

	Nombre del proyecto: CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ	RO5-2-DOS-0300-01
		Fecha: Julio 08 de 2014
	Nombre Cliente UNIVERSIDAD SANTO TOMAS	Revisión: 0

PROYECTO

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

ENSAYO DE DISPERSIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES

INFORME DE RESULTADOS

Revisión 0

Julio 08 de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Fundamentos teóricos.....	3
2.1. Identificación de ondas Superficiales	3
2.1.1. Modelo de velocidad de onda de corte	5
3. Método de campo	6
3.1. Materiales	6
3.2. Procedimiento.....	7
4. Resultados y Análisis	7
4.1. Localización.....	7
4.2. Parámetros Geotécnicos.....	8
4.3. Resultados de la prospección geofísica.....	8
4.1. Clasificación del perfil de suelo según la NSR-2010	10
5. Conclusiones	11
6. Referencias.....	12
ANEXO I. REGISTRO FOTOGRÁFICO	13
ANEXO II. RESULTADO DEL ENSAYO DE DISPERSIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES	15

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos geofísicos, líneas sísmicas o ReMi (*Refraction Microtremor*, por sus siglas en inglés) proveen un método no invasivo de caracterización de geomateriales. Por ser un método no invasivo proveen una herramienta valiosa en términos de tiempo y costo para obtener información de alta calidad relacionada con la velocidad de propagación de ondas en el subsuelo. Particularmente el conocimiento de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) en el subsuelo es un parámetro fundamental para poder determinar el comportamiento y respuesta de los geomateriales ante cargas dinámicas como sismos. Por lo tanto el objetivo principal de las líneas sísmicas es obtener un perfil bidimensional, por cada línea realizada, de la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad. Para la obtención de los perfiles de velocidad de onda de corte se debe cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una (1) línea de 24 geófonos.
- Tomar registros de las ondas producidas por fuentes controladas (mediciones activas) y fuentes no controladas (mediciones pasivas)
- Aplicar diferentes transformadas (F-K ó SPAC) a los registros obtenidos para construir curvas de dispersión de ondas superficiales.
- Elaborar un modelo con la estructura de la velocidad de onda de corte (V_s) a partir del proceso de inversión de las curvas de dispersión de las ondas superficiales.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Identificación de ondas Superficiales

Perturbaciones producidas en la superficie del suelo generan diferentes tipos de ondas mecánicas. Si el pulso generado es un pulso donde se producen principalmente ondas de compresión. Las ondas superficiales son modos naturales de vibración del terreno por lo que más del 67% de la energía total imprimida al sistema se transfiere en la generación de ondas superficiales tipo Raleigh (Park, Miller, & Xia, 1999), es decir las ondas superficiales son dominantes en la respuesta del terreno ante un evento de propagación de ondas. El objetivo principal de la construcción de un arreglo con múltiples geófonos consiste en aprovechar esta energía producida por impactos y movimientos en superficie para producir y registrar las ondas superficiales., por lo que La velocidad de propagación depende principalmente y es muy similar a la velocidad de las ondas de corte V_s .

Una característica fundamental de las ondas superficiales tipo Raleigh es que tiene amplitud decreciente con la profundidad. Ondas de diferente longitud de onda por lo tanto se transmiten a través de diferentes espesores en profundidad. Si la velocidad de V_s varía con la profundidad ondas de diferente longitud de onda viajan a diferentes velocidades. Esto implica que son ondas dispersivas. La dispersividad de las ondas implica que para cada frecuencia existe una

velocidad conocida como velocidad de fase. Esta propiedad de dispersividad de las ondas superficiales permite calcular la velocidad de onda de corte mediante la identificación del modo fundamental de las ondas superficiales.

Como se mencionó anteriormente, durante un impacto se generan diferentes tipos ondas, las cuales son registradas por geófonos dispuestos en un arreglo lineal y mostradas como un registro sísmico (Ver Figura 1).

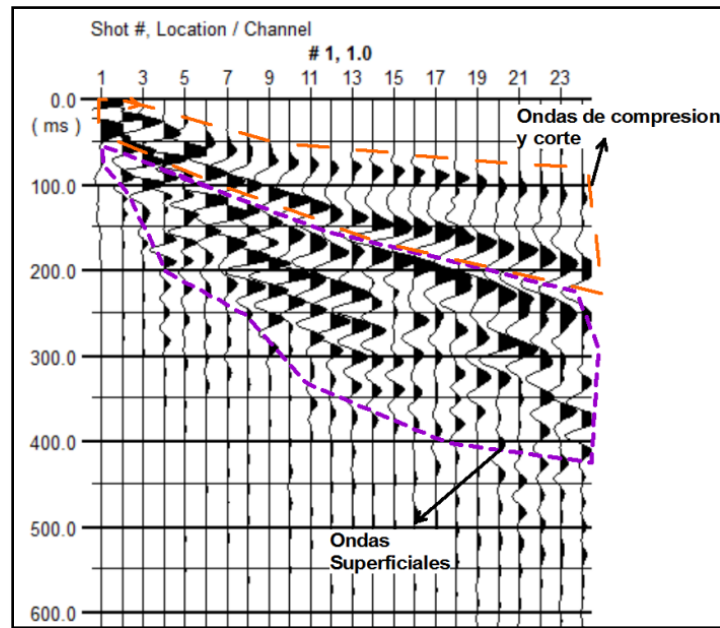


Figura 1. Diferentes tipos de ondas producidas por un impacto en superficie.

Con el fin de identificar las ondas superficiales de otros tipos de ondas, se han desarrollado varias transformadas matemáticas entre las que se encuentran: F-K, SPAC, ESPAC y Tau-P entre otras. El objetivo principal de estas transformadas es analizar un registro de señales que se encuentra en el dominio del tiempo y transformarlo en otro dominio (Ejemplo: frecuencia) para identificar la energía de ondas de diferentes velocidades y longitudes de onda o frecuencia poder separar identificar las velocidades de los diferentes componente de interés. En particular en el caso de las ondas superficiales estas transformadas permiten identificar la curva de dispersión que luego se utiliza para identificar la estructura de velocidad de ondas de corte mediante un proceso de inversión.

El programa Surface Plus® de GEOGIGA Technology CORP., permite calcular las transformadas F-K, SPAC y ESPAC. La transformada F-K es una transformada de Fourier en el dominio del tiempo y del espacio. La transformada SPAC y ESPAC son transformadas en el tiempo y en el espacio pero a diferencia de la transformada F-K estos métodos tienen en cuenta la energía de la ondas superficiales que está distribuida aleatoriamente. El resultado de todos estos métodos es la construcción de un espectro de energía en el dominio de la

Frecuencia vs. Velocidad de fase (ver Figura 2). Las zonas de mayor concentración de energía (zonas Rojas) son las zonas donde las ondas superficiales poseen más intensidad.

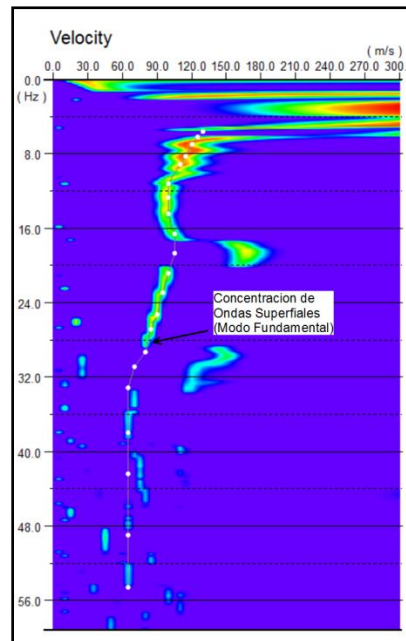


Figura 2. Espectro de energía, donde se muestran las concentraciones de las ondas superficiales.

Si bien las ondas superficiales se pueden presentar en diferentes modos distintos al fundamental, la estructura de la velocidad de onda de corte depende principalmente del modo fundamental. No obstante en perfiles muy heterogéneos con cambios abruptos en la velocidad de onda de corte, las ondas superficiales se pueden manifestar en modos superiores. En estos casos el software utilizado ya cuenta actualmente con modelos que permitan diferenciar adecuadamente modos diferentes al modo fundamental y tenerlos en cuenta en los procedimientos de inversión.

2.1.1. Modelo de velocidad de onda de corte

Para modelar la velocidad de onda de corte en profundidad a partir de las ondas superficiales se debe identificar en el espectro de energía la curva de dispersión de las ondas superficiales en su modo fundamental. (Puntos blancos de la Figura 2). A partir de esta curva, se construye un modelo inicial de la variación de la estructura de la velocidad de onda de corte en profundidad (línea azul continua en la Figura 3a). Debido a que el modelo inicial (puntos azules Figura 3b) no reproduce adecuadamente la curva de dispersión de las ondas superficiales (puntos rojos Figura 3b), se utiliza el programa *Surface Plus*, el cual incorpora un algoritmo iterativo, basado en el principio de genética y evolución para encontrar la solución óptima que sea capaz de reproducir la curva de dispersión original con un margen de error bajo (usualmente inferior al 1%). (Ver Figura 3c). El modelo final (línea roja Figura 3a) representa la estructura de la velocidad de onda de corte en profundidad.

Si bien diferentes modelos iniciales pueden producir diferentes modelos finales, los valores de velocidad de onda de corte se encuentran en un rango aproximado de $\pm 15\%$ del valor real de la velocidad de onda de corte (Park, Miller, & Xia, 1999). No obstante la no unicidad de la solución dada por el proceso de inversión es una limitación inherente de los análisis de ondas superficiales. Por esta razón se debe tener cuidado al utilizar esta técnica para definir contactos entre materiales, dado que los errores pueden ser considerables.

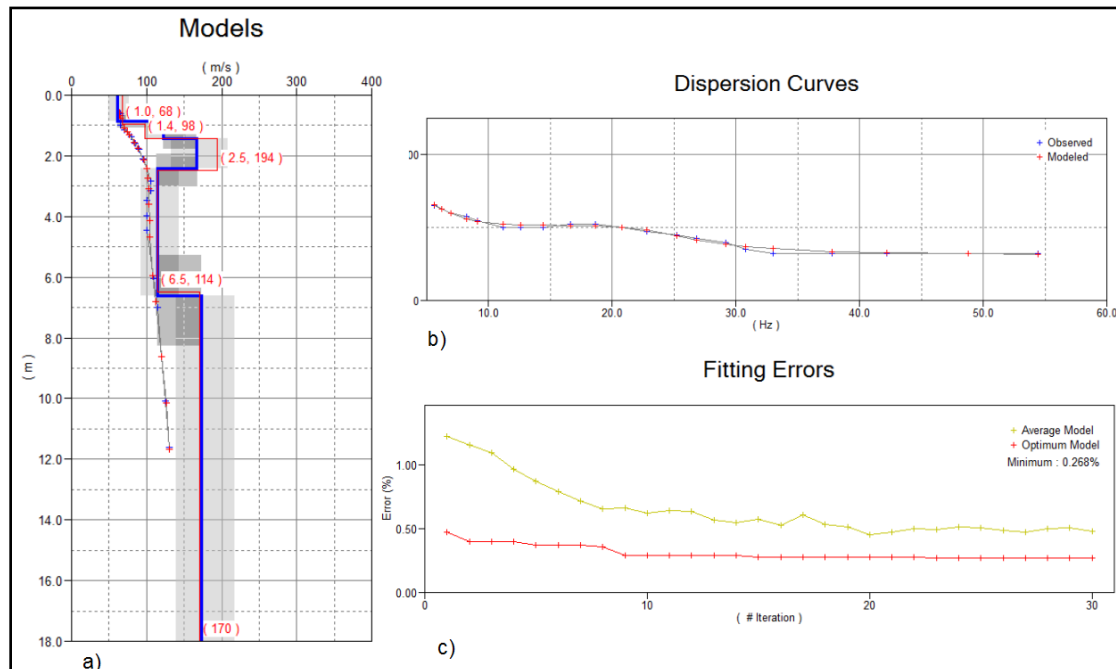


Figura 3. a) Modelo de la estructura de la velocidad de onda de corte (V_s), b) curva de dispersión. Los puntos azules corresponden a la curva obtenida del espectro de energía y los puntos rojos corresponden a la curva calculada a partir de la estructura de V_s . c) Error calculado durante el proceso de modelación.

3. MÉTODO DE CAMPO

Para poder obtener la estructura de la velocidad de onda de corte en profundidad a partir de los métodos descritos en el capítulo anterior se debe seguir un procedimiento determinado en campo.

3.1. Materiales

ÍTEM	CANTIDAD
Geófonos (4.5 Hz)	24
Cables	2
Sismógrafo	1
Computador	1
Batería (12 V)	1
Martillo (20 kg)	1

3.2. Procedimiento

Los 24 geófonos se extienden en una línea recta a una distancia determinada. Posteriormente se conectan los cables a los geófonos, la batería al sismógrafo y el computador al sismógrafo. Se realizan mediciones con impactos controlados en diferentes puntos de la línea, luego si las condiciones lo permiten, se toman registros de fuentes no controladas (carros, máquinas etc.) que puedan generar ondas superficiales. El montaje completo antes de la toma datos se muestra en la Figura 4.

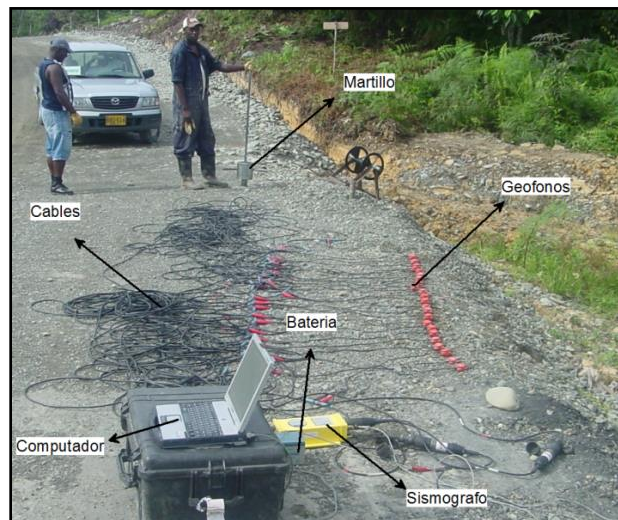


Figura 4. Montaje típico de una línea sísmica.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Localización

La ubicación de la ejecución de la exploración geofísica se realizó en campo mediante GPS, cuya especificación del fabricante es *Garmin etrex-vista*. Dichas coordenadas están sujetas al sistema de coordenadas MAGNA–SIRGAS de los orígenes de las zonas de proyección *Gauss-Krüger* en Colombia. El valor de las coordenadas del primer y último geófono (primer geófono L#G01, último geófono L#G24) se presenta en la Tabla 1. En la Figura 7 se muestra esquemáticamente la localización de la línea realizada, basándose en una imagen de Google Earth. Los resultados de la tomografía se presentan en función de la profundidad.

Tabla 1. Coordenadas de las líneas geofísicas.

LÍNEA \ GEÓFONO	COORDENADAS		Espaciamiento (m)	Long. Total (m)
	G01 ESTE/NORTE	G24 ESTE/NORTE		
LS-01	990951/1020312	991003/1020388	4	92

4.2. Parámetros Geotécnicos

Con base en los valores de velocidad de onda de corte se calcularon diferentes propiedades de las diferentes capas como lo son el peso unitario (γ), y los módulos elásticos de rigidez (E_o , G_o).

La densidad de los materiales (γ) se calculó con base en la correlación propuesta por Mayne & Campanella (2005) donde se relaciona la velocidad de onda de corte (V_s) y la profundidad a la que se encuentra el material (Z) para obtener dicho parámetro. La correlación usada se presenta en la Ecuación 1.

$$\gamma_{sat} = 8.32 \cdot \log(V_s) - 1.61 \cdot \log(Z) \quad \text{Ecuación 1}$$

Debido a que las vibraciones inducidas en los ensayos de mediciones sísmicas producen deformaciones en los suelos del orden de $1 \times 10^{-3} \%$ el comportamiento mecánico de éstos se encuentran dentro del rango elástico (Kramer, 1996). Por esta razón se pueden emplear ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad para calcular parámetros de rigidez de los suelos (Szczepański, 2008). La ecuación para calcular el módulo máximo de rigidez al corte es:

$$G_o = \rho \cdot V_s^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde la densidad es ρ y el módulo de corte a bajas deformaciones es G_o .

A partir G_o es posible calcular el módulo de elasticidad a bajas deformaciones empleando de la ecuación 3.

$$E_o = 2G_o(1 + \nu) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde E_o es el módulo de elasticidad a bajas deformaciones, G_o es el módulo de corte máximo y ν es la relación de Poisson.

A partir de los valores de V_s obtenidos en el ensayo, es posible calcular los valores de V_p a partir de la relación de Poisson empleando la ecuación 4.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para este caso se supuso una relación de Poisson constante de 0.35 en todas las capas.

4.3. Resultados de la prospección geofísica

De las mediciones geofísicas se realizaron los análisis de dispersión de ondas superficiales de los cuales se presentan los resultados en términos de perfiles unidimensionales y bidimensionales de V_s .

En el ANEXO I se presentan las fotografías del lugar donde se ejecutó la línea y en el ANEXO II se presentan los perfiles bidimensionales de V_s y los valores parciales de V_s a lo largo de la

línea realizada para el proyecto CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ.

Cabe aclarar que la tomografía de colores es una representación espacial de los modelos interpretados de Vs a lo largo de toda la línea; en ésta se interpolan los valores de Vs presentados en las secciones de la línea. Los valores de la tomografía no coinciden exactamente con los modelos presentados dado que ella presenta una interpolación continua del valor de Vs en profundidad y a lo largo de la línea, mientras que los perfiles se presenta una transición discreta y puntual de los valores de velocidad.

La tomografía sirve para visualizar gráficamente los contrastes de rigidez y determinar aproximadamente la estratigrafía a lo largo de la línea. Los valores presentados en los perfiles corresponden a la interpretación directa hecha a partir de las mediciones, por lo tanto estos últimos deberían ser usados puntualmente para determinar los parámetros de diseño y demás análisis correspondientes.

Figura 5. Localización Línea



4.1. Clasificación del perfil de suelo según la NSR-2010

El Capítulo A.2.4.3 de la Norma Sismo Resistente del año 2010 define un procedimiento, basado en el promedio ponderado de los primeros 30 metros de diferentes propiedades geotécnicas, para clasificar el lugar geográfico del proyecto en una de seis categorías posibles. De acuerdo con la NSR-2010 el suelo puede clasificarse como tipo: A, B, C, D o E (ver Tabla 2). Siendo los suelos tipo A más competentes que los suelos tipo E. Detalles e información adicional se puede consultar en el Título A, capítulo A.2.4.3 de la Norma.

De acuerdo con el modelo de la velocidad de onda de corte determinado (Anexo II), el promedio de la velocidad de onda de corte de los primeros 30 m (V_{s30}) se calculó extrapolando el valor de V_s obtenido a la mayor profundidad, para la línea, hasta los 30 m de profundidad. Dicho valor se presenta en la Tabla 3; de acuerdo con este valor el perfil de suelos de la línea es presentado de igual manera.

Tabla 2 Criterios de clasificación

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios.	$N \geq 50$, o $S_u \geq 100$ kPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 50$, o 100 kPa $> S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s $> V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3, de arcillas blandas.	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa $> S_u$

Tabla 3 Clasificación según la NSR-10 para cada línea

LÍNEA	V_{s30} (m/s)	Tipo de suelo NSR-10
LS-01	155	E

5. CONCLUSIONES

Como complemento a la exploración geotécnica del proyecto CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ, se realizaron una (1) ensayos de medición geofísica. Mediante estos ensayos se construyeron varios modelos con la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad. Del análisis de estos perfiles se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- Se calcularon los perfiles unidimensionales para la línea realizada, en los cuales se observan las variaciones de rigidez de las diferentes capas.
- Los materiales modelados reflejan velocidades de onda de corte cuyos valores medios son menores a 180 m/s, indicando un perfil de suelo de consistencia blanda, aumentando progresivamente en profundidad alcanzando valores de 290 m/seg, velocidades de corte correspondientes a suelos de mayor consistencia.
- La clasificación del perfil de suelo según la NSR-10 se calculó extrapolando la información existente en la profundidad máxima de interpretación hasta 30 m. De acuerdo con el valor obtenido el perfil de suelo clasifica como Tipo E.

A partir de los perfiles de velocidad definidos se pueden estimar parámetros de rigidez de los suelos a bajas deformaciones y el módulo de corte, así como correlacionar los valores de velocidad de onda de corte con otros parámetros geotécnicos y los posibles materiales que pueden existir en el subsuelo, planteando una caracterización general del perfil de suelos definido bajo la exploración geofísica, la cual debe ser precisada con información más puntual (p. ej. ensayos de laboratorio) y evaluada en conjunto por el geotecnista del proyecto.

Bogotá D.C, Julio 08 de 2014



Jorge Alberto Rodríguez O. IC, MSCE, PhD
Mat. 25202-26120 CND

6. REFERENCIAS

- *Basic Definitions*. (2002). Recuperado el 2010, de Excess Geophysics: <http://www.xsgeo.com/course/basic.htm#contents>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sísmo Resistente NSR-10*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Crice, D. (2002). Borehole Shear-Wave Surveys for Engineering Site Investigations. GEOSTUFF.
- GEOGIGA. (2010). *Geogiga surface and surface Plus 6.0 User Guide*. GEOGIGA Technology corp.
- Gonzales de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Ivanov, J., Park, C., & Xia, J. (2011). MASW Short Course. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems* (págs. 1-30). Charleston: Kansas Geological Survey.
- Kim, D. S., Bang, E. S., & Kim, W. C. (2004). Evaluation of various Downhole Data Reduction Methods for Obtaining Reliable Vs Profiles. *Geotechnical Testing Journal*, 1-13.
- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., & Ivanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Leading Edge*, 1392-1396.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 800-808.
- Rix, G. J. (2005). Near-Surface Site Characterization Using Surface Waves. En C. G. Lai, & K. Wilmanski, *Surface waves in Geomechanics: Direct and inverse modelling for soils and rocks* (págs. 1-46). Springer.
- Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., & Zettler, T. E. (2002). *Geotechnical Engineering Circular No5 (Evaluation of Soil and Rock Properties)*. Washington: Federal Highway Administration.
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 691-700.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Hunter, J. A., Harris, J. B., & Ivanov, J. (2002). Comparing shear-wave Velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181-190.

ANEXO I. REGISTRO FOTOGRÁFICO

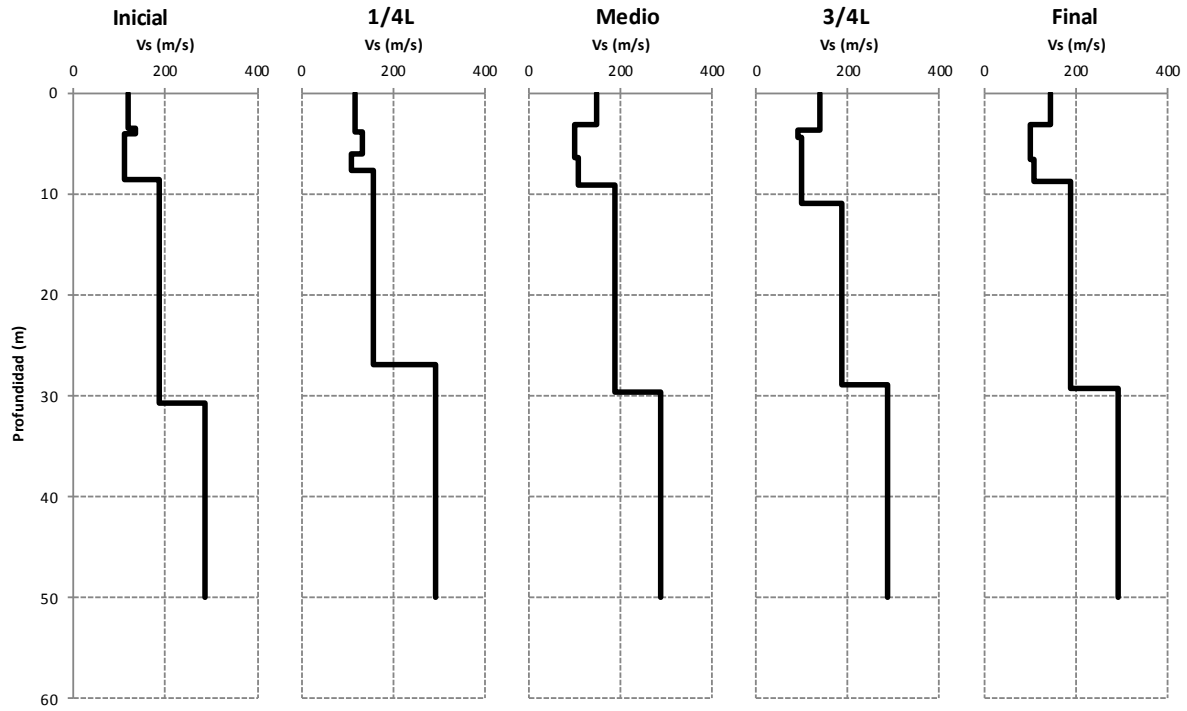


Fotografía 1. Fotografías de la zona de la Línea 01

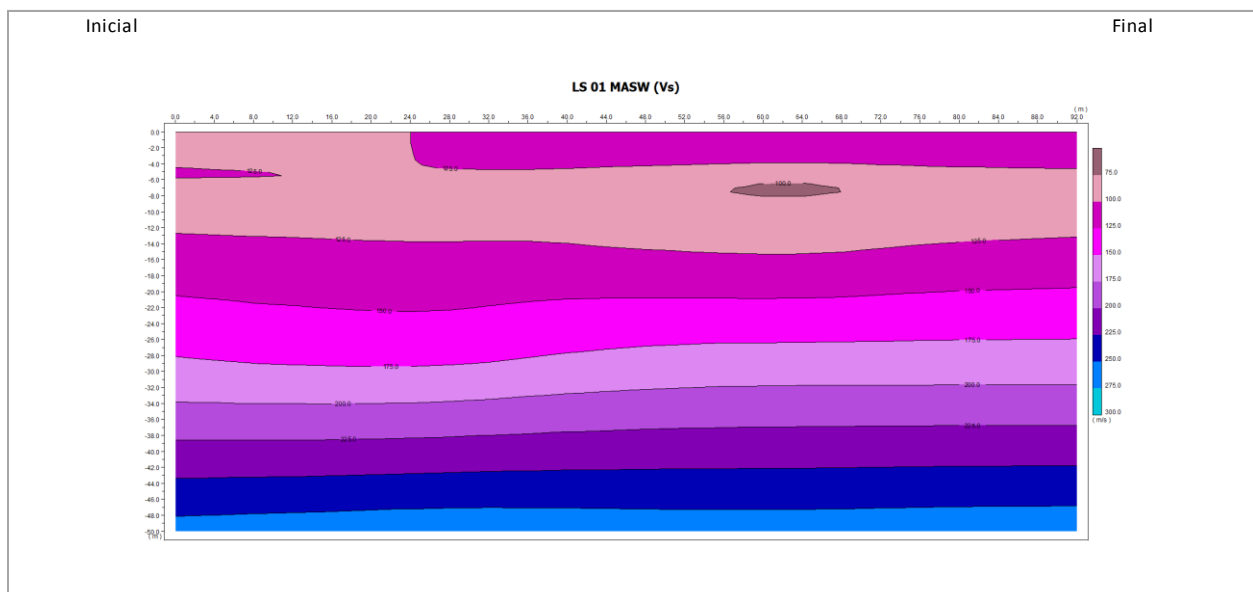
**ANEXO II. RESULTADO DEL ENSAYO DE DISPERSIÓN DE ONDAS
SUPERFICIALES**

LÍNEA 01

PERFILES UNIDIMENSIONALES DE V_s



PERFIL BIDIMENSIONAL DE V_s



Vs LS 01

Inicial	
Prof. (m)	Vs (m/s)
0.0	118
3.5	118
3.5	133
4.1	133
4.1	112
8.6	112
8.6	185
30.8	185
30.8	284
50.0	284

1/4L	
Prof. (m)	Vs (m/s)
0.0	117
3.9	117
3.9	131
6.1	131
6.1	109
7.8	109
7.8	155
27.0	155
27.0	293
50.0	293

Medio	
Prof. (m)	Vs (m/s)
0.0	150
3.2	150
3.2	101
6.5	101
6.5	110
9.1	110
9.1	187
29.7	187
29.7	290
50.0	290

3/4L	
Prof. (m)	Vs (m/s)
0.0	141
3.7	141
3.7	94
4.4	94
4.4	99
10.9	99
10.9	187
29.0	187
29.0	287
50.0	287

Final	
Prof. (m)	Vs (m/s)
0.0	145
3.2	145
3.2	99
6.6	99
6.6	109
8.8	109
8.8	188
29.2	188
29.2	291
50.0	291

TABLA DE RESULTADOS 1

Inicial				1/4L			
Profundidad	Vs	Go	Eo	Profundidad	Vs	Go	Eo
m	m/s	MPa	MPa	m	m/s	MPa	MPa
0.0	118.0	23.9	64.6	0.0	117.0	23.4	63.1
3.5	118.0	23.9	64.6	3.9	117.0	23.4	63.1
3.5	133.0	30.2	81.5	3.9	131.0	28.9	77.9
4.1	133.0	30.2	81.5	6.1	131.0	28.9	77.9
4.1	112.0	20.1	54.4	6.1	109.0	18.9	51.0
8.6	112.0	20.1	54.4	7.8	109.0	18.9	51.0
8.6	185.0	58.5	158.0	7.8	155.0	39.7	107.3
30.8	185.0	58.5	158.0	27.0	155.0	39.7	107.3
30.8	284.0	146.6	395.7	27.0	293.0	157.3	424.7
50.0	284.0	146.6	395.7	50.0	293.0	157.3	424.7

Medio				3/4L			
Profundidad	Vs	Go	Eo	Profundidad	Vs	Go	Eo
m	m/s	MPa	MPa	m	m/s	MPa	MPa
0.0	150.0	40.8	110.1	0.0	141.0	35.4	95.5
3.2	150.0	40.8	110.1	3.7	141.0	35.4	95.5
3.2	101.0	16.2	43.7	3.7	94.0	13.9	37.6
6.5	101.0	16.2	43.7	4.4	94.0	13.9	37.6
6.5	110.0	19.2	51.8	4.4	99.0	15.2	41.0
9.1	110.0	19.2	51.8	10.9	99.0	15.2	41.0
9.1	187.0	60.0	162.0	10.9	187.0	59.9	161.8
29.7	187.0	60.0	162.0	29.0	187.0	59.9	161.8
29.7	290.0	153.5	414.6	29.0	287.0	150.1	405.3
50.0	290.0	153.5	414.6	50.0	287.0	150.1	405.3

Final			
Profundidad	Vs	Go	Eo
m	m/s	MPa	MPa
0.0	145.0	37.9	102.2
3.2	145.0	37.9	102.2
3.2	99.0	15.5	41.8
6.6	99.0	15.5	41.8
6.6	109.0	18.8	50.8
8.8	109.0	18.8	50.8
8.8	188.0	60.7	164.0
29.2	188.0	60.7	164.0
29.2	291.0	154.7	417.8
50.0	291.0	154.7	417.8