesare, C. (2009). Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site analyses. *Engineering, Soil Dynamicsearthquake*, (JUNE). <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.11.004>
- González, H. (2002). Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia: Neis de La Iguañá Cordillera Central, Departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas.
- Gucunski, N., & Woods, R. (1991). Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test. En *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. St. Louis, Missouri: University of Missouri.
- Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S., & Banno, T. (1974). Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils. *Soils and Foundation*, 1–12.
- Imai, T. (1970). P- and S-Wave Velocities in Subsurface Layers of Ground in Japan. *Chief of Earthquake Engineering Division, Urawa Research Institute*, 2384–2384.
- INGEOMINAS. (2012). *INFORME DE GESTIÓN INSTITUCIONAL 2005* (Vol. XXXIII). Recuperado a partir de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161>
- Lai, C. G., Foti, S., & Rix, G. J. (2005). Propagation of Data Uncertainty in Surface Wave Inversion. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(2), 219–228. <http://doi.org/10.2113/JEEG10.2.219>
- Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Xu, Y., & Liu, Q. (2009). Research on the middle-of-receiver-spread assumption of the MASW method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 71–79. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.01.009>
- Luo, Y., Xia, J., Miller, R., Xu, Y., Liu, J., & Liu, Q. (2008). Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear radon transform. *Pure and Applied Geophysics*, 165(5), 903–922. <http://doi.org/10.1007/s00024-008-0338-4>
- Marchetti, S., Marchetti, D., & Villalobos, F. (2013). El Dilatómetro Sísmico SDMT para ensayos de suelos in situ. *Obras y Proyectos*, 13, 20–29.
- Marosi, K. T., & Hiltunen, D. R. (2004). Characterization of SASW Phase Angle and Phase Velocity Measurement Uncertainty. *Geotechnical Testing Journal*, 27(2), 1–9.
- Mayne, P., Coop, M., Springman, S., Huang, A., & Zornberg, J. (2009). Geomaterial Behaviour and Testing. En *Proceedings of the 17th ICSMGE* (Vol. 4, pp. 2777–2872).

- McMechan, G., & Yedlin, M. (1981). Analysis of dispersive waves by wave-field transformation. *Geophysics*, 46(6), 869–874.
- Menke, W. (1989). Geophysical data analysis: discrete inverse theory. *International Geophysics Series*, 289.
- Mohamed, A. M. E., Abu El Ata, A. S. A., Abdel Azim, F., & Taha, M. A. (2013). Site-specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multi-channel analysis of surface waves. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(1), 88–101. <http://doi.org/10.1016/j.nrjag.2013.06.012>
- Moss, R. (2008). Quantifying measurement uncertainty of thirty-meter shear-wave velocity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 1399–1411.
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., & Hudson, W. R. (1983). USE OF SPECTRAL ANALYSIS OF SURFACE WAVES METHOD FOR DETERMINATION OF MODULI AND THICKNESSES OF PAVEMENT SYSTEMS. En M. McLaughlin (Ed.), *Pavement design, performance, and rehabilitation* (pp. 38–45).
- Ohba, S., & Toriumi, I. (1970). Dynamic response characteristics of Osaka Plain.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristics Soil Indexes Earthquake, 167 – 187.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1996). Multi-channel analysis of surface waves using Vibroseis (MASWV). *SEG Expanded Abstracts*, 68–71. <http://doi.org/10.1190/1.1826742>
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998a). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Expanded Abstracts*.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998b). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Expanded Abstracts*, 17(1), 1377–1380. <http://doi.org/10.1190/1.1820161>
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999a). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800. <http://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999b). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <http://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1971). Vibrations of Soils and Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 414.
- Robertson, P. (2012). Interpretation of In-situ Tests - Some Insights. *Proceedings of the Fourth International Conference on Site Characterization*, 1–22.

- Rodríguez, G., & González, H. (2005). Geología de la plancha 147 Medellín oriental. Medellín, Antioquia: Ingeominas.
- Rosenblad, B. L., Li, J., Menq, F. Y., & Stokoe, K. H. (2007). Deep shear wave velocity profiles from surface wave measurements in the Mississippi embayment. *Earthquake Spectra*, 23(4), 791–808. <http://doi.org/Doi.10.1193/1.2790489>
- Sánchez, S. (1987). *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*. Texas, Austin: University of Texas.
- Sarria, A. (1995). *Ingeniería Sísmica* (Ediciones). Ecoe Ediciones.
- Shapiro, N., & Campillo, M. (1996). Etude de l'interaction des ondes sismiques guidées régionales avec les hétérogénéités de la croûte = Study of the interaction of regional seismic guided waves with the crustal heterogeneities. Recuperado a partir de <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=177109>
- Socco, L. V., & Boiero, D. (2008). Improved Monte Carlo inversion of surface wave data. *Geophysical Prospecting*, 56, 357–371. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00678.x>
- Stokoe, K., Wright, S., Bay, J., & Roesset, J. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysics*, 15–25.
- Uma, M., Boominathan, A., & Dodagoudar, G. (2008). Development of Empirical Correlation Between Shear Wave Velocity and Standard Penetration Resistance in Soils of Chennai City. En *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Vardoulakis, I., & Vrettos, C. (1988). Dispersion law of Rayleigh-type waves in a compressible Gibson half space. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 639–655.
- Wroth, C., Randolph, M., Houlsby, G., & Fahey, M. (1979). Engineering Properties of Soils with Particular Reference to the Shear Modulus. En D. of E. University of Cambridge (Ed.), .
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave. *Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems*, 99(1885), 95–104. Recuperado a partir de <http://www.kgs.ku.edu/Geophysics2/Pubs/Pubs/XIA-99-01.pdf>
- Xia, J., Miller, R., & Park, C. (1999). Estimation of near surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3), 691–700.

- <http://doi.org/10.1190/1.1444578>
- Xia, J., Miller, R., Park, C., Hunterb, J., Harrisc, J., & Ivanov, J. (2012). Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (xx), 4–7. <http://doi.org/10.1016/j.anpedi.2012.06.005>
- Xia, J., Xu, Y., & Miller, R. (2007). Generating an image of dispersive energy by frequency decomposition and slant stacking. *Pure and Applied Geophysics*, 164(5), 941–956. <http://doi.org/10.1007/s00024-007-0204-9>
- Yilmaz, Ö. (1987). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Anatolian Geophysical*. ISTANBUL 34993, TURKEY.