

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO



**ENSAYOS GEOFÍSICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE SUELOS EN  
ESTRUCTURAS PATRIMONIALES**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil que presenta  
**SAULO YOEL LÓPEZ MONTALBÁN**

Dirigido por  
**GUILLERMO ZAVALA ROSELL**

San Miguel, 2016

*...A mis padres, a mi hermana y hermanos.*

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer al CONCYTEC por haber financiado mi beca de estudio de la maestría por dos años y a la Pontificia Universidad Católica del Perú por brindarme la oportunidad de formar parte de esta casa de estudios. Me gustaría agradecer también a mi asesor de investigación M.Sc. Guillermo Zavala, por su orientación y valioso tiempo dedicado a la supervisión de la presente tesis, por su amistad y disponibilidad de compartir su conocimiento.

Agradezco al Dr. Rafael Aguilar por aceptarme formar parte de su grupo de investigación, por sus enseñanzas y consejos impartidos durante sus clases y en el laboratorio del grupo de trabajo.

Agradezco al Dr. Miguel A. Pando por su continuo soporte y valiosos aportes de su experiencia y conocimiento durante el desarrollo de la presente investigación.

Agradezco también el apoyo recibido de profesionales fuera de la PUCP como al Dr. Glenn Rix, Dr. Brady R. Cox, Dr. Gregory L. Hebler y M.Sc Félix Alvarado por su compartir información y experiencia referente a los ensayos geofísicos.

Agradezco a todos mis compañeros de trabajo del grupo de investigación Engineering and Heritage-PUCP, en especial a Cristhian, Carolina, César, Eduardo, Mijaíl y Saúl por su sincera amistad y apoyo incondicional durante este tiempo que compartimos juntos.

Agradezco al personal del complejo de Huaca de la Luna, las Iglesias de Andahuaylillas y Huaro por su amistad, su apoyo y su espíritu de colaboración durante la ejecución de los ensayos de campo.

Agradezco a mis profesores de la Universidad de Piura, Dr.Danny Yong, M.Sc. Arturo Martínez y Mg. Carlos Yábar por su amistad, confianza y sus consejos brindados durante mi vida académica y profesional.

Finalmente un agradecimiento especial a mis amigos y a los miembros de mi familia por estar siempre presentes apoyándome en este nuevo reto que ahora se ve concretado. A mi mamá y a mi papá por la formación y educación que me brindaron, y por el gran esfuerzo que hicieron al buscar siempre darme una educación de buena calidad y espero que siempre sigan creyendo en mí.

# Resumen

En la investigación de suelos en estructuras patrimoniales se necesita emplear técnicas no destructivas que permitan investigar el suelo y determinar sus propiedades sin causar daños a la estructura del monumento ni alterar el suelo que se investiga. Aquí los métodos geofísicos se presentan como una alternativa de solución debido a que cumplen con los requisitos necesarios para investigar el suelo y en gran mayoría son métodos no destructivos.

La presente investigación se centra en comprender y aplicar los métodos geofísicos con fines geotécnicos en la exploración de tres estructuras patrimoniales de interés empleando los equipos disponibles en la Pontificia Universidad Católica (PUCP). Los métodos geofísicos que se emplearon son el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), refracción sísmica y cociente espectral (H/V). En el desarrollo de la tesis se presenta la teoría necesaria para entender los métodos empleados, entrando más a detalle en el método MASW por ser el más complejo de analizar. También se describe las características de los equipos empleados y la metodología que se ha seguido en los ensayos para la toma de la información, el procesamiento y la posterior discusión de los resultados.

El primer caso de estudio fue el Complejo Arqueológico de Huaca de la Luna localizado en la ciudad de Trujillo donde se realizaron principalmente ensayos de MASW y refracción sísmica. También se realizaron ensayos de SCPTu como una técnica de comparación de los resultados de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Adicionalmente se realizaron algunos ensayos geotécnicos tradicionales complementados con una breve revisión de la geología del lugar para comprobar la eficacia de los resultados y así tener una mejor estimación del perfil estratigráfico del sitio. Este primer estudio permitió confirmar que las técnicas empleadas y los equipos utilizados permitían brindar buenas aproximaciones de los parámetros del suelo. Los resultados geofísicos y el SCPTu brindaron resultados comparables de  $V_s$ , y permitieron estimar el perfil que sigue el estrato duro en el fondo que corresponde con la geología del lugar.

Los otros dos casos de estudio fueron la Iglesia San Juan Bautista de Huaró y la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, ambas ubicadas en la Ciudad de Cusco. Aquí se realizaron ensayos de MASW y H/V, y los resultados permitieron realizar una estimación del perfil del suelo en función de los resultados de  $V_s$  y la información geológica de la zona. Adicionalmente se estimó la frecuencia de vibración del modo fundamental del suelo en ambas zonas.

Los resultados obtenidos en los casos de estudio confirmaron la eficacia de los métodos geofísicos para la exploración de suelos cuando se necesita estimar el perfil estratigráfico del suelo o estimar parámetros como el  $V_s$ , que posteriormente se puede emplear para determinar la rigidez del suelo. Otro de los objetivos logrados fue comprobar la utilidad de emplear los equipos de la PUCP sin necesidad de recurrir a equipos convencionales que se emplean en la industria, esto gracias a que se logró un buen conocimiento de los ensayos.

# Índice General

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>I</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>II</b>
<b>Índice General.....</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>	<b>XI</b>
<b>Capítulo 1 - Generalidades .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.4. Metodología.....	3
1.5. Resultados .....	4
<b>Capítulo 2 - Marco Teórico .....</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción.....	6
2.2. Conceptos básicos de ondas .....	6
2.2.1. Ondas sísmicas y su propagación .....	6
2.2.2. Ondas de cuerpo .....	7
2.2.3. Ondas de compresión .....	8
2.2.4. Ondas de corte .....	8
2.2.5. Ondas superficiales.....	9
2.3. Comportamiento del suelo.....	11
2.4. Aplicación de las ondas sísmicas .....	12
2.5. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).....	13
2.5.1. Adquisición de datos .....	14
2.5.2. Procesamiento de las señales y extracción de las curvas de dispersión .....	18
2.5.3. Proceso de inversión.....	21
2.5.4. Aplicación del MASW para procesar los datos de Nazarian, et al., 2010.....	25
2.5.5. Procedimiento del ensayo MASW en los casos de estudio.....	30
2.6. Refracción sísmica .....	34
2.6.1. Procedimiento del ensayo de refracción sísmica en los casos de estudio .....	36
2.7. Cociente espectral H/V .....	36
2.7.1. Procedimiento del ensayo H/V en los casos de estudio .....	37
2.8. Aplicación de ensayos geofísicos en estructuras patrimoniales .....	39
<b>Capítulo 3 - Caso de estudio: complejo arqueológico Huaca de la Luna – Trujillo....</b>	<b>41</b>

3.1.	Introducción.....	42
3.2.	Geología y geomorfología general del lugar .....	44
3.3.	Geomorfología.....	45
3.4.	Geología .....	46
3.5.	Metodología de los ensayos geotécnicos.....	50
3.5.1.	Investigación del suelo con métodos geofísicos.....	50
3.5.2.	Investigación del suelo con métodos geotécnicos .....	54
3.6.	Interpretación y discusión de resultados .....	61
3.7.	Conclusiones .....	66
<b>Capítulo 4 - Caso de estudio Iglesia San Pedro en Andahuaylillas-Cusco.....</b>		<b>67</b>
4.1.	Introducción.....	68
4.2.	Geología del lugar .....	70
4.3.	Metodología del estudio .....	72
4.3.1.	Exploración con MASW .....	72
4.3.2.	Ensayo del cociente espectral (H/V) .....	74
4.4.	Interpretación de los resultados.....	76
4.5.	Conclusiones .....	78
<b>Capítulo 5 - Caso de estudio Iglesia San Juan Bautista en Huaro-Cusco .....</b>		<b>79</b>
5.1.	Introducción.....	80
5.2.	Geología del lugar .....	81
5.3.	Metodología del estudio .....	83
5.4.	Exploración con MASW .....	84
5.5.	Ensayo del cociente espectral (H/V) .....	86
5.6.	Interpretación de los resultados.....	87
5.7.	Conclusiones .....	89
<b>Capítulo 6 - Conclusiones .....</b>		<b>90</b>
<b>Referencias .....</b>		<b>93</b>
<b>Anexo A</b>	.....	<b>100</b>
<b>Anexo B</b>	.....	<b>103</b>
<b>Anexo C</b>	.....	<b>107</b>
<b>Anexo D</b>	.....	<b>111</b>
<b>Anexo E</b>	.....	<b>113</b>
<b>Anexo F</b>	.....	<b>116</b>

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Propagación de la Onda de compresión.....	8
<b>Figura 2.2:</b> Propagación de la Onda de corte. ....	9
<b>Figura 2.3:</b> Propagación de la onda de Rayleigh.....	10
<b>Figura 2.4:</b> Movimiento vertical y horizontal de las ondas Rayleigh en semiespacio homogéneo .....	10
<b>Figura 2.5:</b> Distribución del desplazamiento de ondas de una fuente superficial armónica en un semiespacio isotrópico elástico .....	11
<b>Figura 2.6:</b> Comportamiento mecánico del sólido .....	12
<b>Figura 2.7:</b> Pasos básicos para procesar el ensayo MASW .....	14
<b>Figura 2.8:</b> Efecto de la longitud del arreglo en la resolución de número de onda y en la claridad de los modos del suelo.....	15
<b>Figura 2.9:</b> Esquema de una configuración típica en campo del ensayo MASW .....	16
<b>Figura 2.10:</b> Velocidad de fase para diferentes tipos de suelos.....	18
<b>Figura 2.11:</b> Identificación de los diferentes modos en una imagen de dispersión y (b) límites teóricos para seleccionar la curva de dispersión.....	19
<b>Figura 2.12:</b> Resultados de la curva de dispersión con el análisis f-k: (a) Espectro f-k, (b) Curva de dispersión .....	21
<b>Figura 2.13:</b> Esquema del problema de inversión.....	22
<b>Figura 2.14:</b> Procedimiento de Inversión según el algoritmo NA.....	25
<b>Figura 2.15:</b> Imagen de dispersión y (b) Curva de dispersión seleccionada para el <i>shot</i> 1 del arreglo (a), (b) MASW0-122 y para el arreglo (c), (d) MASW 98-220.....	27
<b>Figura 2.16:</b> Comparación entre la curva de dispersión experimental (línea con puntos negros) y curvas teóricas, y los diferentes modelos de velocidad de onda de corte obtenida del arreglo (a) MASW0-122 y (b) MASW 98-220 .....	28
<b>Figura 2.17:</b> Imagen de dispersión y Curva de dispersión seleccionada para el <i>shot</i> 1 del arreglo (a), (b) MASW0-122 y (c),(d) MASW98-220 .....	29
<b>Figura 2.18:</b> Velocidad de onda de corte obtenida del arreglo (a) MASW0-122 y (b) MASW98-220 .....	29
<b>Figura 2.19:</b> Comparación de $V_s$ para el arreglo (a) MASW 0-122 y (b) MASW 98-220	30
<b>Figura 2.20:</b> Velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) calculadas en la presente investigación versus la calculada por Cox & Wood (2011) para el arreglo (a) MASW 0-122 y (b) MASW 98-220 .....	31

<b>Figura 2.21:</b> Equipos para la ejecución de ensayos MASW: (a) y (b) acelerómetro piezoeléctrico, (c) martillo de impacto, y (d) sistema de adquisición de datos.....	32
<b>Figura 2.22:</b> Configuración de los equipos realizada en campo para el ensayo MASW ...	32
<b>Figura 2.23:</b> Esquema de línea de registro para ensayos MASW para un arreglo de (a) 8 sensores y (b) 11 sensores. ....	33
<b>Figura 2.24:</b> Arreglo de fuente –acelerómetros para registro WA ( 8 acelerómetros).....	33
<b>Figura 2.25:</b> Registro <i>Walkaway</i> con 23 señales.....	34
<b>Figura 2.26:</b> Esquema del ensayo de refracción sísmica (Adaptado de (Humire, 2013))...	35
<b>Figura 2.27:</b> Gráfico de los tiempos de llegada de la primera onda para cada distancia del sensor (curva de arriba) .....	35
<b>Figura 2.28:</b> Configuración de los equipos en campo para el ensayo H/V .....	38
<b>Figura 3.1:</b> (a) Mapa de ubicación de la zona de estudio y (b) Disposición general de Huaca de la Luna .....	43
<b>Figura 3.2:</b> Estado de daños presentes en Huaca de la Luna.....	44
<b>Figura 3.3:</b> Mapa de Geomorfología del Distrito de Moche .....	46
<b>Figura 3.4:</b> Flanco norte del Cerro “Cabras”, en cuya cumbre puede observarse el remanente de la formación Casma (color oscuro).....	47
<b>Figura 3.5:</b> (a) Cauce de la Quebrada “San Idelfonso”. (b) Cerro “Cabras” (656 m.s.n.m.) – La Esperanza.....	48
<b>Figura 3.6:</b> (a) Cerro “Blanco”, afloramiento rocoso compuesto principalmente de granodiorita ubicado en la margen izquierda del cauce del Río Moche y (b) vista de la parte del Complejo arqueológico asentado en el afloramiento rocoso. ....	49
<b>Figura 3.7:</b> Mapa geológico de la zona donde se ubica el complejo Huaca de la luna.....	49
<b>Figura 3.8:</b> Ubicación de los ensayos geotécnicos realizados en Huaca de la Luna.....	50
<b>Figura 3.9:</b> Ensayos MASW en (a) la fachada norte y (b) en la fachada oeste de la Huaca .....	51
<b>Figura 3.10:</b> Perfil 1-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	52
<b>Figura 3.11</b> Perfiles de velocidad de onda de corte representativos por cada zona – MASW. ....	52
<b>Figura 3.12:</b> Perfiles de velocidad de onda de corte representativos por cada zona – Refracción sísmica.....	53
<b>Figura 3.13:</b> (a) Camión oruga SCPTu e (b) Ilustración del sistema SCPTu.....	54
<b>Figura 3.14:</b> (a)Esquema del sistema del SCPTu y (b) sistema de adquisición de datos ...	55

<b>Figura 3.15:</b> Valores de resistencia por punta y velocidad de onda de corte y clasificación del suelo de acuerdo los sondajes del SPCTu. ....	56
<b>Figura 3.16:</b> (a) Muestreo con barreno manual en la fachada norte (B-1) se encuentra en el primer estrato (b) arena medianamente densa, seguido por una capa de (c) arena gravosa a partir de los 3 m aproximadamente. ....	57
<b>Figura 3.17:</b> (a) Equipos necesarios para realizar el ensayo de cono de arena, (b) dimensiones del cono de arena de acuerdo al ASTM D1556, (c) ensayo realizado en la fachada oeste y (d) fachada norte. ....	58
<b>Figura 3.18:</b> Muestra de (a) suelo recuperado y (b) arena del ensayo de cono de arena....	59
<b>Figura 3.19:</b> Ensayo de placa de carga en (a), (b) fachada norte y (c) fachada oeste. ....	60
<b>Figura 3.20:</b> (a) Calibración de la gata y (b) grafica de correlación de presión –carga en la gata. ....	60
<b>Figura 3.21:</b> Curva de carga – deformación del suelo cerca a (a) la fachada norte y (c) fachada oeste.....	61
<b>Figura 3.22:</b> Comparación de los perfiles de velocidad de onda de corte del MASW, SCPTu y refracción sísmica para cada zona. ....	62
<b>Figura 3.23:</b> Interpretación de los estratos del suelo basados en la resistencia por punta del SCPTu.....	63
<b>Figura 3.24:</b> Interpretación de la estratigrafía del suelo basado en la velocidad de onda de corte .....	63
<b>Figura 3.25:</b> Comparación de los resultados de los métodos geofísicos y de los resultados de los métodos geotécnicos del SCPTu y barreno manual.....	64
<b>Figura 3.26:</b> Interpretación final del perfil estratigráfico del suelo basados en los métodos geofísicos y geotécnicos. ....	65
<b>Figura 4.1:</b> (a) Mapa de ubicación, (b) Frontis y (c) vista interna de la Iglesia.....	69
<b>Figura 4.2:</b> Mapa geológico de la zona donde se ubica Andahuaylillas (Adaptado de (Carlotto, et al., 2011)). ....	70
<b>Figura 4.3:</b> Imágenes del cono de deyección en Andahuaylillas (a) vista hacia el Suroeste y (b) vista hacia el Noreste cercano al río Vilcanota. ....	71
<b>Figura 4.4:</b> Mapa de rocas y minerales de los alrededores de la zona en estudio.....	71
<b>Figura 4.5:</b> Ubicación de los ensayos de MASW y cociente espectral realizados en la Iglesia. ....	72
<b>Figura 4.6:</b> Ensayos MASW en (a) el frontis y (b) en el lateral Este de la Iglesia .....	73
<b>Figura 4.7:</b> Comparación de los perfiles de Vs de las líneas MASW de los (a) laterales y (b) frontis de la Iglesia .....	74
<b>Figura 4.8:</b> Ensayo del cociente espectral realizado en el (a) lado lateral este y (b) lado lateral oeste de la Iglesia.....	75

<b>Figura 4.9:</b> Señales registradas en el tiempo y resultados de cociente espectral H/V para el punto (a), (b) NK-1 y (c), (d) NK-2 respectivamente.....	75
<b>Figura 4.10:</b> Señales registradas en el tiempo y resultados de cociente espectral H/V para el punto (a), (b) NK-3 y (c), (d) NK-4 respectivamente.....	76
<b>Figura 4.11:</b> Interpretación del perfil del suelo en base al MASW .....	77
<b>Figura 5.1:</b> (a) Mapa de ubicación, (b) vista interna de la Iglesia y (c) vista de la fachada. ....	<b>80</b>
<b>Figura 5.2:</b> Mapa geológico de la zona donde se ubica el distrito Huaró .....	81
<b>Figura 5.3:</b> Imágenes del Cono de deyección en Huaró (a) vista hacia el Suroeste y (b) vista hacia el Noreste cercano al río Vilcanota. ....	82
<b>Figura 5.4:</b> Mapa de rocas y minerales de los alrededores de la zona en estudio. ....	83
<b>Figura 5.5:</b> Ubicación de los ensayos de MASW y cociente espectral realizados en la Iglesia. ....	83
<b>Figura 5.6:</b> Ensayos MASW en (a) el frontis y (b) en el lateral Este de la Iglesia de Huaró .....	84
<b>Figura 5.7:</b> Comparación de los perfiles de Vs de las líneas MASW de los (a) lados laterales y (b) frontis de la Iglesia.....	85
<b>Figura 5.8:</b> Ensayo H/V en el lado lateral de la iglesia. ....	86
<b>Figura 5.9:</b> (a) Señales registradas en el tiempo y (b) resultados de cociente espectral H/V para el punto NK-1. ....	86
<b>Figura 5.10:</b> (a) Señales registradas en el tiempo y (b) resultados de cociente espectral H/V para el punto NK-2. ....	87
<b>Figura 5.11:</b> Interpretación del perfil del suelo en base al MASW .....	88
<b>Figura A.1:</b> Perfil 1-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	100
<b>Figura A.2:</b> Perfil 2-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	100
<b>Figura A.3:</b> Perfil 3-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	100
<b>Figura A.4:</b> Perfil 4-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	101
<b>Figura A.5:</b> Perfil 5 - Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	101
<b>Figura A.6:</b> Perfil 6- Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	101

<b>Figura A.7:</b> Perfil 7-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	101
<b>Figura A.8:</b> Perfil 9 -Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	102
<b>Figura A.9:</b> Perfil 10 -Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte .....	102
<b>Figura B.1:</b> Perfil 1 .....	103
<b>Figura B.2:</b> Perfil 2 .....	103
<b>Figura B.3:</b> Perfil 3 .....	104
<b>Figura B.4:</b> Perfil 4 .....	104
<b>Figura B.5:</b> Perfil 5 .....	104
<b>Figura B.6:</b> Perfil 6 .....	105
<b>Figura B.7:</b> Perfil 7 .....	105
<b>Figura B.8:</b> Perfil 8 .....	105
<b>Figura B.9:</b> Perfil 9 .....	106
<b>Figura B.10:</b> Perfil 10 .....	106
Figura B.11: Perfil 11 .....	106
<b>Figura C.1:</b> Perfil 1 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	107
<b>Figura C.2:</b> Perfil 2 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	107
<b>Figura C.3:</b> Perfil 3 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	108
<b>Figura C.4:</b> Perfil 4 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	108
<b>Figura C.5:</b> Perfil 5 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	108
<b>Figura C.6:</b> Perfil 6 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	109
<b>Figura C.7:</b> Perfil 7 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	109
<b>Figura C.8:</b> Perfil 8 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	109
<b>Figura C.9:</b> Perfil 9 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	110

<b>Figura C.10:</b> Perfil 10 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	110
<b>Figura C.11:</b> Perfil 11 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs) .....	110
<b>Figura E.1:</b> Línea MASW 1 .....	113
<b>Figura E.2:</b> Línea MASW 2 .....	113
<b>Figura E.3:</b> Línea MASW 3 .....	114
<b>Figura E.4:</b> Línea MASW 4 .....	114
<b>Figura E.5:</b> Línea MASW 5 .....	114
<b>Figura E.6:</b> Línea MASW 6 .....	115
<b>Figura E.7:</b> Línea MASW 7 .....	115
<b>Figura E.8:</b> Línea MASW 8 .....	115
<b>Figura F.1:</b> Línea MASW 1.....	116
<b>Figura F.2:</b> Línea MASW 2.....	116
<b>Figura F.3:</b> Línea MASW 3.....	117
<b>Figura F.4:</b> Línea MASW 4.....	117
<b>Figura F.5:</b> Línea MASW 5.....	118
<b>Figura F.6:</b> Línea MASW6.....	118

# Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Parámetros de adquisición de datos para la investigación MASW- Valores recomendados en negrita. ....	17
<b>Tabla 2.2:</b> Parámetros empleados para el procesamiento de las señales. ....	39
<b>Tabla 3.1:</b> Descripción de las líneas de registro para ensayo MASW en Huaca de la Luna .....	51
<b>Tabla 3.2:</b> Características de capacidad de los piezoconos .....	55
<b>Tabla 3.3:</b> Cálculo de la densidad en campo del suelo.....	58
<b>Tabla 3.4:</b> Cálculo de la densidad seca en laboratorio .....	58
<b>Tabla 4.1:</b> Descripción de las líneas de registro del ensayo MASW.	73
<b>Tabla 4.2:</b> Velocidad de onda de corte $V_{s30}$ y tipo de suelo.....	74
<b>Tabla 4.3:</b> Valores de frecuencia y amplitudes .....	76
<b>Tabla 4.4:</b> Distribución de los estratos del suelo.....	77
<b>Tabla 5.1:</b> Descripción de las líneas de registro del ensayo MASW.	84
<b>Tabla 5.2:</b> Velocidad de onda de corte $V_{s30}$ y tipo de suelo.....	85
<b>Tabla 5.3:</b> Valores de frecuencia y amplitudes.....	87
<b>Tabla 5.4:</b> Distribución de los estratos del suelo. ....	88

# **Capítulo 1 - Generalidades**

## **1.1. Introducción**

El enfoque de la presente investigación se centra en dar a conocer la aplicación de los ensayos geofísicos como métodos no destructivos para el uso geotécnicos en la exploración de suelos de estructuras patrimoniales. Desde sus inicios la ingeniería geotécnica se ha enfrentado a la caracterización de los materiales que componen el subsuelo. La caracterización del suelo es importante para predecir el comportamiento de las estructuras al construir sobre o dentro de él, en especial si son estructuras importantes que representan la identidad de los pueblos como es el caso de los monumentos históricos y arqueológicos. La exploración geotécnica tradicional ha consistido en la exploración con calicatas, pozos o sondajes. A partir de la década de 1960 los ensayos geofísicos comenzaron a incorporarse en algunos programas de investigación geotécnica con lo que se ha logrado tener una caracterización de los sitios de forma más completa. Estos ensayos entregan información de la estratigrafía, profundidad de la roca, profundidad de la napa de agua, etc. (Kramer, 1996) (Stokoe, et al., 2004). Uno de los objetivos de aplicar estos ensayos con fines geotécnicos es determinar el perfil estratigráfico, las propiedades dinámicas del suelo, específicamente la velocidad de ondas de corte  $V_s$  para estimar el módulo de corte y módulo de elasticidad. Una de las principales ventajas de los ensayos geofísicos es que son métodos no intrusivos, por lo que son más fáciles de ejecutar, en poco tiempo y son de menor costo. Estos ensayos también permiten la investigación de áreas extensas o alineaciones de gran longitud. Por lo tanto, son métodos adecuados para completar el conocimiento de un terreno que haya sido investigado con sondeos alejados entre sí y establecer si es el caso la necesidad de realización de sondeos intermedios.

La presente investigación se centra en la presentación de un marco teórico con los conceptos más importantes de los principales ensayos geofísicos que se emplean para determinar las propiedades del suelo. También se desarrollan tres casos de estudio aplicando los métodos de MASW, refracción sísmica y cociente espectral H/V aplicados en estructuras patrimoniales en Perú. Los resultados se compararon con ensayos geotécnicos tradicionales y se complementaron con información geológica para estimar la velocidad de onda de corte del suelo y los perfiles estratigráficos de las zonas en estudio.

## **1.2. Justificación**

El riesgo en el que se encuentran las estructuras patrimoniales en Perú es constante debido a ubicarse en una zona considerada de alta sismicidad. Esto ha llamado la atención de los investigadores y autoridades quienes actualmente se están preocupando de asegurar que estos iconos culturales perduren en el tiempo. Son pocos los estudios que se han realizado desde el punto de vista de la ingeniería para realizar un diagnóstico estructural adecuado y proponer medidas de intervención cuando sean necesarias. Por la complejidad que conlleva estudiar este tipo de estructuras, se debe trabajar con equipos multidisciplinarios entre los cuales la función del ingeniero geotécnico gana mucha importancia. Para la exploración de suelos existen los ensayos geotécnicos tradicionales y

las técnicas geofísicas aplicadas con fines geotécnicos. Los ensayos geofísicos son técnicas no destructivas que en los últimos años se vienen emplean en la geotecnia para estimar el perfil del suelo y determinar sus propiedades dinámicas sin necesidad de causar daños a la estructura ni alterar el suelo que se investiga. Adicionalmente se conoce que los ensayos geofísicos permiten ahorrar tiempo y dinero, ya que se puede hacer una investigación rápida ayudando a seleccionar locaciones para realizar ensayos directos. Estas técnicas son las más adecuadas para la caracterización del suelo en estructuras patrimoniales.

La investigación realizada en la presente tesis reafirma que el empleo de ensayos geofísicos como técnica de exploración geotécnica en lugar donde no se requiere una intervención mínima en la estructura del suelo como son los monumentos históricos. Lográndose una aproximación global de las características del suelo en poco tiempo.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo general de la tesis es comprender y poner en práctica el uso de los ensayos geofísicos como técnica de exploración geotécnica y contribuir al conocimiento de la aplicación de estos ensayos en la exploración de suelos en estructuras patrimoniales.

Los objetivos específicos son

- Comprender el marco teórico que engloba los ensayos geofísicos de MASW, refracción sísmica y cociente H/V en la caracterización de estructuras patrimoniales y aplicarlos empleando los equipos disponibles en el laboratorio de la PUCP.
- Comparar metodologías del proceso de la información del MASW y comprender las ventajas y desventajas de cada una.
- Determinar el perfil del suelo aplicando ensayos geofísicos en el primer caso de estudio que es el Complejo arqueológico Huaca de la Luna (Trujillo). Realizar ensayos geotécnicos tradicionales para confirmar la eficacia de los ensayos geofísicos.
- Aplicar ensayos geofísicos en suelos con características desconocidas donde se estudiarán dos casos. Los casos de estudio son la iglesia San Pedro de Andahuaylillas y San Juan Bautista de Huaro (Cusco).

### **1.4. Metodología**

El trabajo de tesis está organizado en dos partes principalmente. La primera parte (Capítulo 2) presenta el marco teórico referente a la teoría de propagación de ondas mecánicas, teoría de los ensayos geofísicos, y se realiza un resumen de algunos antecedentes de la aplicación de estos ensayos geofísicos en monumentos históricos. En la segunda parte (Capítulo 3, Capítulo 4 y Capítulo 5) se desarrolla tres casos de estudio donde se presenta una breve descripción geológica, el procedimiento, procesamiento de la información de campo y los resultados obtenidos de los tres ensayos aplicados. En el Capítulo 6 se presentan las principales conclusiones de la investigación.

El detalle del contenido de cada capítulo se muestra a continuación:

Capítulo 1: Este capítulo está dedicado a mostrar la introducción, justificación y objetivos de la investigación.

Capítulo 2: Se presenta el marco teórico referente a los ensayos geofísicos. Se describe la definición de ondas y su propagación en el suelo, la teoría en la que se fundamentan los tres ensayos geofísicos y los equipos que se necesitan para su aplicación. Adicionalmente se presentan antecedentes de la aplicación de estos ensayos en monumentos históricos.

Capítulo 3: Se presenta el primer caso de estudio que es el complejo arqueológico de Huaca de la luna. Se muestra una breve descripción del a geología del lugar, el desarrollo de los ensayos MASW y refracción sísmica, así como los ensayos geotécnicos tradicionales llevados a cabo. Se discuten los resultados y se presenta el perfil estratigráfico y los valores de Vs estimados.

Capítulo 4: En este capítulo se presenta el segundo caso de estudio que es la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas. Se muestra una breve descripción del a geología del lugar, la aplicación de los ensayos MASW y H/V llevados a cabo alrededor de la Iglesia. Se presenta la discusión de los resultados, se presenta el perfil estratigráfico y los valores de Vs estimados.

Capítulo 5: En este capítulo se presenta el tercer caso de estudio que es la Iglesia San Juan Bautista de Huaró. Al igual que en el caso anterior se muestra una breve descripción del a geología del lugar, se desarrollaron los ensayos MASW y H/V. Se realiza la discusión de los resultados, se presenta el perfil estratigráfico y los valores de Vs estimados.

Capítulo 6: Se presenta las conclusiones y algunas recomendaciones.

## 1.5. Resultados

Esta tesis desarrollada a tiempo completo como requisito para tomar la beca de la maestría y obtener el grado de Magister en Ingeniería Civil se sustenta en publicaciones que han sido aceptados o publicados en conferencias locales e internacionales arbitradas. A continuación se proporciona la lista de estas publicaciones:

Pando M.; Aguilar, R.; López, S. & Zavala, G. (2016). Soil Site Conditions and Seismic Hazard Analysis for Architecture Heritage Preservation in Peru: The Andahuaylillas Church Case Study. *Proceeding of the 10<sup>th</sup> International conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC-2016). 13-15 September 2016.* Leuven, Belgium. (Revision).

Aguilar, R.; Montesinos, M.; López, S., Saucedo, C., Ramírez, E.; Zavala, G.; Pando, M.; Morales, R. & Uceda, S. (2016), Geotechnical and structural testing in an archaeological massive earthen pyramid: Huaca de la Luna. *Proceeding of the XII<sup>th</sup> World Congress on Earth Architecture (TERRA-2016), 11-14 July 2016.* Lyon, France. (Revision).

Zavala, G.; López, S.; Pando, M.; Zegarra, J.; Morales, R.; Uceda, S.; Castañeda, B. & Aguilar, R. (2015) Geotechnical and geophysical exploration in archaeological heritage: initial assessment at Huaca de la Luna. *Proceeding of the 15th Pan-american Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 15-18 November 2015.* Buenos Aires, Argentina, pp 557-564.

Zavala G., López S., Ebinger C., Pando M., Lambert C., Morales, R.; Uceda, S.; Perucchio, R.; Castañeda, B. & Aguilar, R. (2014), Preliminary geophysical survey for assessing the geotechnical conditions and geohazards at Huaca de la Luna, Perú. *American Geophysical Union - Fall Meeting, San Francisco. 15 – 19 de December 2014.* San Francisco- USA.

## Capítulo 2 - Marco Teórico

En el presente capítulo se introducirá al lector los conceptos necesarios para el entendimiento de los ensayos geofísicos tratados en esta investigación. Se discute la teoría de propagación de ondas, el comportamiento del suelo bajo la influencia de éstas y las propiedades que se pueden determinar como la rigidez a deformaciones muy bajas. Se realiza una breve descripción de los tres métodos que se van a desarrollar en la investigación que son los ensayos MASW, refracción sísmica y cociente espectral H/V. Se desarrolla las metodologías existentes en la literatura para la determinación de la curva de dispersión y el análisis de inversión del método MASW que es el método más complejo de los tres métodos expuestos en esta investigación. Adicionalmente se hace una breve presentación de la metodología que se empleó para la toma de datos y los equipos utilizados. También se presentan algunas aplicaciones de ensayos geofísicos en monumentos importantes demostrando su requerimiento como una técnica no destructiva en la inspección de suelos.

## **2.1. Introducción**

La geofísica ha venido estudiándose por mucho tiempo. A pesar de que los sismógrafos fueron desarrollados a finales del siglo XIX, no fue hasta inicios del siglo XX cuando se dio más realce a su estudio con el desarrollo de las técnicas de refracción en la aplicación del descubrimiento de la discontinuidad de Mohorovicic y el núcleo de la tierra. En 1920 las técnicas de refracción fueron aplicadas en la exploración de petróleo obteniéndose muy buenos resultados. En los últimos años se viene aplicando también para la investigación de suelos a poca profundidad con fines geotécnicos.

Las ondas de superficie empleadas para caracterizar el interior de la tierra vienen siendo estudiadas desde la década de 1920. A partir de la década de 1950 y 1960 tuvo más acogida debido al desarrollo de instrumentos para el registro de eventos sísmicos (Dziewonski & Hales, 1972). La ingeniería de análisis con ondas de superficie para determinar las propiedades dinámicas de la tierra empieza en 1950 con el Método de Rayleigh en estado estacionario (SSRM) debido a la excitación armónica que era utilizada para generar la onda de superficie. Posteriormente esta técnica fue sustituida por el Análisis Espectral de Ondas de Superficie (SASW) debido a las deficiencias y consideraciones del método (Jones & Thrower, 1965). En (Nazarian & Stokoe II, 1984) se establece un procedimiento estándar para el empleo del SASW como estándar de ingeniería durante la aplicación de este ensayo. Ambos métodos se basan en la propagación de ondas superficiales Rayleigh para determinar el perfil de velocidades en profundidad de un medio. Posteriormente se desarrolló el Análisis multicanal de ondas Superficiales (MASW) en respuesta a las limitaciones del SASW durante la presencia de ruido y la detección de los múltiples modos de propagación de la onda (Park, et al., 1999), (Foti, 2000), (Zywicki, 1999).

En 1999 la ASTM publicó la primera edición de la guía para la selección de métodos geofísicos de superficie. La guía presenta una serie de opciones para la selección de métodos geofísicos aplicados a geotecnia, geología, arqueología e hidrología (ASTM D6429, 2011).

## **2.2. Conceptos básicos de ondas**

Se define como onda a una perturbación que se propaga en el espacio y tiempo en el cual existe una transferencia de energía con el medio por el cual se propaga. Las ondas más conocidas y las que son más fáciles de visualizar son las ondas mecánicas como por ejemplo las ondas superficiales en los líquidos, las ondas sonoras en el aire, así como las ondas de compresión, tanto en los sólidos como en los fluidos. Las ondas mecánicas son un tipo de onda elástica que consiste en la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan movimientos en un medio, en este caso la perturbación permanece en el rango elástico.

### **2.2.1. Ondas sísmicas y su propagación**

La mayoría de los ensayos sísmicos que se realizan in situ se hacen perturbando mecánicamente algún punto de la tierra y monitoreando en otro punto el movimiento producido. La teoría en la que se respaldan estos métodos es la propagación de ondas mecánicas. La propagación de ondas en el terreno es un fenómeno complejo y su

comportamiento se le suele describir por medio de la propagación de ondas de volumen (ondas P y ondas S) y ondas superficiales (Rayleigh), que ocurren en condiciones ideales del terreno tanto en la superficie como en su interior.

Los modos de propagación de ondas mecánicas más usados en los ensayos in situ son las ondas de cuerpo y las ondas superficiales.

Cuando las ondas atraviesan un material, éste puede considerarse como un medio continuo si tiene dimensiones características muy inferiores a la longitud de onda (Santamarina, et al., 2001). En el caso de la propagación de ondas en el suelo puede utilizarse la teoría de la mecánica del medio continuo dado que las longitudes de onda empleadas están en el orden de metros y atraviesan suelos cuyas partículas tienen tamaños del orden del milímetro.

Considerando al suelo como un medio continuo es posible utilizar las relaciones de equilibrio y de compatibilidad de los materiales. Además, la teoría de la elasticidad establece la ecuación constitutiva que permite completar la definición del problema.

Para el caso unidimensional se tiene las siguientes ecuaciones que definen las propiedades del medio:

Equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \quad (2.1)$$

Compatibilidad:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (2.2)$$

Constitutiva:

$$M = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}, \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0 \quad (2.3)$$

## 2.2.2. Ondas de cuerpo

La propagación en un medio infinito está gobernada por las ecuaciones anteriores. Considerando a un elemento de volumen infinitésimo, lineal, elástico e isótropo y que pertenece a un medio homogéneo infinito sometido a perturbaciones pequeñas, el equilibrio del elemento requiere que se cumpla la ecuación 2.4 (Foti, et al., 2001) (Kramer, 1996):

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.4)$$

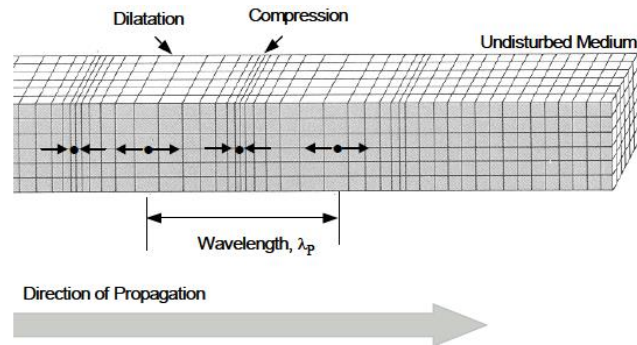
A través de las ecuaciones de compatibilidad y constitutivas del material, la ecuación 2.4 se puede expresar como:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = (M - G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + G \nabla^2 u_x \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = (M - G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + G \nabla^2 u_y \quad (2.6)$$

### 2.2.3. Ondas de compresión

Las ondas de compresión también denominadas ondas primarias o P, son ondas mecánicas de cuerpo cuyo sentido de movimiento coincide con el sentido de propagación. Las partículas alcanzadas por la onda se desplazan en la dirección de propagación como visualiza en la Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Propagación de la Onda de compresión. (Adaptado de (Santamarina, et al., 2001))

Si se considera que la onda es plana y que la propagación coincide con la dirección  $x$ , la ecuación 2.5 se puede simplificar a:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

El movimiento de la partícula se describe mediante:

$$u_x = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.8)$$

Si se reemplaza la ecuación 2.8 en la 2.7, se llega a la velocidad de fase de la onda P:

$$V_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (2.9)$$

O, en términos del módulo de Young, como:

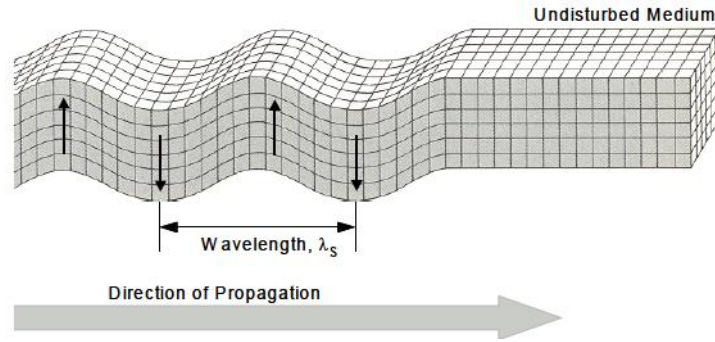
$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.10)$$

Si se mide experimentalmente la velocidad de fase la ecuación 2.10 puede emplearse para calcular el módulo de elasticidad solo si son conocidos los parámetros del medio como la densidad ( $\rho$ ) y módulo de poisson ( $\nu$ ) de la siguiente manera:

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.11)$$

### 2.2.4. Ondas de corte

Las ondas de corte también denominadas ondas secundarias o S son ondas mecánicas de cuerpo cuyas partículas se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación como se ve en la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Propagación de la Onda de corte.

Considerando que la onda es plana, la ecuación 2.6 se simplifica en:

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

El movimiento de la partícula se describe mediante:

$$u_y = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.13)$$

Si se reemplaza la ecuación 2.13 en la 2.12, se llega a la velocidad de fase de las ondas S:

$$V_s = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.14)$$

Se debe tener en cuenta que la relación entre las ondas P y ondas S sólo depende del módulo de Poisson.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad (2.15)$$

Por lo tanto para medio reales  $0 \leq \nu \leq 0.5$ , el viaje de las ondas longitudinales siempre es más rápido que el de las de corte ( $V_p > V_s$ ).

### 2.2.5. Ondas superficiales

Cuando se analiza la propagación de ondas en la cercanía de la superficie se observa que se produce un movimiento de las partículas más complejo. Para este tipo de problema se conoce la solución propuesta por Rayleigh (1885). Rayleigh resolvió el problema de las ondas elásticas que generan tensiones paralelas a la superficie en un medio semi-infinito, lo que trae como consecuencia una disminución de la rigidez del cuerpo en la superficie e induciendo un movimiento de las partículas vertical y horizontal.

Si se analizan los desplazamientos provocados por el impacto a una cierta distancia, al frente de onda se lo considera como plano. Para un material homogéneo se demuestra que las velocidades del medio no varían con la frecuencia lo que determina el carácter de no dispersivo, y se lo describe con la ecuación 2.16.

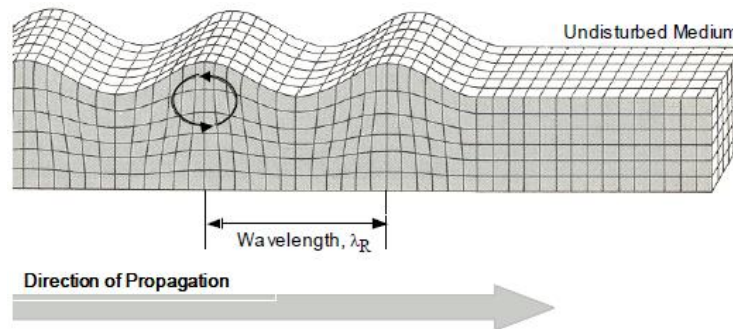
$$\left[2 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right]^2 - 4 \left[1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right]^{1/2} \left[1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right]^{1/2} = 0 \quad (2.16)$$

Una buena aproximación de la ecuación 2.16 se obtiene con:

$$V_r = \frac{0.874 + 1.117\nu}{1 + \nu} V_s \quad (2.17)$$

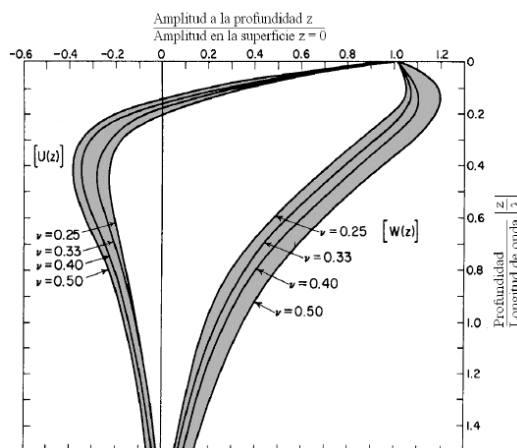
Se observa que la variación entre  $V_s$  y  $V_r$  es pequeña. Esto nos permite conocer el módulo de corte del terreno a través de la medición de la velocidad de ondas de Rayleigh por la baja incidencia del módulo de Poisson. Adicionalmente se conoce que para cualquiera valor de  $\nu$  se cumple que  $V_p > V_s > V_r$ .

Para el caso del semiespacio infinito el desplazamiento de las partículas provocado por las ondas Rayleigh es una combinación de movimientos horizontales y verticales. El resultado es un movimiento de partículas con forma de elipse que es antihorario en las cercanías de la superficie, pero que a partir de  $z = 0.2\lambda$  cambia su sentido como se aprecia en la Figura 2.3 (Stokoe, et al., 2004), (Santamarina, et al., 2001).



**Figura 2.3:** Propagación de la onda de Rayleigh.

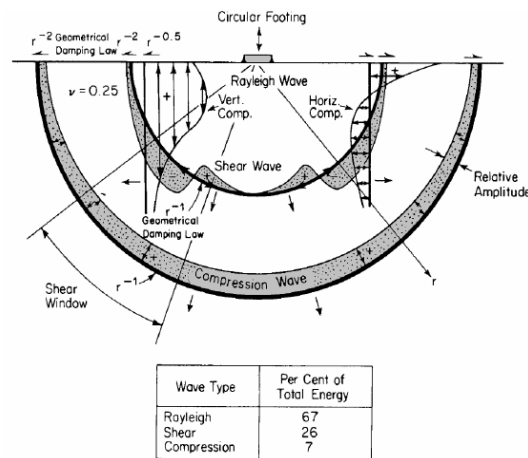
La característica dispersiva de las ondas significa que las ondas de diferente frecuencia o longitud de onda se propagan a diferentes velocidades. Esto se debe a la relación directa entre sus longitudes de onda y sus zonas de influencia para un semiespacio homogéneo tal como se muestra en la Figura 2.4. El desplazamiento de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad. Por esta razón, la propagación de este tipo de ondas afecta únicamente a la capa de suelo de profundidad igual a la longitud de onda ( $z = \lambda$ ). Las características mecánicas de los suelos inferiores a ésta profundidad no influyen en el fenómeno.



**Figura 2.4:** Movimiento vertical y horizontal de las ondas Rayleigh en semiespacio homogéneo (Foti, et al., 2001). (Hebeler, 2001) (Adaptado de (Richart, et al., 1970))

En la Figura 2.5 se muestra el tipo y distribución de energía de las ondas sísmicas producidas por la oscilación vertical de una fuente en superficie. Se puede observar que las ondas de superficie se propaga radialmente hacia afuera en un frente de onda cilíndrico,

mientras que las ondas de cuerpo se propagan radialmente hacia afuera y hacia abajo a lo largo de un frente de onda semiesférico. Como las ondas viajan hacia afuera su energía se distribuye en volúmenes más grandes de material y por consiguiente la energía de la onda se reduce a medida que la onda viaja lejos de la fuente. Las ondas de superficie geoméricamente se atenúan mucho más lento que las ondas de cuerpo a lo largo de la superficie libre a una velocidad de aproximadamente  $1/\sqrt{r}$  en comparación a  $1/r^2$  de las ondas de cuerpo. La lenta atenuación de las ondas de superficie permite la detección de las ondas Rayleigh a distancias más grandes. Esta habilidad permite medir las frecuencias bajas, y la longitud de onda, que en consecuencia permite inferir propiedades de los materiales a más profundas a partir de las medidas de las relaciones de dispersión. Este fenómeno básico ha motivado el uso de las ondas de superficie en ensayos geofísicos ( Hebeler, 2001).



**Figura 2.5:** Distribución del desplazamiento de ondas de una fuente superficial armónica en un semiespacio isotrópico elástico (Foti, et al., 2001). ( Hebeler, 2001) (Adaptado de (Richart, et al., 1970))

### 2.3. Comportamiento del suelo

El comportamiento mecánico del suelo es no lineal y presenta respuestas muy diferentes a bajas y grandes deformaciones. Un gráfico que permite el estudio de estos comportamientos es el de la curva  $\tau$ - $\gamma$  de un ensayo de corte directo tal como se muestra en la Figura 2.6a. El módulo de corte máximo  $G_{max}$  es el que corresponde al inicio de la curva y puede ser medido en los ensayos geofísicos dado a que generan perturbaciones en el terreno de muy baja amplitud (bajas deformaciones).

En la Figura 2.6b se muestra la evolución del módulo de corte secante y de la disipación de energía  $\xi$  con la amplitud de la distorsión. Puede verse que en el rango de distorsiones  $\gamma < 10^{-4}\%$  el comportamiento es esencialmente elástico puesto que no se aprecia caída en el módulo de corte. En cambio, para distorsiones mayores hay una degradación apreciable de rigidez que está asociada al desarrollo de deformaciones irreversibles (deformación inelástica).

Por lo tanto al aplicar las técnicas geofísicas en la superficie del terreno el suelo se comportará de manera elástica por lo que se podrá medir el módulo de corte máximo como así también el módulo de Young máximo (Luna & Jadi, 2000) (Ortigao, 2007).

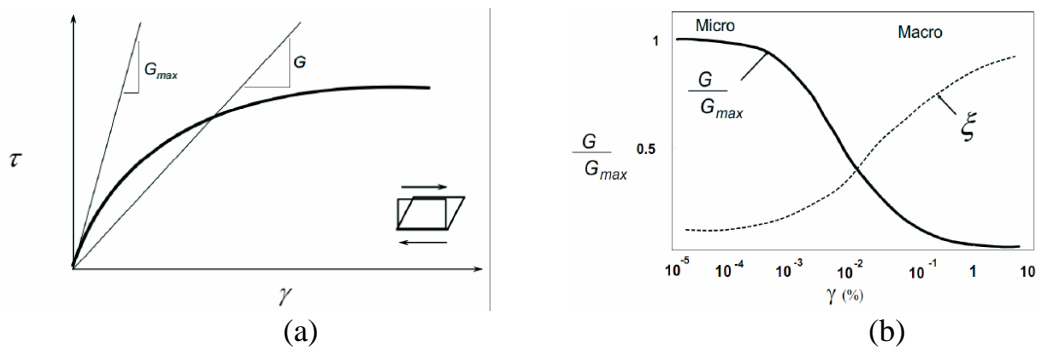


Figura 2.6: Comportamiento mecánico del sólido (Ortigao, 2007).

## 2.4. Aplicación de las ondas sísmicas

Las propiedades elásticas de los materiales que componen el subsuelo y sus efectos en la propagación de ondas sísmicas son fundamentales para la caracterización geotécnica de un sitio (Xia, et al., 1999). Dentro de estas propiedades uno de los parámetros clave es el perfil de velocidades de ondas de corte debido a que permite la evaluación primaria de la respuesta dinámica de un sitio (Tokimatsu, 1997). Dado a que el interés está en obtener las propiedades para bajas deformaciones (rango elástico), los métodos sísmicos basados en la propagación de ondas sísmicas son apropiados para la caracterización dinámica de suelos (Foti, 2000).

Adicionalmente se conoce que más de dos tercios de la energía que se registran en estudios sísmicos corresponden a ondas de Rayleigh (Richart, et al., 1970), que a su vez corresponden a la principal componente de la vibración vertical en la superficie del suelo (Park, et al., 1999). En un medio estratificado la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh depende de la frecuencia. Esta propiedad se conoce como dispersión.

Diversos autores como (Nazarian & Stokoe II, 1984) (Stokoe, et al., 2004) (Park, et al., 1999) han propuesto el uso de la naturaleza dispersiva de las ondas superficiales para la caracterización de suelos.

Existen métodos que permiten determinar estas propiedades directamente y pueden ser de carácter invasivo o no-invasivo. Los primeros requieren de una o varias perforaciones (crosshole, downhole, SCPTu, etc.) en el sitio estudiado y que en muchas ocasiones no se pueden llevar a cabo debido a problemas de costo o espacio. Otros métodos como la refracción sísmica se realizan en la superficie pero requieren establecer muchos supuestos que pueden alejarse de la realidad y no permiten explorar intercalaciones de suelos blandos bajo suelos rígidos.

Por otro lado, se encuentran los métodos basados en el registro de ondas superficiales los cuales agregan un grado de incertidumbre al no determinar directamente las propiedades elásticas buscadas. La ventaja es que estos métodos permiten explorar el suelo a grandes profundidades y son más eficientes en costo y tiempo.

## 2.5. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

Este ensayo se basa en la medición de la velocidad de las ondas sísmicas de superficie generadas por una fuente para calcular la variación de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) en profundidad. Este método fue originalmente propuesto para el análisis de ensayos activos por (Park, et al., 1999) (Xia, et al., 1999) (Zywicki, 1999). Posteriormente se extendió el método para ser aplicado en ensayos pasivos utilizando arreglos bidimensionales (Park, 2008) y arreglos lineales utilizando como fuente el tráfico vehicular (Park & Miller, 2008). Se han realizado diversos estudios para mejorar y ampliar los resultados obtenidos con esta metodología: optimización en la adquisición de datos en terreno, aplicación de filtros para la identificación de modos superiores en las trazas, y metodologías para determinar modelos de VS en 2D (Park, 2005) y 3D (Park & Carnevale, 2009).

EL MASW ha ganado gran credibilidad y ha motivado el estudio de la utilización de las ondas de superficie pasivas generadas por actividades naturales y culturales (Suzuki & Hayashi, 2003) (Park, et al., 2004) (Yoon & Rix, 2004). La inspección con fuentes activas provee una curva de dispersión con una frecuencia relativamente alta (baja longitud de onda) en un rango de frecuencias de 15 -50 Hz (ej. Correspondiente a longitudes de onda de 1-30m aprox.). En cambio, la investigación con fuentes pasivas puede llenar la tendencia de la curva de dispersión en el rango de bajas frecuencias (larga longitud de onda) en el rango de 5 - 15Hz (ej. Correspondiente a longitudes de onda de 30 - 100m). Una diferencia importante entre ambos métodos es que para el activo la distancia entre la fuente y los sensores es conocida, mientras que para el pasivo es desconocida. La ventaja de conocer la distancia es un beneficio para definir la calidad de las curvas de dispersión y su respectiva interpretación.

La ventaja de emplear el ensayo MASW es que aumenta la fiabilidad de los resultados y acorta el tiempo de ejecución de estudios tanto en el campo como durante la interpretación de la data. En los últimos años el MASW ha atraído la atención de los investigadores. Este método es una herramienta rápida, poderosa y rentable para estimar la velocidad de onda de corte. Es claro que este método es útil para ingenieros geotécnicos y sismólogos que necesitan una rápida evaluación de las características del suelo.

El proceso para trabajar con este método involucra principalmente tres pasos que son la adquisición de los datos, construcción de la curva de dispersión (velocidad de fase vs frecuencia) y el proceso de inversión para obtener el modelo de velocidad de onda de corte (Foti, 2000). Un esquema de estos pasos se puede observar en la Figura 2.7.

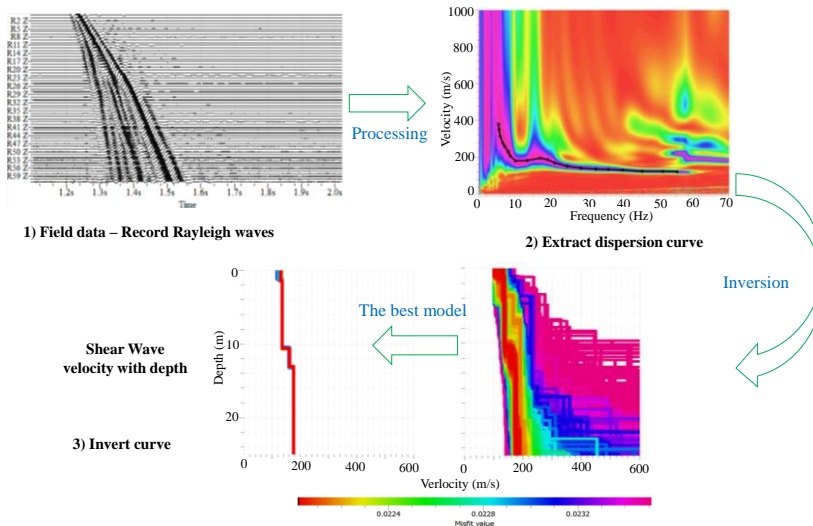


Figura 2.7: Pasos básicos para procesar el ensayo MASW

### 2.5.1. Adquisición de datos

Como se mencionó anteriormente el ensayo MASW se basa en la medición de las velocidades de las ondas sísmicas leídas por sensores y que son generadas por una determinada fuente. Debido a esto en los ensayos activos se necesita una fuente mecánica para generar la onda. Una de las prioridades del ensayo es seleccionar la fuente correcta y los sensores adecuados de acuerdo al alcance de la inspección que se requiere, lo que evidencia la flexibilidad del ensayo.

Hay una gran variedad de fuentes útiles para este ensayo como por ejemplo equipos especiales de barridos de frecuencia (ej. Vibroseis), fuentes impulsivas como martillo y plancha, bandas aceleradas de caídas de peso (RAWD) y explosivos. Una buena selección de la fuente es un requisito importante para asegurar la entrega de la suficiente energía que se requiere.

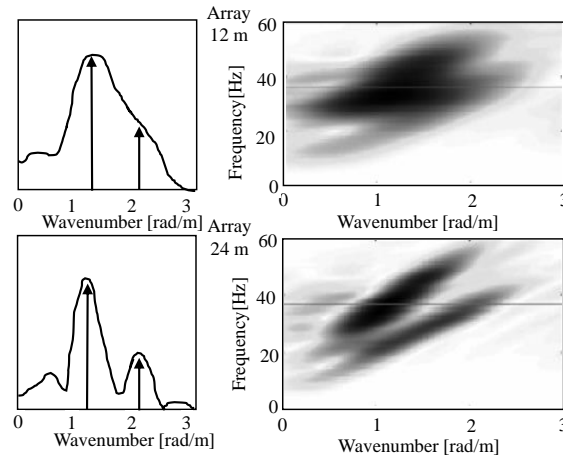
En la práctica convencional de este ensayo se emplea como fuente un martillo de 8kg y una plancha de base. Para registrar las señales usualmente se emplean una cadena de 24 canales de geófonos verticales de 4.5 Hz de frecuencia montados en una sola línea tal como se observa en la Figura 2.9. Una descripción más detallada del empleo de esta configuración de fuente y sensores se puede encontrar en (Park, 2005).

#### Longitud del arreglo

La longitud del arreglo afecta la resolución del número de onda ( $\Delta K$ ) y por lo tanto la posibilidad de la separación modal (ver Figura 2.8). El efecto *windowing* produce pérdidas en el espectro F-K debido a la presencia de un lóbulo principal en la ventana espacial del espectro y crea rizaduras que frecuentemente impiden la identificación de los altos modos (*higher modes*) (Socco & Strobbia, 2004).

Otro aspecto que se debe considerar en relación a la longitud de la ventana espacial es la máxima longitud observable. Teóricamente, ningún límite superior en la longitud de onda es mayor que la longitud del arreglo. Se puede observar longitudes más largas que el arreglo, y la máxima depende principalmente del comportamiento global del sitio y del contenido de

frecuencias de la propagación de la señal. Sin embargo se prefiere arreglos largos debido a que mejoran la separación modal y cuando se tratan el número de canales ellos reducen la incertidumbre de los datos. Por otro lado los arreglos cortos son menos sensibles a las variaciones laterales, producen una mejor relación señal/ruido (S/N), se afectan menos por la atenuación de las altas frecuencias y producen menos *aliasing* dado el número de canales (Socco & Strobbia, 2004).



**Figura 2.8:** Efecto de la longitud del arreglo en la resolución de número de onda y en la claridad de los modos del suelo. Adaptado de (Linares, 2005)

### **Offset o desplazamiento de la fuente**

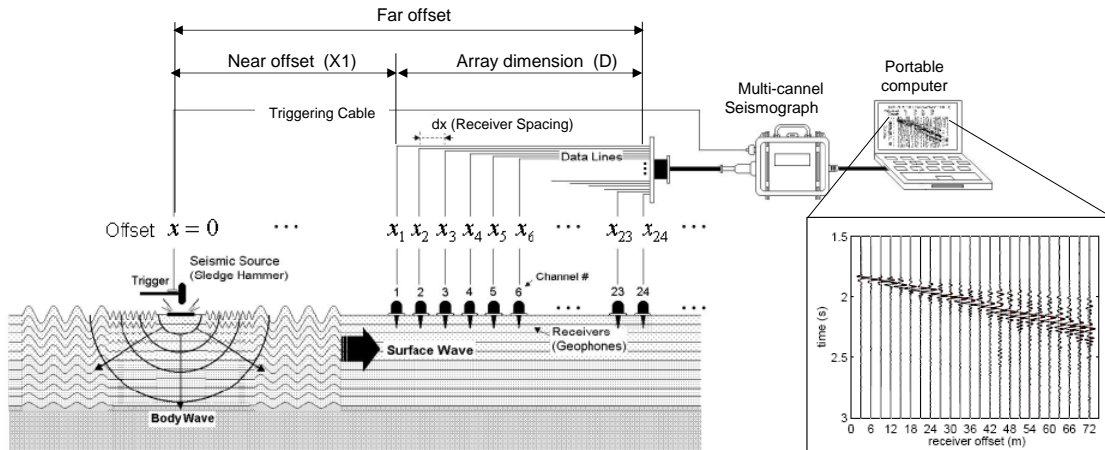
Para planear un óptimo offset de la fuente se deben considerar dos aspectos principales: en pequeñas distancias los efectos de campo cercano contaminan la señal en bajas frecuencias. Mientras que la atenuación reduce la relación señal/ ruido (S/N) de las trazas a grandes distancias especialmente en la banda de alta frecuencia. Estos dos fenómenos son fuertemente dependientes de las condiciones del sitio y de las condiciones experimentales.

La preparación de la inspección en sitio debe empezar con una investigación del campo de onda para determinar la óptima geometría de la línea de investigación y la configuración de los parámetros deben ser favorables a la grabación plana de las ondas Rayleigh y desfavorables a otro tipo de ondas acústicas. Debido a los indeseables efectos del campo cercano, las ondas Rayleigh se puede tratar como ondas planas que viajan horizontalmente después de que se han propagado una cierta distancia desde la fuente (Richart, et al., 1970). La distancia  $X_1$  (*offset* cercano) (ver Figura 2.9) es un parámetro crítico tanto como la determinación de la posición del arreglo de sensores en el campo de onda y por lo tanto el impacto de los efectos del campo cercano y lejano. Los efectos del campo cercano son causados por la propagación cilíndrica de las ondas Rayleigh próxima a la fuente más que por la propagación plana y esto conduce a la falta de energía en el componente de frecuencias más bajas de un registro. La propagación de manera plana de la onda de superficie no se da sino hasta cuando  $X_1$  es más grande que la mitad de la longitud de onda deseada (Stokoe II, et al., 1994). Cuanto más larga sea la longitud de onda más lejos debe viajar antes de ser plana. La profundidad de investigación confiable es de aproximadamente:

$$Z_{\max} = C_1/(2f_1) = 1/2 \lambda_{\max} \quad (2.18)$$

Donde  $C_1$  es la velocidad de fase para las bajas frecuencias analizadas ( $f_1$ ) y  $\lambda_{\max}$  es la máxima longitud de onda registrada. Por ello es que el objetivo del MASW es registrar las bajas frecuencias o longitudes de onda grandes mientras (Rix & Leipski, 1991).

Si el máximo *offset* del sensor es demasiado largo, los componentes de alta frecuencia de la energía de las ondas de superficie no dominarán los componentes de alta frecuencia del espectro de ondas de cuerpo. La contaminación por ondas de cuerpo debido a la atenuación de la alta frecuencia debido a *offsets* largos se le conoce como efectos de *offset* lejanos (Park, et al., 1999).



**Figura 2.9:** Esquema de una configuración típica en campo del ensayo MASW (adaptado de (Park, 2005))

El efecto del *offset* lejano limita la más alta frecuencia ( $f_{\max}$ ) en la cual la velocidad de fase puede ser medida. La frecuencia más alta confiable está dada usualmente por la velocidad y frecuencia del registro de frecuencia más alta sin contaminar ( $f_{\max}$ ). Cuando se crea el modelo de estratos inicial de acuerdo al criterio de la media longitud de onda, ( $f_{\max}$ ) generalmente designa las imágenes del estrato superior (H1) para una determinada velocidad de fase (Stokoe, et al., 2004).

$$H1 \geq 0.5\lambda_{\min} = 0.5 C_{\min}/f_{\max} \quad (2.19)$$

Donde  $C_{\min}$  y  $\lambda_{\min}$  son la velocidad de fase y la longitud de onda que corresponden a la frecuencia  $f_{\max}$ . A pesar de que el perfil de Vs invertido tenga estratos menores a H1, los valores calculados para esta capa deben ser considerados no confiables.

Además, debido a la atenuación, es necesario normalizar las señales registradas en los receptores para reducir el efecto de procesar grandes amplitudes en las cercanías de la fuente (Wathelet, 2011). Suponiendo que el espacio es perfectamente homogéneo, la atenuación geométrica se puede representar dividiendo por la raíz cuadrada de la distancia desde la fuente a cada receptor (Foti, et al., 2001). De acuerdo a autores como Park (Park, et al., 1999), para incorporar el efecto de la atenuación y la divergencia esférica en medios estratificados, las señales deben ser normalizadas en función de la máxima amplitud registrada en cada receptor.

A continuación se describen los pasos para tomar los datos de campo tanto para los ensayos activos como pasivos.

**Ensayos activos:** Se realiza golpes con el martillo a distintas distancias y para cada una de ellas el golpe se debe repetir un cierto número de veces. Es necesario repetir varios golpes en una misma ubicación, debido a que durante el ensayo no existe control sobre el ruido generado por fuentes ambientales que puedan afectar la señal registrada, ni en el rango de frecuencias de las ondas generadas. Con el objeto de reducir el efecto de las vibraciones ambientales con la técnica conocida como superposición de señales o *stacking*, el tiempo de registro debe ser lo suficientemente largo para registrar el paso de la onda originada por el golpe hasta el último sensor.

Dependiendo del espacio disponible se realizan ensayos activos en dos arreglos perpendiculares entre sí con el objeto de estudiar las diferencias entre una dirección y otra y así confirmar las características del sitio. En la Tabla 2.1 se presentan algunos parámetros recomendados para la adquisición de los datos en el método MASW activo.

**Tabla 2.1:** Parámetros de adquisición de datos para la investigación MASW- Valores recomendados en negrita (Adaptado de (Park, 2002)).

Profundidad (m) <sup>1</sup>	Fuente(S) (lb) <sup>2</sup>	Receptores (R) (Hz) <sup>3</sup>	Receptores en extensión (RS) (m)				Receptores en movimiento (dx) <sup>6</sup>			Registro de datos <sup>8</sup>	
			Longitud (D) <sup>4</sup>	Distancia de la fuente (X1) <sup>5</sup>	Espaciamiento entre receptores (dx)		Resolución lateral <sup>7</sup>			dt (ms) <sup>9</sup>	T (sec) <sup>10</sup>
					24-ch*	48-ch	Alta	Medio	baja		
≤1.0	≤1. <b>(1)**</b>	4.5-100 <b>(40)</b>	1-3 <b>(2.0)</b>	0.2-3.0 <b>(0.4)</b>	0.05-0.1 <b>(0.1)</b>	<b>0.02-0.05</b> <b>(0.05)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>
1-5	1-5 <b>(5)</b>	4.5-40 <b>(10)</b>	1-15 <b>(10)</b>	0.2-15 <b>(2)</b>	0.05-0.6 <b>(0.5)</b>	0.02-0.3 <b>(0.25)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>
5-10	5-10 <b>(10)</b>	≤10 <b>(4.5)</b>	5-30 <b>(20)</b>	1-30 <b>(4)</b>	0.2-1.2 <b>(1.0)</b>	0.1-0.6 <b>(0.5)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	0.5-1.0 <b>(1.0)</b>
10-20	≥10 <b>(20)</b>	≤10 <b>(4.5)</b>	10-60 <b>(30)</b>	2-60 <b>(10)</b>	0.4-2.5 <b>(1.5)</b>	0.2-1.2 <b>(1.0)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	1.0-2.0 <b>(1.0)</b>
20-30	≥10 <b>(20)</b>	≤4.5 <b>(4.5)</b>	20-90 <b>(50)</b>	4-90 <b>(10)</b>	0.8-3.8 <b>(2.0)</b>	0.4-1.9 <b>(1.5)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	1.0-2.0 <b>(1.0)</b>
30-50	≥10 <b>(20)</b> o Pasivo	≤4.5 <b>(4.5)</b>	30-150 <b>(70)</b>	6-150 <b>(15)</b>	1.2-6.0 <b>(3.0)</b>	0.6-3.0 <b>(2.0)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	1.0-3.0 <b>(1.0)</b>
>50	≥10 <b>(20)</b> o Pasivo	≤4.5 <b>(4.5)</b>	>50 <b>(150)</b>	>10 <b>(30)</b>	>2.0 <b>(6.0)</b>	>1.0 <b>(4.0)</b>	1-2 <b>(1)</b>	2-4 <b>(2)</b>	4-12 <b>(4)</b>	0.5-1.0 <b>(0.5)</b>	>1.0 <b>(2.0)</b>

<sup>1</sup> Profundidad máxima a investigar, <sup>2</sup> peso del martillo en libras, <sup>3</sup> frecuencia natural del geófono <sup>4</sup> longitud total aproximada de la línea de sensores, <sup>5</sup> distancia entre la fuente y el sensor más cercano X<sub>1</sub>, <sup>6</sup> distancia de espaciamiento entre sensores <sup>7</sup>, grado de la resolución lateral que se busca, <sup>8</sup> parámetros de registro de datos, <sup>9</sup> intervalo de muestreo en milisegundos, <sup>10</sup> tiempo total de muestreo, \*sistema de adquisición con 24 canales.

**Ensayos Pasivos:** El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones (Tokimatsu, 1997).

En general, para registrar las vibraciones ambientales se utilizan arreglos lineales (idealmente arreglos en forma de cruz) y arreglos circulares ya que no se conoce a priori la

dirección de propagación predominante de los distintos frentes de ondas (Park & Miller, 2008) (Wathelet, 2005). El protocolo para ensayos pasivos consiste básicamente en registrar 10 min. de vibraciones ambientales con un intervalo de muestreo de 4 ms. El tiempo de registro puede aumentar en zonas con bajo ruido ambiental (zonas rurales o aisladas).

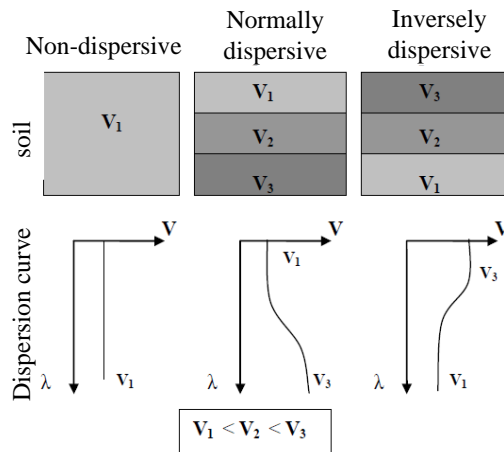
Si se considera que la distancia  $D$  es el diámetro del círculo en un arreglo circular o la longitud de la línea en un arreglo en cruz, entonces:

$$D = m Z_{\max} , \quad (1 \leq m \leq 3) \quad (2.20)$$

Donde  $Z_{\max}$  es la máxima profundidad de investigación. El espaciado entre los sensores ( $dx$ ) es determinado por el número de canales disponibles ( $N$ ) y la distancia  $D$ .

### 2.5.2. Procesamiento de las señales y extracción de las curvas de dispersión

En un semi-espacio homogéneo (no dispersivo) la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh será la misma siempre, mientras que en un medio estratificado la velocidad de fase es dependiente de la frecuencia o longitud de onda (Figura 2.10). Esta propiedad se conoce como dispersión, mientras que el gráfico que muestra la variación de la velocidad de fase con la frecuencia para los distintos modos de propagación, se conoce como curva de dispersión (Tokimatsu, 1997).

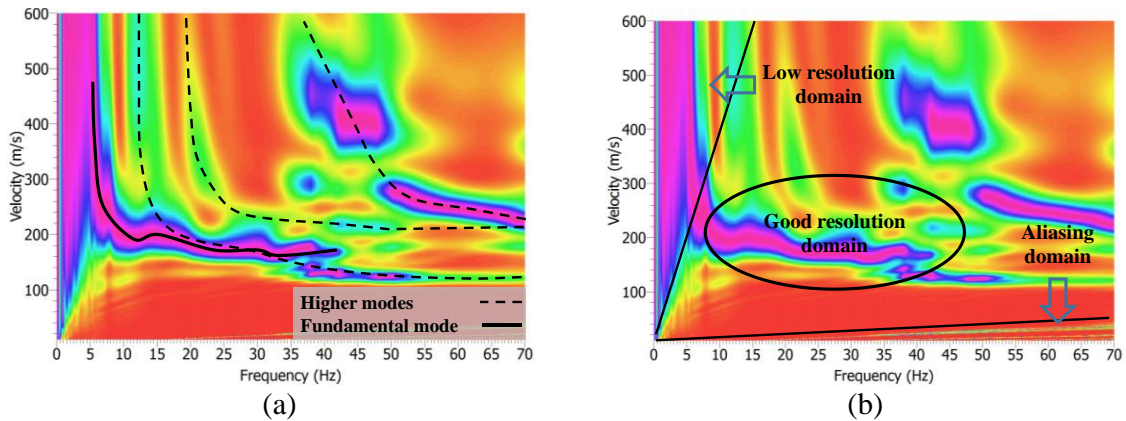


**Figura 2.10:** Velocidad de fase para diferentes tipos de suelos (Czelada, 2009)

La curva de dispersión se extrae de la imagen de dispersión seleccionando los valores que tienen máxima amplitud, es decir mayor energía (color rosado en la Figura 2.11). En la imagen de dispersión se observa la curva de dispersión del modo fundamental y de los altos modos que también determina el comportamiento del suelo. Usualmente el modo que se emplea para el análisis de inversión y determinar el perfil de velocidad de onda de corte es el modo fundamental.

Para seleccionar la curva de dispersión del modo fundamental existen dos límites teóricos donde se considera que la información de la curva determinada en el arreglo es confiable. El límite izquierdo que marca la zona de baja resolución viene definido para una velocidad máxima de  $C_1 = f_1 * \lambda_{\max}$ , donde  $C_1$  es la velocidad correspondiente a las frecuencias más baja ( $f_1$ ) que se observa en la imagen dispersión del modo fundamental. Siendo  $\lambda_{\max}$  la máxima longitud de onda que se puede aproximar a la longitud de todo el

arreglo de señales analizadas ( $D \cong \lambda_{\max}$ ). El límite derecho que marca la zona de *aliasing* está definido para una velocidad mínima de  $C_2 = f_2 * \lambda_{\min}$ , donde  $C_2$  es la velocidad correspondiente a la frecuencia más alta ( $f_2$ ) que se puede observar en la imagen dispersión del modo fundamental. Siendo  $\lambda_{\min}$  la mínima longitud de onda y se puede aproximar a la distancia de separación entre cada sensor ( $dx \cong \lambda_{\min}$ ) (DECO Geophysical, 2014). Haciendo estos cálculos para todo el rango de frecuencias de interés y graficando los resultados se puede establecer una línea de límite superior e inferior donde la curva de dispersión seleccionada dentro de este margen brindará resultados confiables (ver Figura 2.11b).



**Figura 2.11:** Identificación de los diferentes modos en una imagen de dispersión y (b) límites teóricos para seleccionar la curva de dispersión.

Existen distintos enfoques para la determinación de características dispersivas de un sitio en función del tipo de fuente (activa o pasiva) y el número de receptores utilizados. Los métodos conocidos como Steady State Rayleigh Wave (Jones & Thrower, 1965) y Análisis Espectral de Ondas Superficiales o SASW (Nazarian & Stokoe II, 1984), permiten el análisis de ensayos realizados con una fuente activa alineada empleando solo dos sensores.

La ejecución de ensayos con múltiples sensores permite reducir el número de golpes y mediciones que se deben realizar en los ensayos activos para optimizar los tiempos de trabajo. Además, permiten diferenciar las ondas Rayleigh de otros tipos de ondas sísmicas que viajan en superficie (Park, et al., 1999). Estos métodos permiten un análisis simultáneo de los registros en distintos receptores a través de la transformación de los datos del dominio del tiempo y el espacio a un dominio diferente. Esto permite reconocer *peaks* y por ende las características dispersivas del sitio son reconocidas con facilidad (Foti, et al., 2001). Entre los enfoques más utilizados para el análisis de dispersión tenemos:

- Desenvolvimiento de fases (Joh, 1996).
- Regresión lineal de los ángulos de fase.
- *Beamformer*-FDBM (Zywicki, 1999).
- Regresión lineal ponderada de las ubicaciones de fase.
- Transformada frecuencia - número de onda (F-K) (Lacoss, et al., 1969) (Kværna & Ringdahl, 1986).
- Transformada frecuencia - lentitud (p-f) (McMechan & Yedlin, 1981).
- Transformada de Park, conocida comúnmente como MASW. (Park, et al., 1999).

A través del uso de arreglos bidimensionales de geófonos es posible utilizar las vibraciones ambientales para la determinación de las características dispersivas de un sitio. En el presente estudio se emplearon la transformada F-K y la transformada de Park para la determinación de las curvas de dispersión del ensayo MASW. A continuación se describen en mayor detalle los dos enfoques utilizados en esta investigación.

### Transformada frecuencia – número de onda (F-K)

Para el análisis F-K el supuesto fundamental es que el arreglo de sensores es atravesado por un frente de onda plano de frecuencia, velocidad y dirección de propagación conocidas. (Lacoss, et al., 1969) (Kværna & Ringdahl, 1986).

Cuando se emplea esta transformada en ensayos activos se debe incorporar la atenuación sufrida por el frente de ondas. Para ello se utiliza la definición para desplazamientos verticales en superficie causados por una fuente impulsiva planteadas por (Aki & Richards, 1980).

$$u(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m U_m(\omega, r) e^{i(\omega t - k_m(\omega)r)} d\omega \quad (2.21)$$

Donde  $m$  es el número de los distintos modos de vibración  $k_m(\omega)$  es la componente del número de onda correspondiente a la dirección analizada para un modo  $m$  en particular,  $r$  es la distancia entre la fuente y el sensor y  $U_m(\omega, r)$  está definido en la ecuación 2.22:

$$U_m(\omega, r) = I(\omega) S_m(\omega) R_m(\omega) p(r) e^{-\alpha_m(\omega)r} \quad (2.22)$$

Siendo  $I(\omega)$  la respuesta del sensor,  $S_m(\omega)$  el espectro de la fuente,  $R_m(\omega)$  el efecto de la trayectoria,  $p(r)$  el factor de atenuación geométrica y  $e^{-\alpha_m(\omega)r}$  es la atenuación del suelo para cada modo  $m$  con un coeficiente de atenuación igual a  $\alpha_m(\omega)$ . Se aplica la transformada *slant-stack* (Foti, 2000) para descomponer el campo incidente en ondas planas con una lentitud horizontal  $s_{hor}$ . Esto permite filtrar los frentes de ondas no planos generados por fuentes externas como pueden ser las vibraciones ambientales (Humire, 2013).

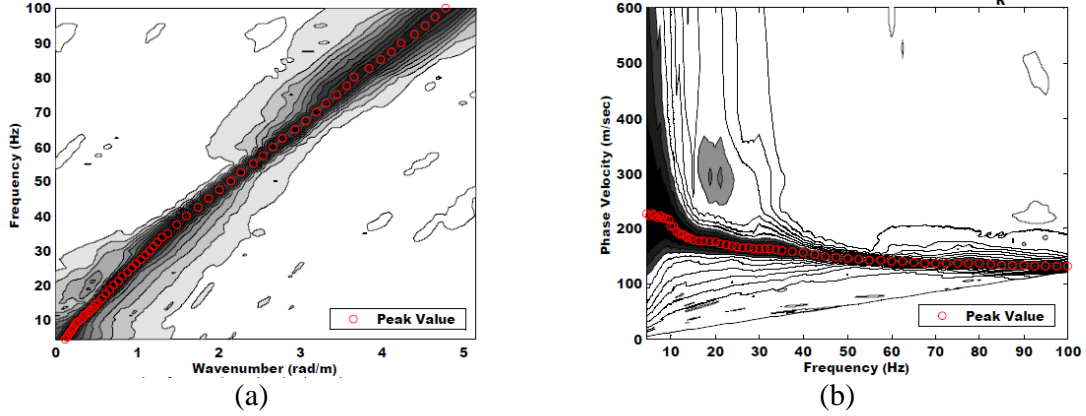
$$\sum_{n=1}^N u(x_n, t + s_{hor}x_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m \sum_{n=1}^N U_m(\omega, x_n) e^{i(\omega s_{hor} - k_{x,m}(\omega))x_n} d\omega \quad (2.23)$$

Al calcular la transformada de Fourier en  $\tau$  y al expresar la lentitud horizontal en términos de número de ondas, se puede obtener la respuesta en el espectro F-K de acuerdo a la ecuación 2.24:

$$F(\omega, k) = \sum_m \left[ \sum_{n=1}^N p_n U_m(\omega, r) e^{-\alpha_m(\omega)r} e^{i(k - k_{x,m}(\omega))x_n} \right] \quad (2.24)$$

En la ecuación 2.24 se incorpora el peso  $p_n$  que permite eliminar la atenuación geométrica, una referencia de este valor se puede observar en (Foti, 2000).

Con la ecuación 2.24 se calcula la respuesta en el espectro f-k para distintas combinaciones de frecuencia y número de onda, tal como se indica en la Figura 2.12a. Sin embargo, para efectos prácticos es más simple trabajar en el espacio de la velocidad de fase y la frecuencia, tal como se indica en la Figura 2.12a. En este plano es posible identificar con claridad las zonas de mayor energía, y con ello identificar la curva de dispersión (Humire, 2013).



**Figura 2.12:** Resultados de la curva de dispersión con el análisis f-k: (a) Espectro f-k, (b) Curva de dispersión (Zywicki, 1999).

### Transformada de Park (MASW)

La transformada propuesta por (Park, et al., 1998) en su primera versión fue diseñada para la resolución de ensayos activos y tiene varias similitudes al análisis F-K. De acuerdo a esta formulación a las señales registradas en cada receptor  $u(x, t)$  se aplica la transformada de Fourier para calcular  $U(x, \omega)$ :

$$U(x, \omega) = \int u(x, t) e^{i\omega t} dt \quad (2.25)$$

Donde  $U(x, \omega)$  puede ser expresado como el producto entre su espectro de fase  $P(x, \omega)$  y de amplitud  $A(x, \omega)$ . El primero posee toda la información sobre las propiedades dispersivas del sitio estudiado, mientras el segundo está relacionado con la atenuación sufrida por cada señal. Por lo tanto  $P(x, \omega)$  puede expresarse en términos del número de onda  $K_m(\omega)$  para el modo  $m$ , tal como se observa en la ecuación 2.26.

$$U(x, \omega) = P(x, \omega)A(x, \omega) = e^{-ik_m(\omega)x} A(x, \omega) \quad (2.26)$$

En (Park, et al., 1998) se propone cuantificar la respuesta del arreglo para distintas combinaciones de frecuencia y número de onda con la siguiente expresión:

$$V(\omega, k) = \int e^{ikx} \frac{U(x, \omega)}{|U(x, \omega)|} dx = \int e^{-ik_m(\omega-k)x} \frac{A(x, \omega)}{|A(x, \omega)|} dx \quad (2.27)$$

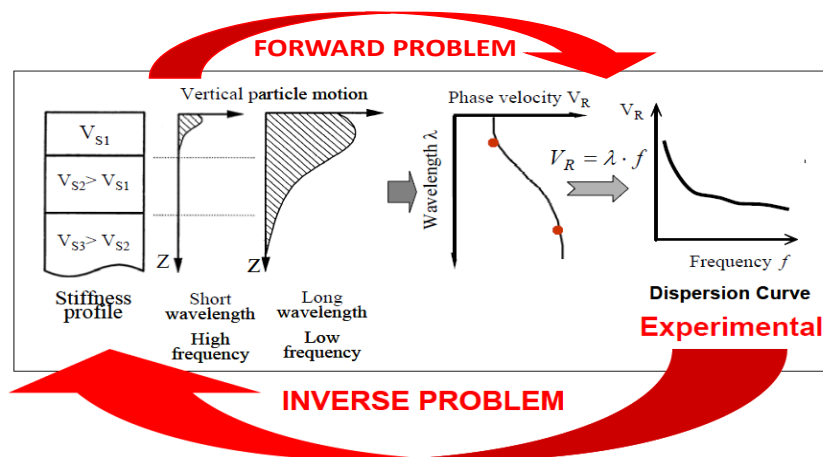
Este procedimiento es equivalente al *slant stack* descrito para el método F-K. Además al normalizar las señales por  $|U(x, \omega)|$  se incorpora la atenuación geométrica. Para una frecuencia dada existirán máximos cuando  $k_m(\omega) = k$  para los distintos modos de propagación lo que permitirá la identificación de la curva de dispersión.

### 2.5.3. Proceso de inversión

El objetivo del proceso de inversión consisten en generar un modelo de estratos horizontales de suelo con propiedades físicas ( $V_s$ ,  $\rho$ ,  $v$  o  $V_p$ ) y geométricas (espesores de estratos) compatibles con las observaciones de terreno y reflejadas a través de la curvas de dispersión. De acuerdo a lo planteado por diversos autores estas curvas dependen principalmente de la velocidad de ondas de corte y son prácticamente insensibles a

variaciones de la densidad y velocidades de ondas de compresión con la profundidad. La inversión no es un proceso trivial ya que existen muchos modelos de suelo que se ajustan a las observaciones de terreno (Nolet, G. , 1981) (Foti, 2000) (Sambridge, 2001).

La idea general de la inversión (Figura 2.13) es calcular las curvas de dispersión asociadas a modelos de estratos de suelo (problema directo). Luego se emplea algún algoritmo de búsqueda que encuentre el modelo que tenga el mayor ajuste con las observaciones de terreno (problema inverso).



**Figura 2.13:** Esquema del problema de inversión (Adaptado de (Foti, et al., 2011))

Existen diferentes técnicas empleadas para resolver el problema directo y encontrar la curva de dispersión teórica para un determinado modelo de suelo. La aproximación más común es la del método de Haskell-Thomson (Thomson, 1950) (Haskell, 1953), que describe la propagación de la onda en un medio estratificado. Esta aproximación es también conocida como Método de la matriz de transferencia y es aplicable solo a perfiles que se puede representar como una columna de capas homogéneas superpuestas en un semiespacio homogéneo. Otros métodos comúnmente utilizados y que igualmente son aplicados a perfiles estratificados tenemos: Método de la matriz de rigidez dinámica de (Kausel & Roesset, 1981) y el método de la reflexión y coeficiente de transmisión (Kennett, 1974).

Existen diferentes enfoques para realizar el problema inverso entre los que tenemos los métodos iterativos o de búsqueda local y los métodos de búsqueda global. Los métodos iterativos se basan en la linealización del problema de inversión (Nolet, G. , 1981), y utilizan un modelo tentativo inicial compuesto por un número finito de estratos de suelo. El modelo tentativo que puede ser determinado en base a información conocida previamente del sitio estudiado (Foti, et al., 2001). A partir del modelo inicial se inicia un proceso iterativo que busca encontrar un modelo que se ajuste a las observaciones de terreno. Entre los métodos iterativos comúnmente utilizados se encuentran el algoritmo de Newton-Raphson, el criterio de los mínimos cuadrados (amortiguado, ponderado y Occam), los métodos basados en gradientes (Wathelet, 2008).

Por otro lado existen los métodos de búsqueda global que permiten una mayor exploración del espacio de los parámetros del modelo que se ajusta. A diferencia de los métodos iterativos, los métodos de búsqueda global no recurren a supuestos de linealidad al resolver el problema. Esto les permite diferenciar mínimos locales del mínimo global en

problemas con no-linealidad severa y siempre convergen a una solución pudiendo tener un mayor costo computacional en función de la irregularidad y tamaño del problema (Sambridge, 2002).

Dentro de los métodos de búsqueda global se encuentran aquellos que permiten una búsqueda aleatoria orientada. Estos métodos permiten un mayor control en la exploración de los parámetros del modelo así como la identificación de zonas donde haya una mayor probabilidad de encontrar modelos que se ajusten a las observaciones de terreno. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran: el método de Reconocimiento Simulado (*Simulated Annealing*), Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*) y el Algoritmo del Vecindario (*Neighbourhood Algorithm*). Este último se procederá a describir más a detalle debido a que es el que utilizó en la presente investigación.

### **Algoritmo de los mínimos cuadrados**

El criterio de los mínimos cuadrados que se emplea para el análisis de inversión requiere como dato de entrada la curva de dispersión. También se requiere ingresar un modelo de suelo inicial con parámetros como la velocidad de la onda de corte ( $V_s$ ), la velocidad de onda de compresión ( $V_p$ ) o módulo de poisson, y el espesor de los estratos. De los parámetros mencionados el valor de  $V_s$  y los espesores de los estratos son los que tienen un efecto más significativo en la convergencia del algoritmo (Xia, et al., 1999). Un valor inicial puede calcularse asumiendo que  $V_s$  a la profundidad  $Z_f$  es 1.09 veces la medida de la velocidad de fase a la frecuencia donde la longitud  $\lambda_f$  satisface la siguiente relación:  $Z_f = a \lambda_f$  (Stokoe II, et al., 1994). El coeficiente “a” sólo cambia ligeramente con la frecuencia y se ha deducido empíricamente (Park, et al., 1999).

Uno de los algoritmos de mínimos cuadrados es el de Occam que es un algoritmo donde el error de la raíz cuadrada media (RMS) entre las curvas de dispersión experimental y teórica se minimiza mientras se mantiene la máxima suavidad del modelo (Constable, et al., 1987). El algoritmo realiza múltiples iteraciones hasta que el error sea el mínimo posible y para esto se introduce un modelo inicial de suelo con parámetros para cada estrato ( $V_s$ ,  $\rho$ , espesor,  $\nu$  o  $V_p$ ), donde solo  $V_s$  se actualiza después de cada iteración y los otros parámetros permanecen inalterables. Posteriormente se calcula la curva de dispersión del suelo inicial y la compara con la curva experimental y así determina el valor de error (RMS). Para obtener una mejor aproximación se puede variar los espesores de los estratos para minimizar el error (RMS) y obtener una mejor aproximación del modelo. Los parámetros iniciales del suelo pueden tomarse de la literatura o de resultado de estudios previos. Este método de inversión converge a un resultado fiable incluso cuando el modelo inicial es significativamente diferente del modelo convergente.

Cuando el problema directo es no-lineal la función de ajuste tendrá múltiples mínimos locales. Esto implica que los métodos iterativos puedan identificar un mínimo local como un mínimo global lo que dependerá del modelo inicial seleccionado. La no-unicidad es un fenómeno común en problemas inversos y se puede enfrentar seleccionando un buen modelo inicial y que no siempre es sencillo, por lo que estos métodos no son apropiados cuando la no-linealidad es severa (Joh, 1996) (Sambridge, 2001) (Wathelet, 2008).

## Algoritmo de optimización *Neighbourhood Algorithm NA*

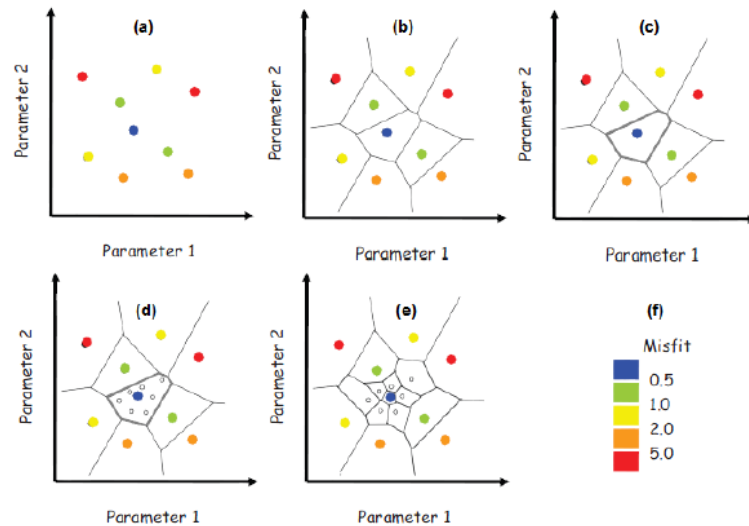
Uno de los algoritmos que se utiliza para el análisis de inversión es el algoritmo de optimización global (*Neighbourhood Algorithm NA*) (Wathelet, 2008) que está implementado en el programa Geopsy (Wathelet, 2011). Este algoritmo es un método de búsqueda directa estocástico que pertenece a la misma familia que los algoritmos genéticos. En comparación con una simulación básica Monte Carlo estos enfoques tratan de guiar la generación aleatoria de muestras con los resultados obtenidos con las muestras anteriores. Las áreas donde se puede encontrar soluciones que no son tan aproximadas son menos muestreadas que las áreas donde hay soluciones más aproximadas. Otros métodos requieren varios parámetros de ajuste para controlar el equilibrio entre la explotación y la exploración. Estos consiguen una convergencia rápida a un mínimo de la función de desajuste y realizan una investigación lenta de casi todos los mínimos locales para encontrar un global o identificar los mínimos equivalente.

La Figura 2.14 sintetiza el procedimiento de inversión que emplea el algoritmo. En comparación a otras estrategias de inversión con gradientes, la ventaja del método es que no requiere de un punto inicial y explora muy bien el espacio factible de combinaciones de parámetros.

Primero se genera una semilla inicial aleatoria que explora homogéneamente el espacio de una cantidad de muestras iniciales ( $N_{s0}$ ) distribuidas o no al azar sobre el espacio de parámetros (Figura 2.14a). Después se evalúa el ajuste de los modelos de semillas seleccionando los mejores ( $N_r$ ) y se subdivide el espacio en celdas (Figura 2.14b), para luego seleccionar la celda que contenga el mejor ajuste (Figura 2.14c). A continuación se generan nuevos modelos aleatorios al interior de la mejor celda ( $N_s$ ) (Figura 2.14d) y se vuelve a evaluar los desajustes. Posteriormente, se repite la subdivisión del espacio en celdas (Figura 2.14e), donde se agregan  $N_s/N_r$  modelos por celdas. La geometría de las celdas de Voronoi inicial es modificado para incluir los nuevos  $N_s$  modelos. Este proceso se repite  $it_{max}$  veces hasta alcanzar un modelo que tenga curvas de dispersión teóricas tan cercanas como se pueda a las obtenidas en terreno. Esta cercanía se evalúa a través del error o diferencia entre el modelo analítico y los datos empíricos llamado *misfit* (Figura 2.14f). El valor de *misfit* se calcula con la ecuación 2.28:

$$\text{Desajuste o Misfit} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_F} \frac{(x_{r,i} - x_{c,i})^2}{\sigma_i^2 n_F}} \quad (2.28)$$

Los valores necesarios para calcular el *misfit* vienen de la curva de dispersión que está compuestas por un número finito de frecuencias ( $n_F$ ), un valor promedio ( $x_{c,i}$ ) y una desviación estándar asociada ( $\sigma_i$ ) a cada frecuencia. La desviación estándar es calculada únicamente en los ensayos pasivos a través de un análisis estadístico que realiza Geopsy.



**Figura 2.14:** Procedimiento de Inversión según el algoritmo NA (Adaptado de (Sambridge, 2001))

#### 2.5.4. Aplicación del MASW para procesar los datos de (Nazarian, et al., 2010).

El objetivo de la presente sección es realizar un análisis comparativo entre dos de las metodologías que usualmente se emplean para el procesamiento del ensayo MASW. Esto permitirá afianzar el conocimiento práctico en el cálculo de la curva de dispersión y el análisis de inversión de los datos tomados de campo. Para realizar este análisis se emplearon datos del ensayo MASW que se tomaron en el *National Geotechnical Experimental site at Texas A & M University* (EEUU) y que fueron publicados en el informe del *Surface Wave Benchmarking Symposium -2010* (Nazarian, et al., 2010).

Para el procesamiento de los datos se empleó el programa RadexPro (DECO Geophysical, 2014) y Geopsy (Wathelet, 2011). El programa RadexPro trabaja con la metodología de Park para calcular la curva de dispersión y el algoritmo de mínimos cuadrados de Occam para realizar el análisis de inversión. Mientras que el programa Geopsy trabaja con la transformada F-K para determinar la curva de dispersión y con un algoritmo de vecindario (*Neighbourhood*) para realizar el análisis de inversión.

Los resultados procesados con ambos programas se compararon con los resultados publicados en el artículo “*Surface Wave Benchmarking Exercise: Methodologies, Results and Uncertainties*” de (Cox & Wood, 2011) quienes también procesaron los datos de campo de MASW de (Nazarian, et al., 2010). (Cox & Wood, 2011) emplearon el método *Beamformer-FDBM* (Zywicki, 1999) donde los datos tomados a cada ubicación de la fuente se combinaron para determinar la curva de dispersión con una buena aproximación. Seleccionaron el modo fundamental para realizar el análisis de inversión empleando el algoritmo de mínimos cuadrados para determinar el perfil de Vs.

#### **Configuración del ensayo MASW de (Nazarian, et al., 2010).**

En los ensayos MASW se emplearon 62 sensores igualmente espaciados a 2 ft (0.61 m) que da una línea de 122 ft de longitud total. Se establecieron dos arreglos separados

llamados MASW0-122 y MASW98-220. Se empleó un martillo como fuente para generar la onda mecánica y en la configuración del ensayo se consideraron 5 posiciones del martillo respecto de los sensores. La distancias del martillo al primer sensor fue de 10, 20, 30, 40 y 50 ft (3.05, 6.10, 9.15, 12.2 y 15.25 m), cada una corresponde a un *shot*, estando ubicado el *shot 1* a una distancia de 10ft y así sucesivamente. Los sensores que se emplearon fueron geófonos de 4.5 Hz de frecuencia natural y las señales fueron muestreadas a una frecuencia de muestreo: 1.28 kHz. En la presente investigación solo se procesará el *shot1* de cada uno de los arreglos.

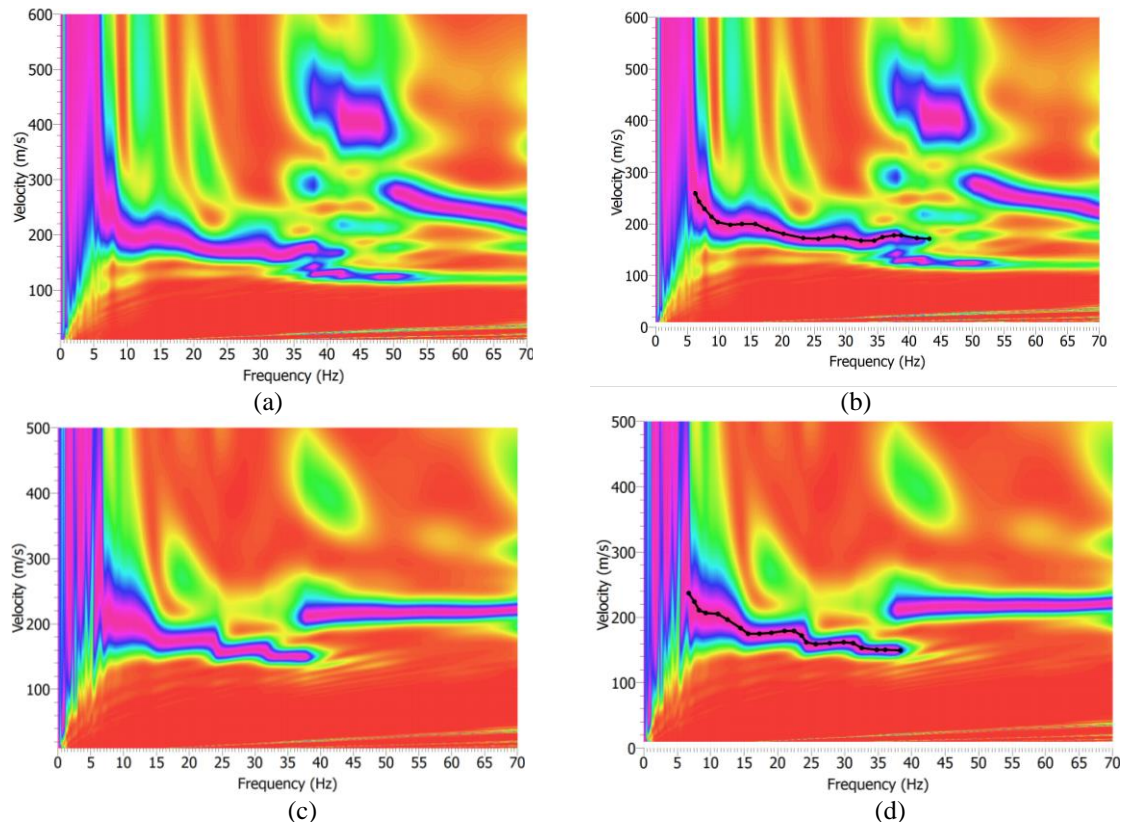
### **Procesamiento de los datos con Geopsy**

El procedimiento estándar para interpretar los datos del MASW empieza con la inspección de las señales de cada *shot* en el dominio del tiempo y de la frecuencia con el fin de eliminar las señales que se han registrado con ruido. Una vez que se tiene el registro final de las señales, los datos del espacio – tiempo (t-x) se transforman al espacio frecuencia – número de onda (f-k) el que también se puede observar como una gráfica de velocidad de fase vs. Frecuencia. Para incorporar el efecto de la atenuación y la divergencia esférica en medios estratificados, las señales (t-x) deben ser normalizadas. Las señales pueden ser normalizadas en función a  $1/dx$ ,  $1/\sqrt{dx}$  (dx es el espaciamiento entre sensores) o en función de la máxima amplitud registrada en cada receptor. Esta última es la más recomendada porque brinda una mejor resolución de la imagen de dispersión.

En la Figura 2.15 se observa la imagen de dispersión del modo fundamental y está definida para un rango de frecuencias entre 5Hz a 45 Hz, se encuentran resultados difusos menores a los 5Hz y la presencia de un modo alto a partir de los 40 Hz para ambos arreglos analizados. Las velocidades se encuentran definidas para un rango entre 150m/s y 260m/s aprox.

El siguiente paso fue seleccionar la curva de dispersión definida como la velocidad de onda Rayleigh en función de la frecuencia. Se selecciona manualmente en los gráficos de la izquierda siguiendo la zona de color rosado que representa la zona de mayor concentración de energía. Se definieron los límites superior e inferior donde la curva de dispersión brindará resultados confiables. Por ejemplo para el arreglo MASW 0-122 el límite izquierdo de la curva se puede calcular para una  $f_1=7$  Hz y  $\lambda_{\max}=37.2$ m resultando  $C_1= 261$  m/s, y considerando  $f_2=40$ Hz y  $\lambda_{\min}=0.61$ m, resultando  $C_2= 24.2$ m/s. Siendo los valores inferiores de la curva que se han seleccionado mayores al límite inferior.

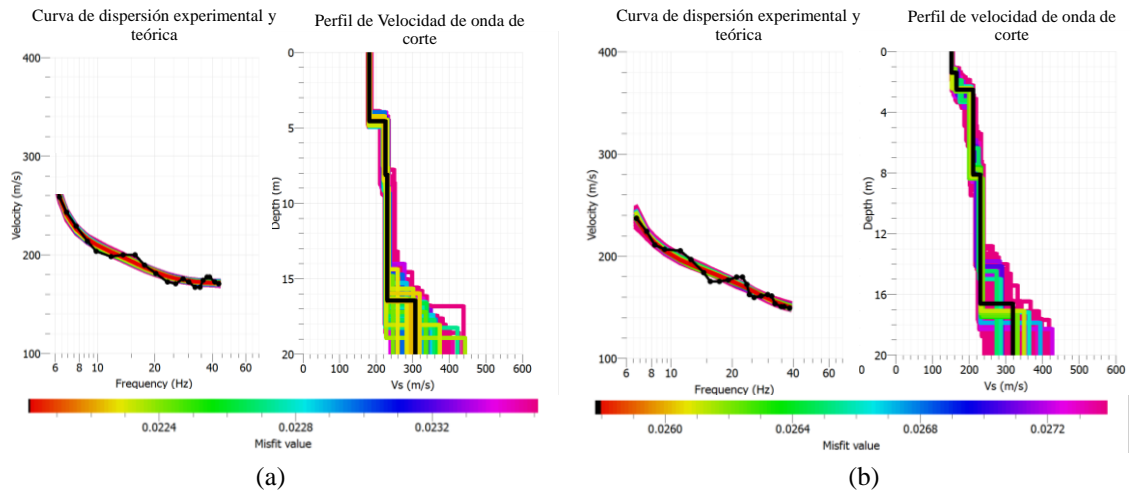
La Figura 2.15a muestra la imagen de dispersión donde se observa la presencia del modo fundamental del suelo y los modos altos. Estos últimos se pueden deber a la naturaleza inversamente dispersiva del perfil. En la Figura 2.15b se muestra la curva de dispersión del modo fundamental seleccionado como puntos en una línea negra para el *shot 1* del arreglo MASW 0-122. En la Figura 2.15b se muestra como una línea negra punteada la curva de dispersión que se seleccionó manualmente para el posterior análisis de inversión.



**Figura 2.15:** Imagen de dispersión y (b) Curva de dispersión seleccionada para el *shot* 1 del arreglo (a), (b) MASW0-122 y para el arreglo (c), (d) MASW 98-220.

A continuación se procedió con la inversión de la curva de dispersión del modo fundamental empleando la técnica del algoritmo del vecindario que viene implementada en el módulo *Dinver* del programa Geopsy. Se trabajó con un modelo de suelo de 5 estratos más el semiespacio para tratar de obtener una mejor aproximación. Cada uno de los parámetros fue definido en un rango a excepción de la densidad del suelo que se fijó en  $1.8 \text{ gr/cm}^3$ . Cada estrato está definido con los parámetros físicos del suelo como son ( $V_s$ ,  $V_p$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ). Según lo recomendados por diferentes autores la máxima profundidad hasta donde los resultados son confiables está definido como  $Z_{\max} \cong \lambda_{\max}/2$ , donde  $\lambda_{\max}$  es la máxima longitud de onda que se puede aproximar a la longitud de todo el arreglo se señales analizadas. En este caso la longitud del arreglo analizado en el *shot* 1 es 37.2m, entonces  $Z_{\max} \cong 19\text{m}$ .

Los valores de velocidad de onda de corte  $V_s$  calculados para ambos arreglos se muestran en la Figura 2.16. Tanto en los resultados de  $V_s$  y curva de dispersión los colores indica los valores de *misfit* de los diferentes modelos que se encuentran después de las múltiples iteraciones, siendo los modelos más aproximados aquellos que presentan menor valor de *misfit*.

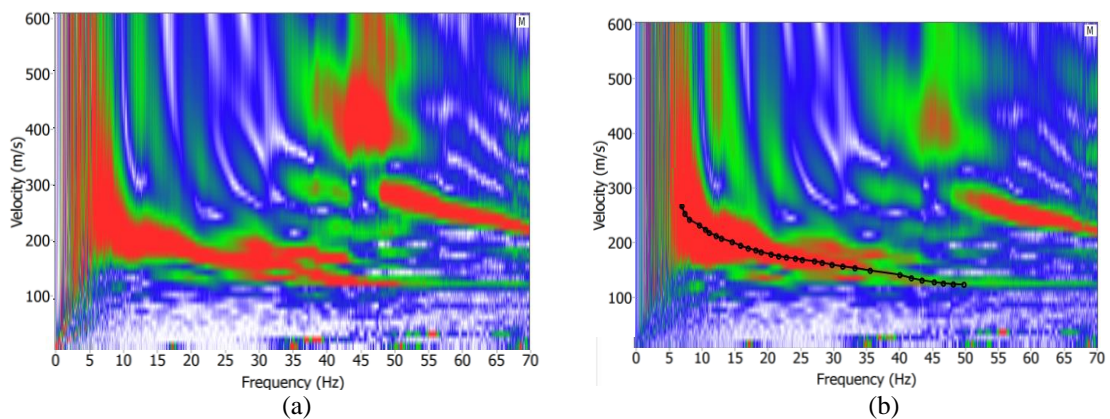


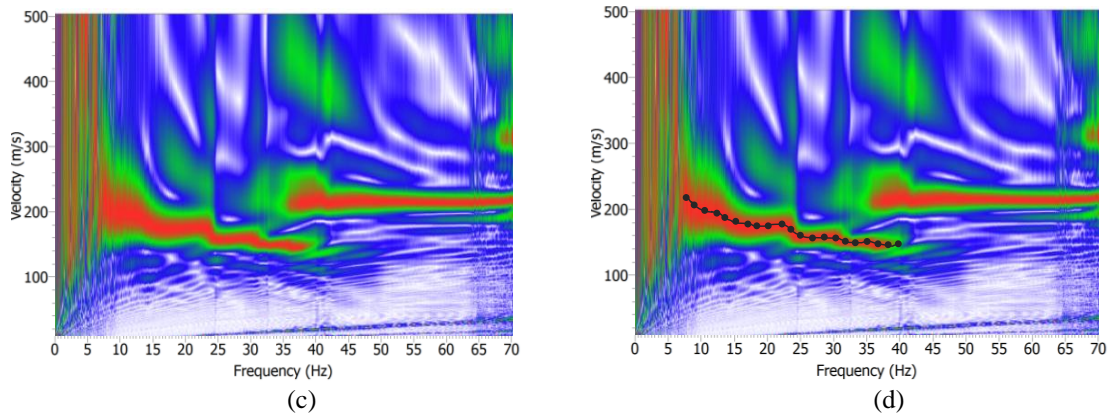
**Figura 2.16:** Comparación entre la curva de dispersión experimental (línea con puntos negros) y curvas teóricas, y los diferentes modelos de velocidad de onda de corte obtenida del arreglo (a) MASW0-122 y (b) MASW 98-220

### Procesamiento de los datos con RadexPro

Como paso inicial se procesaron los datos de las señales de cada sensor aplicando la transformada de Park que se describió anteriormente. La información de entrada fue el registro de señales en el tiempo, la ubicación relativa de cada señal respecto de la fuente y la frecuencia de muestreo. Las imágenes de dispersión obtenidas para cada arreglo se muestran en la Figura 2.17. En los resultados de las imágenes de dispersión se observa que el modo fundamental está definido para un rango de frecuencias entre 5Hz a 55 Hz para el arreglo MASW0-122 y en un rango de 5Hz a 35Hz para el arreglo MASW98-220. Se encuentran resultados difusos menores a los 5Hz y la presencia de un modo alto a partir de los 40 Hz para ambos arreglos analizados. Las velocidades se encuentran definidas para un rango entre 140m/s y 250m/s aprox.

El siguiente paso fue seleccionar la curva de dispersión definida como la velocidad de onda Rayleigh en función de la frecuencia. Se selecciona manualmente en los gráficos de la izquierda siguiendo la zona media de color rojo que representa la zona de mayor concentración de energía. Los límites superior e inferior de la curva de dispersión se definen siguiendo las recomendaciones que se mencionaron en el procesamiento con el Geopsy.

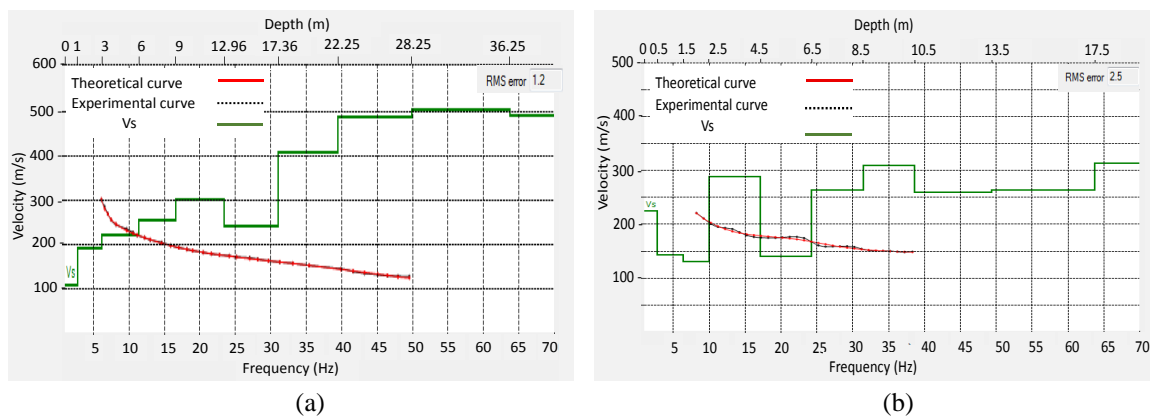




**Figura 2.17:** Imagen de dispersión y Curva de dispersión seleccionada para el shot 1 del arreglo (a), (b) MASW0-122 y (c),(d) MASW98-220

El siguiente paso fue realizar el análisis de inversión, para lo cual se exportó la curva de dispersión definida anteriormente. Como datos de entrada se necesita la curva de dispersión experimental y un modelo de suelo inicial. Se empleó un modelo de suelo de 10 estratos para lograr una mejor aproximación con una máxima profundidad del semiespacio determinada en función la máxima longitud de onda que se espera y que está relacionada con la longitud del arreglo la línea de sensores. Considerando que  $\lambda_{\max} \cong 37.2\text{m}$ , se hizo una prueba considerando  $Z_{\max} \cong 37.2\text{m}$  para el arreglo MASW0-122 y  $Z_{\max} \cong 19\text{m}$  para el arreglo MASW98-220. Se ingresó un modelo de suelo inicial con un módulo de poisson de 0.35 y densidad de  $1.8 \text{ gr/cm}^3$  para todos los estratos. Para el proceso iterativo se consideraron como límite 10 iteraciones para definir el modelo final de Vs. Este número de iteraciones relativamente pequeño se eligió para minimizar el efecto del cálculo computacional (problema de no-unicidad). El programa Radex permite hacer una variación en los parámetros de profundidad y velocidad de onda S de múltiples estratos, hasta que se logra el mejor ajuste de una curva de dispersión teórica con la experimental.

En la Figura 2.18 se observa los resultados de perfil de velocidad de onda de corte y la comparación de las curvas de dispersión teórica y experimental calculadas para ambos arreglos. El perfil de Vs determinado en el arreglo MASW98-220 es típico de un suelo inversamente dispersivo.

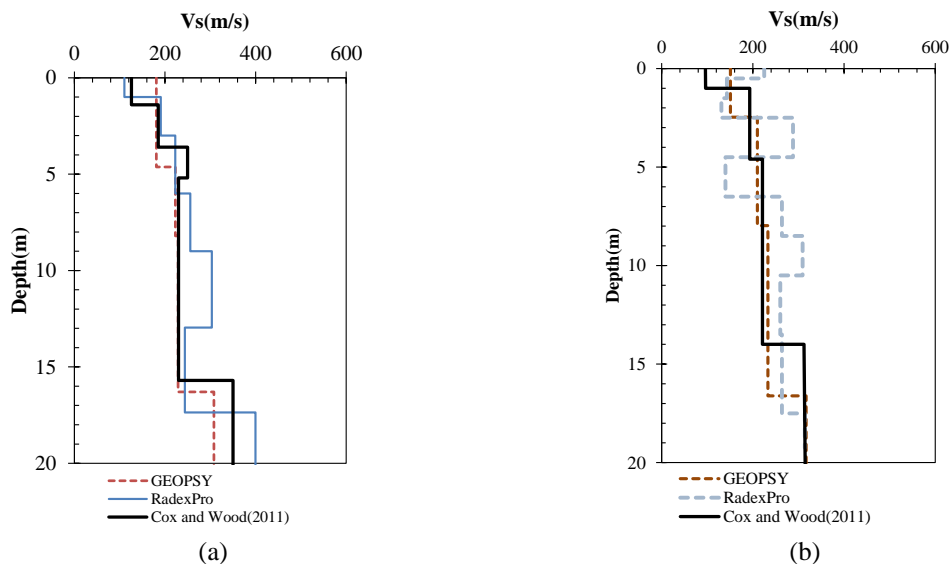


**Figura 2.18:** Velocidad de onda de corte obtenida del arreglo (a) MASW0-122 y (b) MASW98-220

## Comparación de resultados

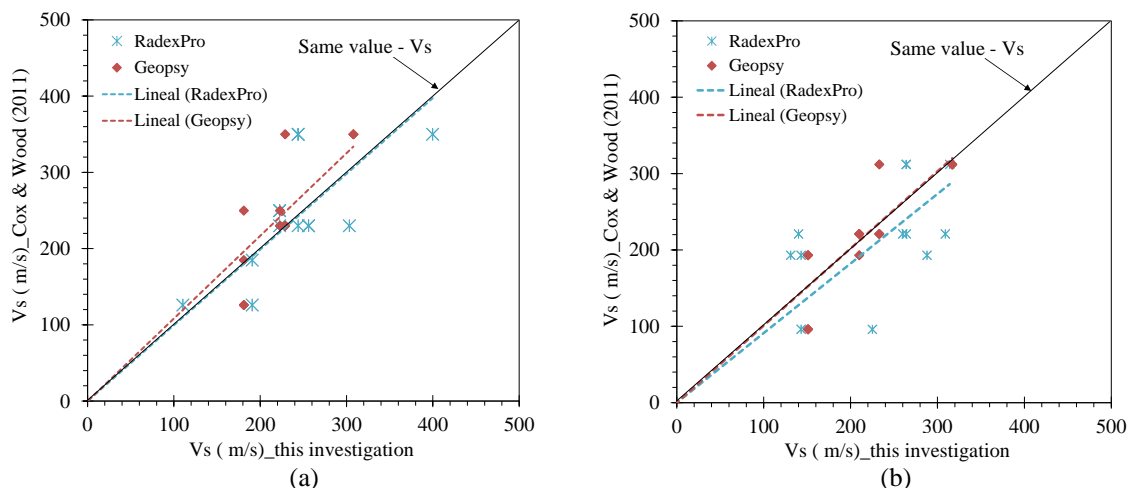
Al comparar las imágenes de dispersión calculadas con ambos métodos (Figura 2.15 y Figura 2.17) se observa que la imagen calculada el método F-K (Geopsy) es un poco más clara que la calculada con el método de Park (RadexPro). Tener una imagen de dispersión clara facilita la selección de la curva de dispersión.

En la Figura 2.19 se muestra una comparación de los perfiles Vs calculados con los dos métodos tratados en la presente investigación versus los resultados obtenidos por la referencia (Cox & Wood, 2011) para cada arreglo. En la Figura 2.19a se observa que los perfiles de Vs calculados en la presente investigación con las metodologías de ambos programas se aproximan, excepto desde los 0m hasta 1.5m aprox. donde los resultados del programa Geopsy difieren de la referencia y entre los 6m y 12m donde los resultados calculados con RadexPro resultan relativamente mayores a los de la referencia. En la Figura 2.19b se observa que a partir de los 17m los valores de Vs calculadas con ambos métodos son similares a los de la referencia, pero en el resto de profundidad los resultados de Geopsy son los que mejor se aproximan a los resultados de (Cox & Wood, 2011)



**Figura 2.19:** Comparación de Vs para el arreglo (a) MASW 0-122 y (b) MASW 98-220

En la Figura 2.20 se presenta dos gráficas de comparación de velocidad de onda de corte obtenidas con cada método tratado en la tesis graficados en el eje X versus los resultados de la referencia graficados en el eje Y. La línea en diagonal a 45° representa la zona donde los valores calculados con uno de los métodos (programas) son iguales a los de la referencia. En el arreglo MASW 0-122 (Figura 2.20a) se observa que los resultados calculados con RadexPro se aproximan mejor a la línea diagonal que los resultados de Geopsy. Caso contrario sucede en para el arreglo MASW 98-220 (Figura 2.20b) donde los resultados de Vs calculados con Geopsy se acercan más a la línea diagonal que el programa RadexPro. Con estos resultados se puede decir que ambos métodos brindan resultados aproximados, no permitiendo decir que uno es mejor que el otro, pero ambos son buenas herramientas para calcular la velocidad de onda de corte.



**Figura 2.20:** Velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) calculadas en la presente investigación versus la calculada por Cox & Wood (2011) para el arreglo (a) MASW 0-122 y (b) MASW 98-220

### 2.5.5. Procedimiento del ensayo MASW en los casos de estudio

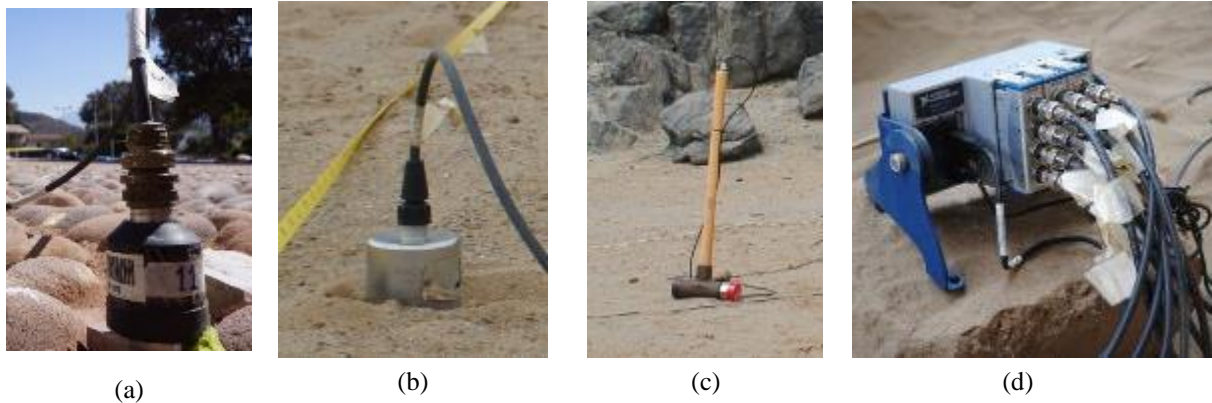
Para realizar los ensayos MASW en los casos de estudio de la presente investigación se tomaron en cuenta las limitaciones en los equipos (número de sensores y longitud de cables coaxiales) para definir del protocolo de ensayos. El protocolo consistió en establecer la cantidad de líneas de registro del ensayo así como su máxima longitud correspondiente. Adicionalmente, la disponibilidad y regularidad del terreno fue otro de los factores considerados en la definición de las líneas ensayadas.

#### Equipos empleados

Para realizar los ensayos MASW se realizaron arreglos con 8 sensores y 11 sensores debido a la disponibilidad de los sensores que se tenía en cada caso de estudio. Los sensores utilizados fueron acelerómetros piezoeléctricos (PCB Piezotronics) que tienen una sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 Hz – 1000 Hz (Modelo 393B12 - ver Figura 2.21a) y 0.1 Hz -200 Hz (Modelo 393B31-ver Figura 2.21b). Los arreglos de 8 sensores se realizaron con los acelerómetros Modelo 393B31, mientras que los arreglos de 11 sensores se realizaron con los sensores Modelo 393B12. Los acelerómetros pueden ser utilizados en lugar de los geófonos comúnmente utilizados dado a su alta sensibilidad, alta resolución y respuesta lineal en el rango de frecuencias debido a que provee el incremento de la confiabilidad en las medidas de la atenuación (Zywicki, 1999).

Conociendo que las fuentes impulsivas son las más baratas y convenientes, en el presente estudio se empleó un martillo instrumentado de 5.5 kg como fuente sísmica para golpear sobre una plancha de acero de 200 mm de diámetro y 16 mm (5/8 in) de espesor (ver Figura 2.21c).

Los datos registrados por los acelerómetros fueron recolectados utilizando un sistema de adquisición de datos National Instruments de 12 canales (Modelo NI 9234 -ver Figura 2.21d) y una computadora portátil para almacenar la información. En la Figura 2.22 se muestra la distribución típica de los equipos realizada en campo para el desarrollo de los ensayos MASW en los diferentes casos de estudio.



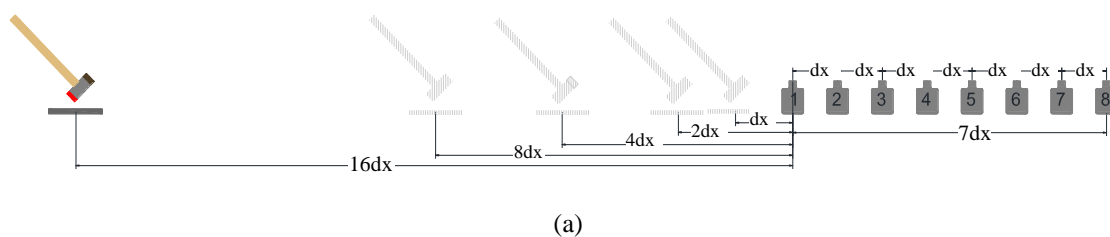
**Figura 2.21:** Equipos para la ejecución de ensayos MASW: (a) y (b) acelerómetro piezoeléctrico, (c) martillo de impacto, y (d) sistema de adquisición de datos.

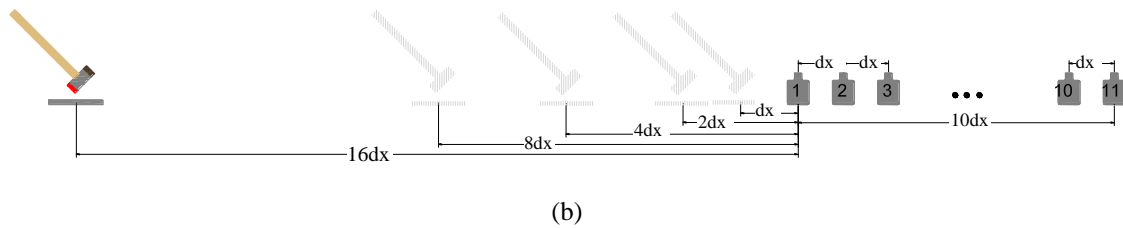


**Figura 2.22:** Configuración de los equipos realizada en campo para el ensayo MASW

### Configuración de arreglos y Registro de la señal

El tiempo total de muestreo para cada registro de datos fue de 1 s y se muestreó a una frecuencia de 12.8 kHz. El protocolo del ensayo implica golpear con un el martillo sobre la plancha de acero en 5 diferentes ubicaciones. La ubicación del martillo para realizar el primer golpe fue a una distancia igual a 16 veces la distancia del espaciamiento entre sensores ( $dx$ ). Las otras cuatro ubicaciones del martillo fueron a una distancia de  $8dx$ ,  $4dx$ ,  $2dx$  y  $dx$  del primer sensor. A cada ubicación de la plancha se registraron al menos 25 golpes con el martillo. El esquema de los ensayos MASW se muestra en la Figura 2.23.



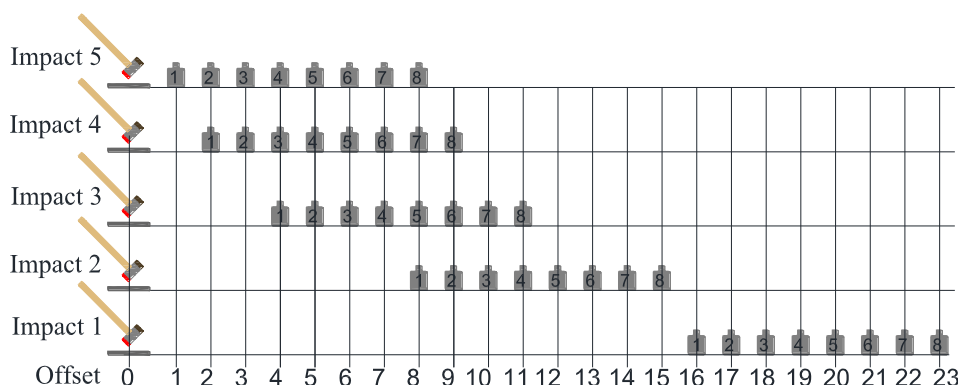


**Figura 2.23:** Esquema de línea de registro para ensayos MASW para un arreglo de (a) 8 sensores y (b) 11 sensores.

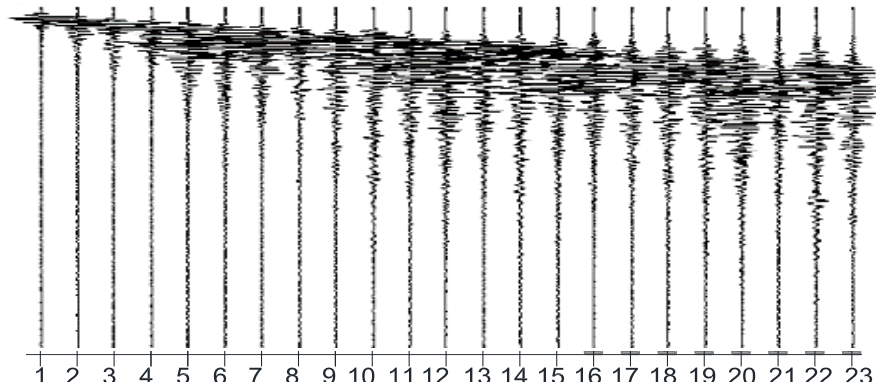
### Procesamiento de las señales

Un procesamiento inicial de los datos de campo consistió en realizar la suma de las señales (*stacking*) tomadas en cada acelerómetro para cada ubicación de la fuente empleando una rutina en MATLAB. Esto se realizó con la finalidad de eliminar el ruido en las señales y obtener una señal representativa medida en cada acelerómetro para cada ubicación del martillo. Finalmente para las 5 posiciones de martillo se obtuvieron 40 señales cuando se realizó el arreglo con 8 sensores y 55 señales con el arreglo de 11 sensores.

En la Figura 2.24 se observa la distancia de la posición del martillo a cada sensor en el arreglo de 8 sensores para las 5 posiciones del martillo que se han utilizado en este estudio. Al considerar constantes los estratos del suelo a lo largo de cada línea ensayada, algunas de las señales deberían ser muy parecidas a otras debido a que estas señales registradas corresponden a la misma distancia desde el martillo al sensor. En estos casos para realizar el procesamiento se escogió la mejor señal. Por ejemplo la señal del sensor 2 del *Impact 5* y la señal del sensor 1 del *Impact 4* deberían ser similares debido a que tienen la misma distancia del sensor a la posición del martillo. Continuando con el proceso seleccionado, de las 40 señales obtenidas después del *stacking* del arreglo de 8 sensores solo se emplearon 23 señales y 26 señales del arreglo de 11 sensores para generar un registro Walkaway (WA) (Figura 2.25). Es de conocimiento que al emplear un registro Walkaway (WA) la curva de dispersión para frecuencias bajas mejora debido a la mayor longitud que se logra al crear este registro tal como es demostrado por otros autores (Dobrin & Sawl, 1988) (Duffy, 2008) (Vincent, et al., 2006).



**Figura 2.24:** Arreglo de fuente-acelerómetros para registro WA ( 8 acelerómetros)



**Figura 2.25:** Registro *Walkaway* con 23 señales.

Para el cálculo de la curva de dispersión y análisis de inversión se emplearon los programas RadexPro (DECO Geophysical, 2014) y Geopsy. (Wathelet, 2011).

## 2.6. Refracción sísmica

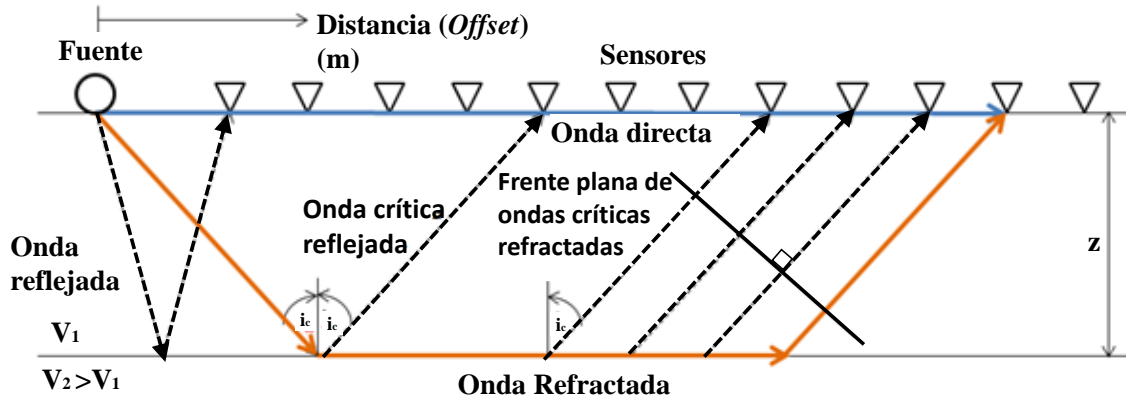
La refracción sísmica es una técnica que se enmarca dentro de los métodos de exploración geofísica que estudian la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente y establece una relación con la configuración del suelo en estudio.

Se aplica a estudios geológicos, geotécnicos, hidrológicos, de exploración minera y petrolera y a las investigaciones arqueológicas. Su objetivo es la obtención del perfil geológico, la detección de mantos de roca, nivel freático, estratigrafía, etc. Adicionalmente se la emplea para la medición indirecta de la rigidez de los estratos ensayados.

La respuesta del ensayo se visualiza mediante la curva de arribos que corresponde a un modelo de capas que cumple las siguientes hipótesis:

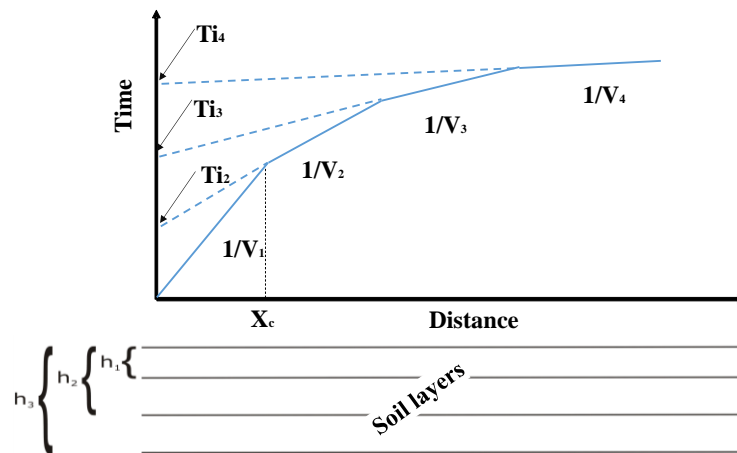
- Analogía con los conceptos de óptica. Debe cumplir la Ley de Snell. (Dobrin & Sawl, 1988).
- Se cumple que:  $V_p > V_s > V_r$ .
- El frente de ondas P es esféricos.

En este ensayo se calculan los tiempos que toma en propagarse las ondas de compresión generadas en la superficie hacia los distintos sensores alineados con la fuente (martillo) que genera la onda. En los sensores más cercanos a la fuente la primera llegada corresponde a la onda directa, mientras que para los sensores más lejanos la onda refractada podría llegar antes siempre y cuando  $V_2 > V_1$  (Figura 2.26).



**Figura 2.26:** Esquema del ensayo de refracción sísmica (Adaptado de (Humire, 2013))

De esta manera se puede graficar el tiempo de la primera llegada de la onda para cada distancia a la que se ubica cada sensor (curva de arriba). Las diferentes pendientes de los tramos de la curva graficada estarán determinadas por las velocidades de cada estrato de suelo y los tiempos en los que se produce cada cambio de pendiente permiten determinar los espesores de los estratos (Figura 2.27). Esto permite determinar suelos con estratos planos. Para incluir la inclinación de los estratos en el modelo del suelo se debe generar ondas sísmicas en ambos extremos de la línea de arreglo del ensayo. Más detalle del procesamiento de la información de este ensayo se puede encontrar en (Kramer, 1996) y (ASTM D5777, 2011).



**Figura 2.27:** Gráfico de los tiempos de llegada de la primera onda para cada distancia del sensor (curva de arriba)

Para determinar la profundidad de los estratos se iguala el tiempo de arribo entre la onda directa y la onda refractada para alcanzar el mismo punto de la superficie. En el caso del primer estrato se tiene:

$$T_{\text{onda directa}} = T_{\text{onda refractada}} \quad (2.29)$$

En términos de velocidad y distancia crítica ( $X_c$ ) se tiene la ecuación 2.30:

$$\frac{X_c}{V_1} = \frac{2h_1}{V_1 \cos(i_c)} + \frac{X_c - 2h_1 \tan(i_c)}{V_2} \quad (2.30)$$

Para calcular el espesor del primer estrato, y conociendo por la ley de Snell que  $\sin(i_c) = V_1/V_2$  la ecuación 2.30 se puede simplificar a la siguiente expresión:

$$h_1 = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} = \frac{T_{i2} V_1}{2 \cos(\sin^{-1} V_1/V_2)} \quad (2.31)$$

En el caso de un suelo con tres estratos horizontales las ecuaciones para calcular los espesores de los estratos se tiene la ecuación

$$h_2 = \frac{\left[ T_{i3} - T_{i2} \frac{\cos(\sin^{-1} V_1/V_3)}{\cos(\sin^{-1} V_1/V_2)} \right]}{2 \cos(\sin^{-1} V_2/V_3)} + h_1 \quad (2.32)$$

$$h_3 = \frac{\left[ T_{i4} - T_{i2} \frac{\cos(\sin^{-1} V_1/V_4)}{\cos(\sin^{-1} V_1/V_2)} - \frac{2h_2 \cos(\sin^{-1} V_2/V_4)}{V_2} \right] V_3}{2 \cos(\sin^{-1} V_3/V_4)} + h_1 + h_2 \quad (2.33)$$

## 2.6.1. Procedimiento del ensayo de refracción sísmica en los casos de estudio

La investigación con refracción sísmica se basó en la utilización de la información tomada en campo durante la ejecución del ensayo MASW. Los registros *Walkaway* (WA) de cada línea de MASW se emplearon como una línea de refracción sísmica con 26 sensores (igualmente espaciados) y un punto de impacto. Se empleó el programa Geopsy para determinar el tiempo de propagación del frente de onda desde el punto de impacto a cada uno de los sensores. Se utilizó una rutina en Excel para determinar la curva de tiempo de viaje vs tiempo y así calcular la  $V_p$  según las recomendaciones de la ASTM D5777 (ASTM D5777, 2011). La velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) se calcula empleando la relación existente entre  $V_s$ ,  $V_p$  y el módulo de poisson ( $\nu$ ), que se muestran en la ecuación 2.15 (Kramer, 1996).

## 2.7. Cociente espectral H/V

Este método fue propuesto por (Nogoshi & Igarashi, 1970) y posteriormente fue ampliamente estudiado por Nakamura (Nakamura, 1989). El ensayo consiste en estimar la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de las vibraciones ambientales (razón espectral H/V). Estas vibraciones en su conjunto hacen vibrar al depósito de suelos a su frecuencia fundamental la cual puede ser identificada como el valor pico de la razón espectral H/V. Por ello, se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de microzonificación sísmica tanto en el Perú como a nivel internacional. (Aguilar, et al., 2012) (Quispe, et al., 2012) (Bernal & Tavera, 2008) (Ritta, et al., 2012) (Suarez, et al., 2012) (Leyton, et al., 2010) (Franklin, et al., 2006) (Jaramillo, et al., 2012).

De acuerdo a la hipótesis de Nakamura, los microtemblores corresponden en su mayoría a ondas de Rayleigh, y la amplificación por efectos de sitio se debe a la existencia de una capa de suelo sobre un semi-espacio de mayor rigidez. Debido a esto la técnica del cociente espectral se basa en que la componente vertical del movimiento medida en la superficie no es amplificada al atravesar el suelo. Por esto se puede considerar que el cociente

entre la componente horizontal y la vertical es un buen estimador del efecto de sitio. Nakamura propuso que esto mismo se podía generalizar a lo que se conoce como ruido ambiental. El ruido ambiental es la superposición de las vibraciones del suelo producidas por efectos naturales (viento, tormentas, mareas, olas, etc.) o artificiales (tráfico de vehículos, paso de peatones, maquinaria, vibraciones de las estructuras civiles, ferrocarriles, etc.).

Es posible estimar el efecto de las ondas de Rayleigh en la componente vertical a través de la ecuación 2.34:

$$A_R = \frac{V_s}{V_B} \quad (2.34)$$

Donde  $V_s$  y  $V_p$  son los espectros de amplitud de las componentes verticales del movimiento en la superficie y el basamento rocoso, respectivamente. Por otro lado, (Nakamura, 1989) define una estimación del efecto de sitio ( $A_E$ ) a través de la razón entre las componentes horizontales del movimiento en superficie ( $H_S$ ) y la roca ( $H_B$ ).

$$A_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (2.35)$$

Al suponer que las componentes horizontal y vertical del movimiento son alteradas por ondas Rayleigh en la misma medida, se propone una función de efecto de sitio modificada ( $A_M$ ) que compense la alteración sufrida producto de las ondas superficiales:

$$\frac{A_E}{A_R} = \frac{\frac{H_S}{V_s}}{\frac{H_B}{V_B}} \quad (2.36)$$

Debido a que se considera que las vibraciones ambientales en un afloramiento rocoso no presentan una dirección predominante (Nakamura, 1989), la amplitud de las componentes horizontal y vertical del movimiento a nivel de la roca deberían ser similares. Por ello, la estimación del efecto de sitio se estima finalmente de acuerdo a la ecuación 2.37:

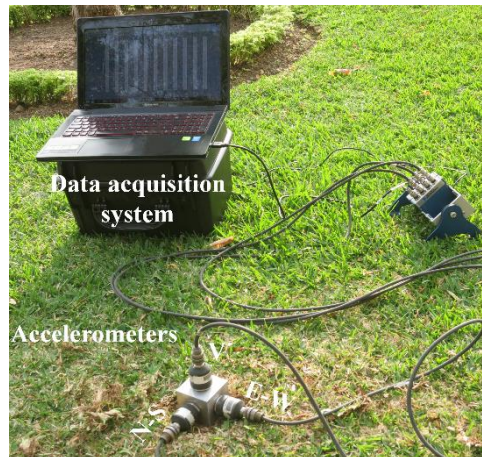
$$A_E = \frac{H_S}{V_s} \quad (2.37)$$

### 2.7.1. Procedimiento del ensayo H/V en los casos de estudio

En las inspecciones realizadas en el presente estudio se emplearon tres acelerómetros con una sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 Hz – 1000 Hz (Modelo 393B12, ver Figura 2.21a) colocándolas en un arreglo triaxial. Para el registro de la información se utilizó un sistema de adquisición de datos National Instruments de 12 canales (Modelo NI 9234, ver Figura 2.21d) y una computadora portátil para almacenar la información. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante un tiempo máximo de 30 minutos.

Como puede observarse en la Figura 2.28 los 3 acelerómetros se montaron sobre un cubo de aluminio que se apoya en el suelo con el objeto de lograr un arreglo triaxial y medir en las 3 direcciones necesarias para el ensayo. En los sitios donde se encontró césped sobre el terreno, éste fue retirado para poder ubicar el instrumento directamente sobre la superficie

del terreno y evitar así posibles errores en las mediciones, como lo recomienda la literatura especializada (Chatelain, et al., 2008).



**Figura 2.28:** Configuración de los equipos en campo para el ensayo H/V

El procesado de las mediciones tomadas en campo se realizó utilizando el programa Geopsy (Wathelet, 2011). Con este programa se importan las señales registradas de cada sensor (formato \*.txt) permitiendo realizar las siguientes tareas como parte del procesamiento:

- Configurar la frecuencia de muestreo y la dirección de cada señal (V,  $H_{E-O}$ ,  $H_{N-S}$ ).
- Selección automática de ventanas basada en parámetros definidos por el usuario (ejm: empleando el algoritmo *antitrigger*) y la eliminación de ventanas manualmente.
- Cálculo de la transformada de Fourier y suavizado de la misma para cada ventana (ejm. Suavizado con la función de Konno y Ohmachi).
- Promedio de las dos componentes horizontales ( $H_{E-O}$ ,  $H_{N-S}$ ) empleando una media cuadrática.
- Cálculo de la relación H/V para cada ventana.
- Cálculo del promedio y desviación estándar de la relación H/V.

Con el objeto de conservar las partes más estacionarias del ruido ambiental y evitar así los transitorios frecuentemente asociados con fuentes puntuales (peatones, tráfico cercano, maquinaria en funcionamiento, etc.) el programa viene implementado con el módulo *antitrigger* para la selección automática de ventanas el cual detecta transitorios y los elimina del procesado.

El procedimiento *antitrigger* se basa en una comparación entre dos promedios de amplitudes de la señal analizada. Uno de ellos es un promedio de periodo corto (*sta*, por las siglas de *short term average*), es decir, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo corto de tiempo, denotado "*tsta*". El otro es un promedio de periodo largo (*lta*, por las siglas de *long term average*), es decir, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo largo de tiempo, denotado "*lta*".

Cuando el cociente  $sta/lta$  excede un umbral previamente establecido se considera que se detecta un “evento”. El funcionamiento de este módulo requiere que el usuario introduzca valores a diferentes parámetros.

Para el procesado de los datos se escogieron los valores que se resumen en la Tabla 2.2 que vienen por defecto en el programa:

**Tabla 2.2:** Parámetros empleados para el procesamiento de las señales.

Parámetro	Valor
Longitud de la ventana (sec.)	20
Solape de las ventanas (% de la longitud de la ventana)	10
Longitud de la ventana para el promedio de corto plazo (sec.)	1
Longitud de la ventana para el promedio de largo plazo (sec.)	25
Nivel mínimo para el umbral de $sta/lta$	0.5
Nivel máximo para el umbral de $sta/lta$	2
Suavizado de la curva H/V con la función de Konno y Ohmachi	40%

La modificación de estos parámetros en términos generales no tiene una influencia marcada en los valores del período fundamental obtenido y sólo pueden causarse leves corrimientos en el valor o modificaciones en la forma de los cocientes espectrales obtenidos (Ritta, et al., 2012).

## 2.8. Aplicación de ensayos geofísicos en estructuras patrimoniales

En los últimos años el uso de ensayos geofísicos para la exploración de suelos en estructuras patrimoniales ha ganado gran interés de la comunidad de ingeniería, arqueólogos e investigadores. Esto es debido al hecho que esas técnicas son no invasivas y proveen buena estimación de las propiedades de ingeniería del suelo y estratificación para evaluar su estado actual, condición estructural y para planear finalmente trabajos de intervención apropiados. En esta sección se presentan algunos casos de aplicación de ensayos geofísicos para la exploración de suelo en estructuras patrimoniales, ya sea para determinar sus características dinámicas como para conocer el perfil estratigráfico.

En el Perú los ensayos geofísicos se aplican con más frecuencia en la geología y geotecnia, pero en los últimos años se está promoviendo su utilización en la arqueología e ingeniería civil con fines de explorar monumentos arqueológicos. Un ejemplo es el trabajo realizado en Machupicchu – Cusco (Mucho , et al., 2005) donde se realizaron ensayos con Georadar y otras técnicas geofísicas para obtener información geológica y geotécnica del subsuelo. Con los resultados encontrados se identificaron tres niveles de estratos de suelo bien marcados, el primero que va desde 0.5 m a 1 m que contrasta con el suelo agrícola utilizado por los incas, el segundo estrato que va de 0.5 m a 4 m, y la tercera unidad posiblemente sea el estrato rocoso. Este estudio permitió caracterizar el terreno en la zona de estudio y desestimar la presencia de un posible plano de falla que atravesaba de sur a norte en la ciudadela.

Uno de los estudios más importantes en monumentos históricos realizado en España es el que se describe en el artículo de (Perez-Gracia, et al., 2009), donde se realiza un estudio para conocer las características del suelo bajo el cual se encuentra cimentada la Catedral de

Mallorca. Este estudio fue llevado a cabo como parte de un estudio global cuyo objetivo fue determinar el estado estructural de la edificación y la evaluación dinámica estructural. Se realizaron los ensayos geofísicos de GPR, resistividad eléctrica y REMI los que permitieron estimar un modelo del suelo ubicando las zonas más vulnerables.

Cheomseongdae es una de las estructuras patrimoniales más importantes en Corea por ser considerado como uno de los observatorios astronómicos más antiguos del oeste de Asia. En (Park, et al., 2012) se presenta un estudio basado en ensayos no destructivos con el fin de evaluar la estabilidad de Cheomseongdae, puesto que presenta una inclinación hacia un lado. Parte de estos estudios comprendió la aplicación de los ensayos geofísicos de resistividad eléctrica 3D, domwhole, SPT y ensayos sísmicos. Estos ensayos permitieron realizar una interpretación del suelo bajo la estructura e identificar zonas de anomalía donde el suelo tiene diferentes propiedades lo que posiblemente sean la causa de la inclinación de la estructura.

La evaluación de riesgo sísmico de monumentos históricos ha llegado a ser un tema de interés para los investigadores como por ejemplo se tiene el artículo “*Integrated subsoil model for seismic microzonation in the Central Archaeological Area of Rome (Italy)*” (Moscatelli , et al., 2012). Este estudio trata sobre la evaluación del riesgo sísmico realizado en el monte Palatino, el foro y el Coliseo Romano donde se llevó a cabo un programa de investigación, geológica, geofísica, geotécnica. Los ensayos incluyeron ensayos de campo y de laboratorio, perforaciones, líneas de MASW, y otros ensayos geofísicos Estos resultados fueron utilizados para realizar un mapa de microzonificación sísmica de la zona en estudio.

Otro estudio con fines de reducción del riesgo sísmico es el que se presenta en (Palmieri, et al., 2012) donde el EUCENTRE (Pavia, Italia) y el IIT Madras (Chennai, India) realizaron una evaluación en estructuras del patrimonio arquitectónico en Italia y en la India. Se seleccionaron dos sitios reconocidos como patrimonio cultural como representativos de la tipología estructural para posteriormente aplicarlo a otras estructuras similares. Durante estos estudios se realizó una caracterización de los materiales de la estructura y del suelo, llevándose a cabo ensayos de MASW, refracción microtremor (REMI) y Nakamura. Los resultados sirvieron para realizar un análisis de peligro sísmico probabilístico de las estructuras seleccionadas.

Una aplicación del ensayo de refracción sísmica se realizó en el Palacio Habib Sakakini (Cairo- Egipto) (Hemeda , et al., 2013), donde se llevó a cabo una campaña de estudios geofísicos, geotécnicos y evaluación de riesgo sísmico de la estructura con el fin de rehabilitar y reforzar el monumento. Los estudios geofísicos y geotécnicos permitieron caracterizar los materiales de la estructura y el suelo de cimentación del monumento. Con los resultados de la campaña de inspección posteriormente se realizó la evaluación de riesgo sísmico del monumento. La refracción sísmica permitió caracterizar el suelo y determinar el perfil del terreno para poder compararlo con algunos sondajes que se realizaron a los alrededores del palacio.

## **Capítulo 3 - Caso de estudio: complejo arqueológico Huaca de la Luna – Trujillo**

En este capítulo se presenta los resultados de la campaña geotécnica llevados a cabo en Huaca de la Luna, que es uno de los complejos arqueológicos de adobe más importante del Perú. Este complejo está localizado en la costa norte del Perú justo al sur de la ciudad de Trujillo. La Huaca es una estructura masiva de tierra en forma de pirámide escalonada que ocupa un área de 8200m<sup>2</sup> tiene una altura aproximada de 21 m y fue construida por la civilización Moche entre 100 DC a 650 DC. Se han llevado a cabo trabajos de arqueología y conservación desde inicio de los 90s. Estudios previos han revelado algunas fisuras y rajaduras en los muros de adobe y columnas. Estos daños se presentan en algunas áreas de la huaca especialmente cerca de la esquina noroeste de la estructura. La identificación de estos daños ha motivado la investigación con fines geotécnicos que se muestran en este capítulo. En el estudio de las características geotécnicas del área de interés de la huaca se emplearon una serie de métodos geofísicos y geotécnicos tradicionales. Entre los métodos geofísicos empleados se tiene el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Refracción Sísmica. Los métodos geotécnicos empleados para la exploración del suelo son el Cono Sísmico de Penetración (SCPTu), ensayo de Placa de Carga, muestreo con barreno manual y ensayo de cono de arena. Estos ensayos se realizaron principalmente para desarrollar un perfil geotécnico general y estimar propiedades de ingeniería necesarias. Los resultados de la interpretación estratigráfica del suelo basados en geofísica y geotecnia guardan muy buena relación. Esto permitió comprobar la eficacia de los resultados que se obtienen con los métodos geofísicos.

En general los resultados indican que el área de interés tiene un suelo de cimentación comprendida por estratos de arena medianamente densa a densa de 5.5 m de espesor aproximadamente, seguido por un estrato de arena densa a muy densa desde una profundidad de 6 a 13m aproximadamente. Estos estratos están soportados por dos estratos duros presumiblemente uno de roca erosionada hasta los 16 m aproximadamente y el otro de roca fresca en el fondo. Los perfiles estratigráficos 2D resultantes se muestran consistentes con la pendiente del afloramiento granítico que se encuentra en la parte este de la huaca, denominado Cerro Blanco. Estos perfiles también muestran que el estrato duro de fondo es menos profundo conforme nos movemos de la esquina noroeste hacia el lado este. Estos resultados servirán como información complementaria para posteriores estudios estructurales con el fin de estudiar la magnitud del asentamiento de la cimentación cerca de la esquina noroeste que es donde más se han observado daños estructurales.

### 3.1. Introducción

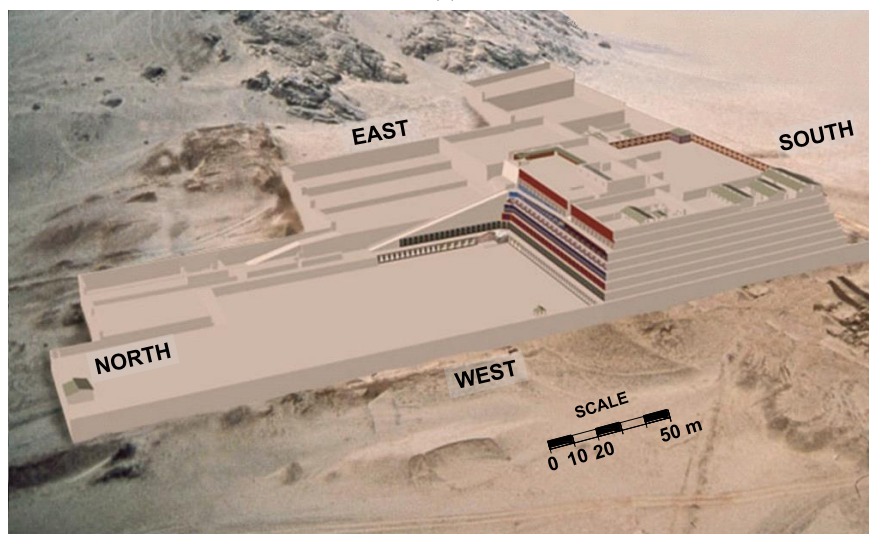
En el presente capítulo se realiza la aplicación de métodos geofísicos en el complejo arqueológico de Huaca de la Luna (Trujillo). Se muestran el desarrollo de las actividades del estudio geotécnico realizado aplicando métodos geofísicos y geotécnicos tradicionales durante las campañas de investigación del año 2014 y 2015 en el complejo arqueológico. Estos trabajos se llevaron a cabo con el fin de completar la información geotécnica necesaria para realizar una futura evaluación estructural del complejo. En base a la inspección general que se realizó en el complejo arqueológico al inicio del proyecto, se consideró que la zona de la esquina noroeste de la Huaca de la Luna era prioritaria para ejecutar la campaña de investigación.

La principal motivación del presente estudio es investigar si las condiciones de cimentación del complejo son en parte o totalmente responsables de los patrones de daños observados que se mencionaron anteriormente. El objetivo del presente capítulo es caracterizar la cimentación de la huaca empleando ensayos geofísicos de tal que pueda ser utilizada para crear un modelo numérico confiable y que permita realizar un análisis estructural y sísmico detallado.

El sitio arqueológico de Huaca de la Luna es un complejo monumental religioso construido en diferentes etapas desde 100 DC hasta 650 DC por la cultura Moche, que se desarrolló en el norte del Perú. Una vista de la disposición general del complejo de Huaca de la Luna se puede observar en la Figura 3.1b. Esta imagen muestra varias plazas y plataformas. El complejo es el resultado de por lo menos seis niveles construidos superpuestos nombrados como A, B, C, D, E y F. Cada nivel de construcción está conformado por tres plataformas (I, II y III) y cuatro plazas (1, 2a, 2b y 3). La plataforma I que es la más grande se localiza en la esquina suroeste del complejo, mientras que la plataforma II y III se ubican en las esquinas sureste y noreste respectivamente (ver Figura 3.1). Evidencias arqueológicas indican que el patrón arquitectónico se repitió a través de las diferentes etapas de construcción. A fin de construir un nuevo nivel (más alto) se rellenó los espacios con pilas de adobes contiguos separados por juntas de construcción. Los investigadores han propuesto varias hipótesis para justificar este método de construcción típico de las Huacas de Moche, incluso la posibilidad de que las juntas quizá tengan una función estructural. La explicación más aceptada para la reconstrucción repetitiva de todo el complejo es que este procedimiento fue realizado con la idea de la renovación del poder (Uceda & Paredes, 1994) (Uceda, 1996).



(a)

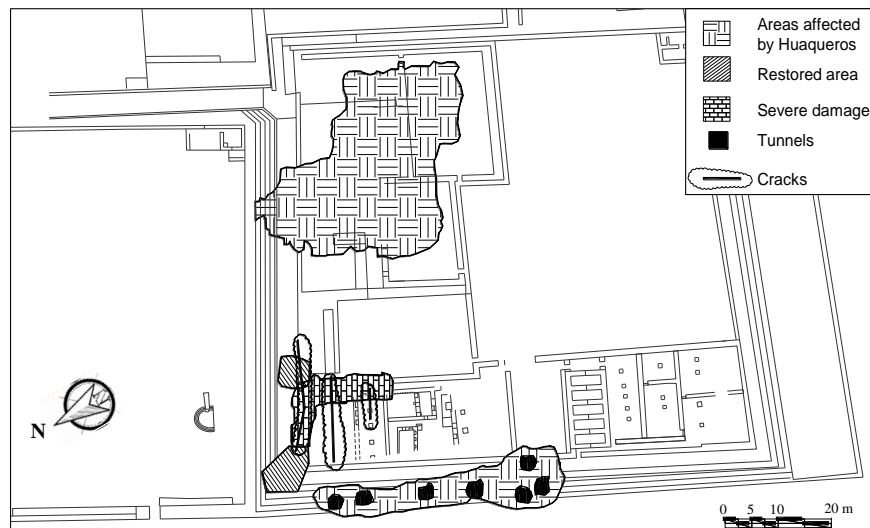


(b)

**Figura 3.1:** (a) Mapa de ubicación de la zona de estudio y (b) Disposición general de Huaca de la Luna (Adaptado de (Chácara, et al., 2014))

El Perú está ubicado a lo largo del anillo de fuego del pacífico, una región que históricamente ha estado expuesta a sismos fuertes. En la costa norte del país hay registros que muestran que esta región ha sido afectada por eventos de fuertes lluvias e inundaciones asociadas con el fenómeno de El Niño (Uceda & Canziani, 1993). El proceso de redescubrimientos de Huaca de la Luna ha dejado visible para las personas un magnífico complejo, pero a la vez ha dejado vulnerable la estructura a diferentes peligros naturales.

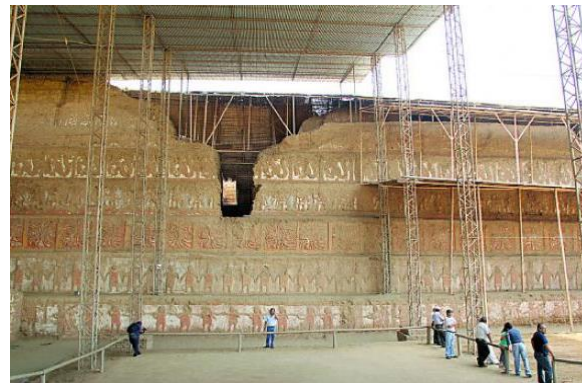
Por otra parte, los daños presentes en la huaca (ver Figura 3.2a) muestran severos patrones de grietas localizados en la esquina noroeste y también algunos en la esquina suroeste. Adicionalmente la estabilidad estructural de la huaca ha sido afectada por las acciones de huaqueros en la época colonial, quienes dejaron detrás varios túneles y un enorme corte a lo largo de la fachada norte (ver Figura 3.2c). La evaluación estructural de este proyecto se requiere para planear intervenciones apropiadas y reacondicionamientos si son necesarios.



(a) Daños observados en Huaca de la Luna



(b) Grietas severas en los muros



(c) Fachada principal (norte)

**Figura 3.2:** Estado de daños presentes en Huaca de la Luna

### 3.2. Geología y geomorfología general del lugar

En esta sección se presentarán las características geomorfológicas y geológicas de la zona donde se asienta el complejo de Huaca de la Luna y sus alrededores (Moche-Trujillo). Esta información se basa en la revisión bibliográfica de documentos publicados por instituciones como son el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el Instituto de Investigación en desastres y medio ambiente (IIDMA).

En el distrito de Moche se encuentra una variedad de unidades geomorfológicas como son la faja litoral, última terraza fluvial, penúltima terraza fluvioaluvial, zona de planicie costera, estribaciones andinas y los macizos costeros. Como parte de los macizos costeros se encuentra el cerro blanco donde en sus laderas se ubica el complejo arqueológico. Desde el punto de vista geológico el área de estudio se encuentra sobre una unidad de suelo eólico de arena fina no consolidada perteneciente al sistema cuaternario. Bajo este sistema se ubica el macizo rocoso granítico del sistema cretáceo de la era mesozoica que forma parte del batolito de la costa que aflora en superficie y se observa como parte del denominado Cerro Blanco. Esta unidad es una roca color gris holocristalina que presenta cristales de cuarzo. El conocimiento de la geología y geomorfología del área donde se ubica la Huaca es importante

para una realizar una mejor interpretación de los resultados de los métodos geofísicos y para un futuro análisis de riesgo sísmico del Complejo.

### **Relieve topográfico**

El relieve de la zona de estudio es variado de acuerdo al IIDMA (IIDMA, 2002) el 50% del área total corresponde a zonas planas (ángulo de 0°-1°), el 20.9% y el 16% a zonas con pendiente suave (ángulo de 1°-3°) y moderada (ángulo de 3°-8°) respectivamente. Estas últimas corresponden a las zonas de la Campiña alta y baja que presenta una alta presencia agrícola. El 4.7% y al 2.1% corresponden a las zonas con pendiente fuerte (ángulo de 8°-15°) y escarpada (ángulo de 15°-20°) respectivamente. La presencia de los Cerros Blanco y Cerro Chico identifican a zonas muy escarpadas y extremadamente escarpadas (ángulo mayor a 30°) con 4.2 y 1.5% respectivamente. Dentro de los porcentajes de zonas con pendiente suave y moderada, se encuentra la capital del Distrito cuya topografía es de suave pendiente casi a nivel del mar.

## **3.3. Geomorfología**

### **Geomorfología regional**

El Distrito de Moche presenta una variedad de unidades geomorfológicas, cuya identificación y conocimiento constituyen requisitos indispensables para el uso prudente del medio. A continuación se describen las principales unidades geomorfológicas que se encuentran en Moche:

**Faja Litoral:** Comprende las terrazas escalonadas llamadas terrazas aluvionales que han sido cortadas por la erosión marina (desgaste con transporte) formando acantilados costeros. Entre la desembocadura del Río Moche y el Puerto de Salaverry, se aprecia la acumulación de fragmentos compuestos de arena, grava y conchas acarreadas por los mares y ríos llamados cordones litorales. Los terrenos muestran una topografía suave cubierta con arena eólica-aluvial y vegetación natural muy salitrosa. Sobre esta faja se ubican las áreas urbanas de Las Delicias y Taquila. La última Terraza Fluvial (Q-t1) se presenta en las márgenes del río Moche, constituidas por materiales rodados de diferentes tipos de rocas. La Penúltima Terraza Fluvioaluvial (Q-a1) corresponde a la Campiña propiamente dicha, y a las áreas urbanas de Moche Pueblo- Urb El Paraíso-Cruce El Gallo, entre otras. Estas áreas presentan características y condiciones de sedimentación muy similares como son los depósitos lenticulares de arenas eólicas que conforman el cono de deyección sobre el que se ha formado el valle.

**Zona de Pampas o Planicies costeras:** Está conformada por tramos más o menos amplios, ligeramente inclinados que se sitúan en la región costera entre los macizos costeros y las estribaciones andinas. Están constituidos por depósitos sedimentarios de origen marino, eólico, coluvioaluvial, etc. A esta zona corresponden los terrenos sobre los cuales se ubica Alto Moche-Miramar y a futura área de desarrollo Agroindustrial.

Estribaciones Andinas: Llegan muy próximas a la línea de costa y están constituidas por rocas ígneas intrusivas de batolito de la costa. A esta zona corresponden a los denominados Cerros aislados, como son el Cerro Blanco, Cerro Chico y Cerro Arena.

### Geomorfología local

El Complejo de Huaca de la Luna se encuentra asentado en la parte más baja del cerro blanco en las cercanías del río Moche. El cerro es un macizo costero que está conformado por rocas ígneas intrusivas que se esconden en las cercanías del cauce del río Moche llegando hasta una profundidad de 80 m (IIDMA, 2002). Esto se puede apreciar en la Figura 3.3 marcada como zona 1.

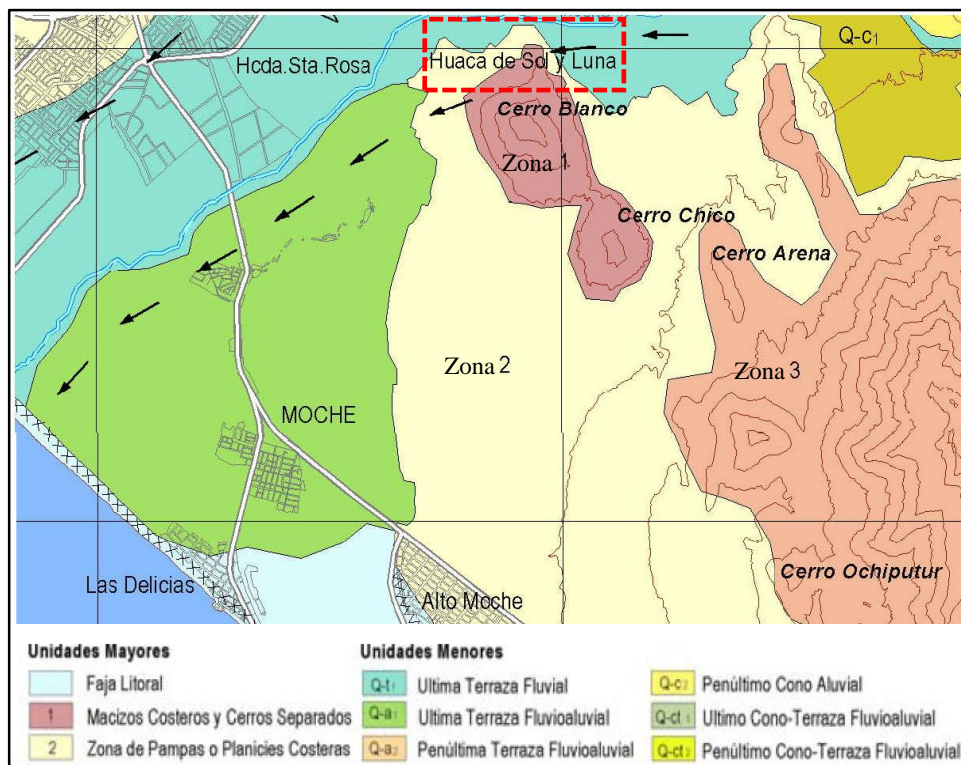


Figura 3.3: Mapa de Geomorfología del Distrito de Moche (Adaptado de (MPT, 2002))

### 3.4. Geología

#### Geología regional

Toda la Geología de la Región ha sido ampliamente descrita por H. Jaén en el Boletín N° 17, cuadrángulos Trujillo-Salaverry del ExServicio de Geología y Minería, en una extensión aproximada de 3000 km<sup>2</sup> para ambos cuadrángulos (Cossío & Jaén, 1967), (Dávila, 1994). En este caso la Geología tiene objetivos de investigación fundamentalmente económica para el desarrollo minero. Para los fines del presente informe, se resume la parte más importante sobre las formaciones y afloramiento que predominan en dicha área.

La columna estratigráfica de la zona estudiada comprende una secuencia interrumpida de rocas sedimentarias y volcánicas que en edad corresponde desde el Jurásico Superior hasta el cuaternario reciente.

a) Jurásico Superior: Formación Chicama: Esta formación se encuentra expuesta con una amplia distribución a partir de los 600 m.s.n.m. de la cuenca del valle. También es posible ubicar afloramientos restringidos hacia el norte y noreste aproximadamente a 8 y 18 Km. de la ciudad de Trujillo, en los cerros Pibote, El Alto y Prieto. En estas áreas la serie sedimentaria está compuesta principalmente de lutitas pizarrosas y arenosas y ocasionales horizontes de areniscas, cuarcitas, calizas y escasos lentes de yeso.

b) Cretáceo Inferior: Formación Casma: Las exposiciones de esta serie volcánica-sedimentaria consistente en derrames de andecita y riolita con algunos horizontes de lavas almohadilladas. Se pueden observar en la cumbre del cerro Cabras constituido por cuerpos intrusivos de diorita, granito y granodiorita. Parte de estos derrames se extienden con dirección sur-este, con poca altitud y parcialmente cubiertos de arena, hasta la elevación mayor que constituye lo que se conoce como Cerro Bolongo en cuyas inmediaciones está asentada la población del Alto Trujillo. Una mayor exposición de esta formación se aprecia a 5 km. de Laredo sobre la margen derecha del Río Moche, en las cercanías del anexo Galindo de la Empresa Laredo.



**Figura 3.4:** Flanco norte del Cerro “Cabras”, en cuya cumbre puede observarse el remanente de la formación Casma (color oscuro).

c) Cuaternario Pleistoceno y Reciente: Como se ha descrito en el acápite de la Geología Regional estos depósitos son los de mayor distribución en el ámbito del área de estudio, pues constituyen el relleno fluvio-aluvial del cono de deyección del valle, sobre el cual se encuentran ubicadas la ciudad de Trujillo y las zonas urbanas periféricas. El Cuaternario Pleistoceno está representado por los elementos de origen marino que se ubican a lo largo de todo el litoral desde Salaverry hasta Huanchaco. Los materiales de estas áreas están conformados por conglomerados de gravas, arena, limos y arcillas que en algunos casos aparecen como acantilados que han sido erosionados por el mar. Los materiales del Cuaternario Reciente son el producto de la desintegración, transporte y deposición de las rocas que afloran en la cuenca por los agentes de intemperismo. Estos han sido arrastrados a lo largo del tiempo por el río Moche, las quebradas de León, Río Seco, y otras quebradas menores que bajan de los cerros formando torrenteras que han permitido la dispersión del material suelto en forma de abanicos, dando cierta uniformidad en el relleno de la planicie.

Los materiales que constituyen estos depósitos fluvio-aluviales corresponden principalmente a elementos de rocas graníticas y sedimentarias del tipo cuarcitas, subangulares a subredondeadas. Los elementos presentan un tamaño medio entre 2” a 4” y siempre van acompañados de arenas que es producto de la desintegración de las mismas rocas durante su transporte.

Los materiales eólicos constituidos por las arenas transportadas por el viento se extienden desde la línea costera y se acumulan en las partes medias de las laderas de los cerros. Estas arenas cubren las periferias de los distritos de El Porvenir, Florencia de Mora, La Esperanza, Alto Trujillo cuyas viviendas sobre el borde del cauce natural de la quebrada de San Idelfonso (Ver Figura 3.5). En las cercanías del Cerro Cabras (afloramiento granítico), se ha detectado que estas arenas llegan a una profundidad de 70 m a más con pendientes que varían entre 5 y 10% según las zonas. (Ver Figura 3.5a).



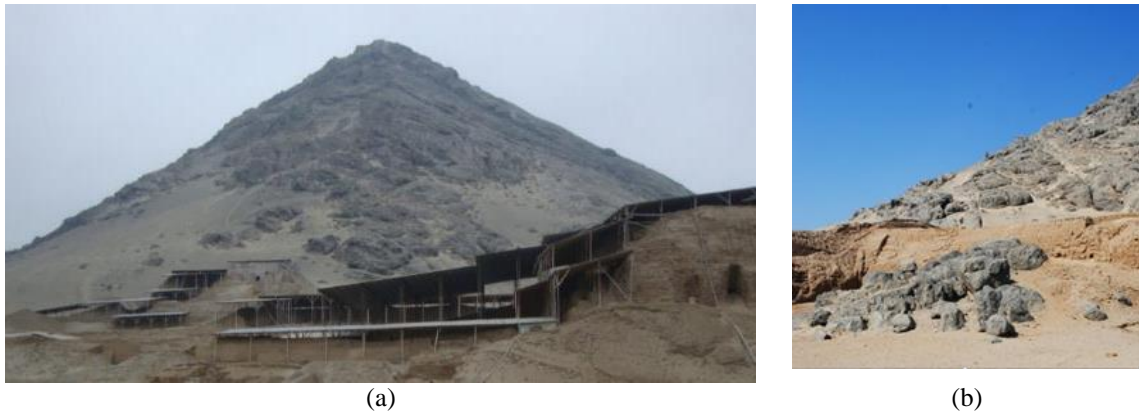
**Figura 3.5:** (a) Cauce de la Quebrada “San Idelfonso”. (b) Cerro “Cabras” (656 m.s.n.m.) – La Esperanza

**Rocas Intrusivas:** Las rocas intrusivas que afloran en el área de estudio forman parte del gran batolito andino, y se encuentran emplazadas en formaciones sedimentarias, volcánicas mesozoicas y terciarias. Sus exposiciones predominan en la zona y constituyen los límites del valle de Moche y continúan a diferentes profundidades por debajo del relleno aluvial (Ver Figura 3.5b).

La secuencia de emplazamiento de los intrusivos se ha podido establecer gracias a las observaciones realizadas en los cerros Cabras, Blanco, Mochal, Huaca de los Chinos, etc. Se ha encontrado que están conformados de la siguiente manera: Diorita, Granodiorita, Adamelita – Tonalita y Granito respectivamente.

Entre los principales afloramientos intrusivos cercanos a la ciudad de Trujillo se encuentran los cerros Blanco, Pesqueda, Presidio, Mampuesto, Cabras y algo más alejados hacia el NE se tienen el Cerro San Idelfonso y El Alto. Las cumbres de estos cerros constituyen los límites de la microcuenca que dan origen a la quebrada de San Idelfonso. Los flancos Norte y Sur de los Cerros El Alto y Prieto delimitan la microcuenca de las quebradas El León y Río Seco, cuyos cauces se unen aproximadamente en la cota 150 m.s.n.m. para continuar con dirección Sur Oeste hasta su desembocadura en el mar de Huanchaco.

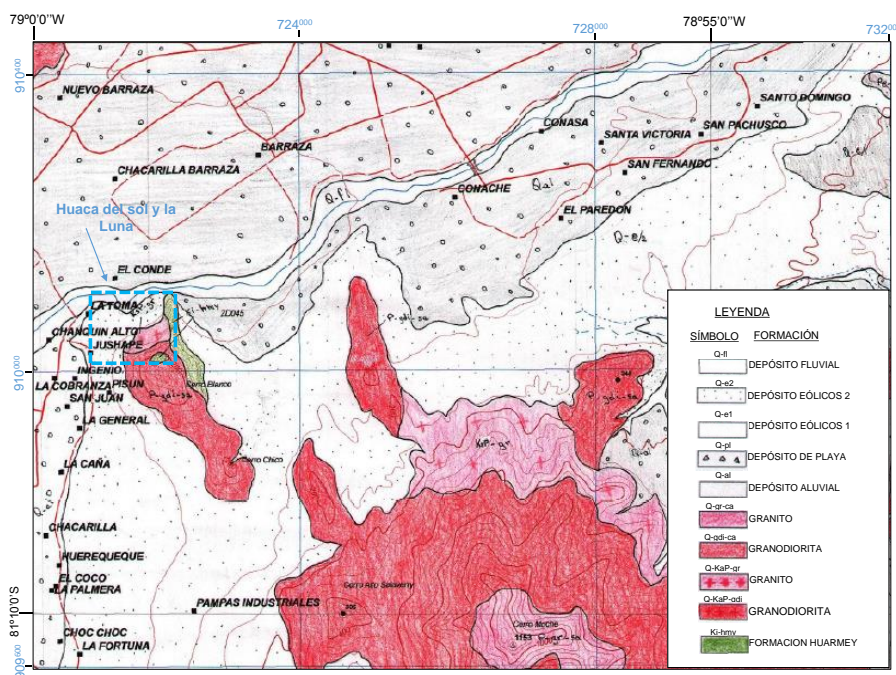
La mayoría de este tipo de rocas se halla diaclasadas en bloques tabulares que muestran exfoliación concéntrica y cárcabas irregulares. La edad de las rocas intrusivas del área ha sido asignada en términos generales al Cretáceo Superior y Terciario Inferior.



**Figura 3.6:** (a) Cerro “Blanco”, afloramiento rocoso compuesto principalmente de granodiorita ubicado en la margen izquierda del cauce del Río Moche y (b) vista de la parte del Complejo arqueológico asentado en el afloramiento rocoso.

### Geología local

El complejo arqueológico de Huaca de la luna en gran parte se encuentra asentado sobre una unidad de suelo eólico de arena fina no consolidada perteneciente al sistema cuaternario y otra parte se encuentra sobre el afloramiento del macizo rocoso (ver Figura 3.6). El afloramiento rocoso granítico es parte del sistema cretáceo de la era mesozoica que forma parte del batolito de la costa. Esta unidad es una roca color gris holocristalina que presenta cristales de cuarzo. Esto se puede apreciar en el recuadro marcado en el mapa geológico de la Figura 3.7.



**Figura 3.7:** Mapa geológico de la zona donde se ubica el complejo Huaca de la luna (Adaptado de (INGEMMET, 2015).)

### 3.5. Metodología de los ensayos geotécnicos

El trabajo de campo realizado en Huaca de la Luna se centró en dos actividades principales, que son la aplicación de métodos geofísicos y métodos geotécnicos. Entre los métodos geofísicos se realizaron 11 líneas de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW) y Refracción Sísmica. En la actividad de los métodos geotécnicos se realizaron 4 ensayos de SCPTu, 4 ensayos de placa de carga, 2 muestreos con barreno manual y 2 ensayos de cono de arena. Todos estos ensayos se realizaron cercanos a la esquina noroeste que es la zona de mayor interés en este estudio. La ubicación de los ensayos se puede observar en la Figura 3.8.

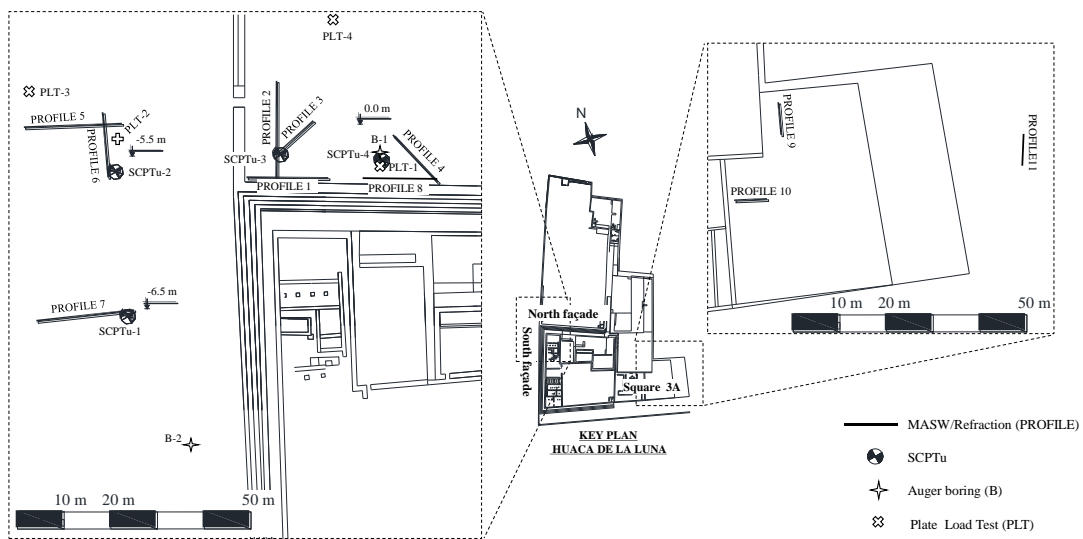


Figura 3.8: Ubicación de los ensayos geotécnicos realizados en Huaca de la Luna.

#### 3.5.1. Investigación del suelo con métodos geofísicos

Los métodos geofísicos que se utilizaron en el presente estudio son aquellos que se basan en la propagación de ondas sísmicas. Dichas ondas sísmicas pueden ser generadas por una fuente pasiva o activa que imparten cierta energía o efecto sobre el terreno para medir la respuesta de los materiales que la componen. Esta respuesta está en función de las propiedades elásticas que componen los estratos del suelo, siendo estas propiedades parámetros muy importantes para la caracterización geotécnica de un sitio determinado (Xia, et al., 1999).

Entre los métodos geofísicos basados en ondas sísmicas se tiene el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y el método de Refracción Sísmica. Ambos métodos tienen una configuración de los equipos similar en el campo empleando un arreglo lineal de sensores y una fuente para generar la onda sísmica, pero el objetivo de su medición es diferente. El primero se fundamenta en la medición de las ondas Rayleigh para determinar curvas de dispersión del suelo y posterior a un análisis de inversión se puede estimar la velocidad de onda de corte en el suelo ( $V_s$ ). El segundo se basa en la medición del tiempo de llegada de la onda a cada sensor empleado para la medición y así estimar.

## Exploración con MASW

Para la realización de los ensayos MASW se aplicó el protocolo del ensayo descrito en el Capítulo 2. En la Figura 3.9 se observa la configuración del ensayo MASW realizado en la Fachada norte y oeste del complejo de Huaca de la Luna.



**Figura 3.9:** Ensayos MASW en (a) la fachada norte y (b) en la fachada oeste de la Huaca

A lo largo de las zonas de estudio se establecieron 11 líneas de registro para ensayos MASW (ver Figura 3.8). 5 líneas se realizaron frente a la fachada norte, 3 líneas frente a la fachada oeste, 2 líneas en la plaza 3A y 1 al exterior de esta zona estimar el comportamiento y profundidad del afloramiento rocoso. Cada uno de estas líneas de registro presenta una dirección y longitud determinada como se resume en la Tabla 3.1.

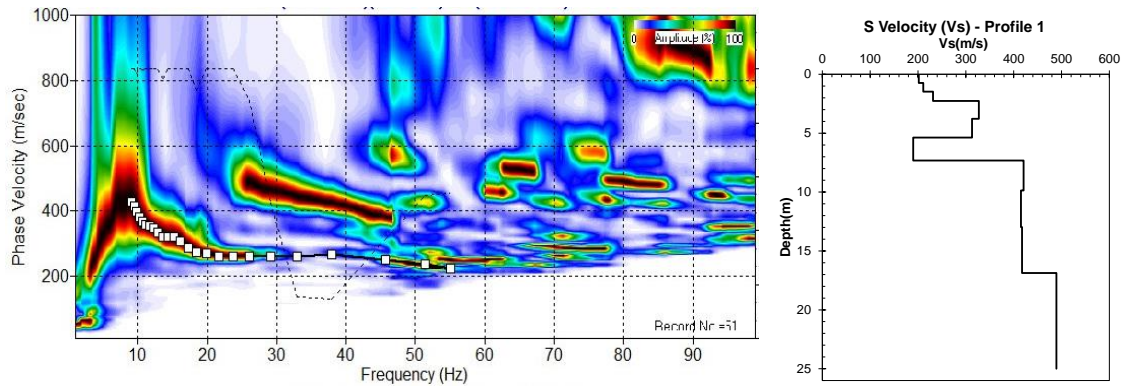
**Tabla 3.1:** Descripción de las líneas de registro para ensayo MASW en Huaca de la Luna

Nombre de la línea	Dirección	dx (m)	Longitud (m)	Cantidad de sensores empleados	Ubicación
Perfil 1	E-O	2.5	17.5	8	Plaza 1 - Fachada Norte
Perfil 2	N-S	3	21	8	
Perfil 3	NE-SO	1.5	10.5	8	
Perfil 4	NO-SE	2	20	8	
Perfil 5	O-E	3	21	11	Plaza 1 - Fachada Oeste
Perfil 6	S-N	2	14	8	
Perfil 7	O-E	3	21	8	
Perfil 8	O-E	1.5	15	11	Plaza 1 - Fachada Norte
Perfil 9	S-N	1	7	8	Plaza 3A
Perfil 10	E-O	1	7	8	
Perfil 11	S-N	1	10	11	

En la Figura 3.10 se muestra los resultados de la curva de dispersión experimental y el perfil 1D de la velocidad de onda de corte la línea denominada “Profile 1” ubicada en la fachada norte.

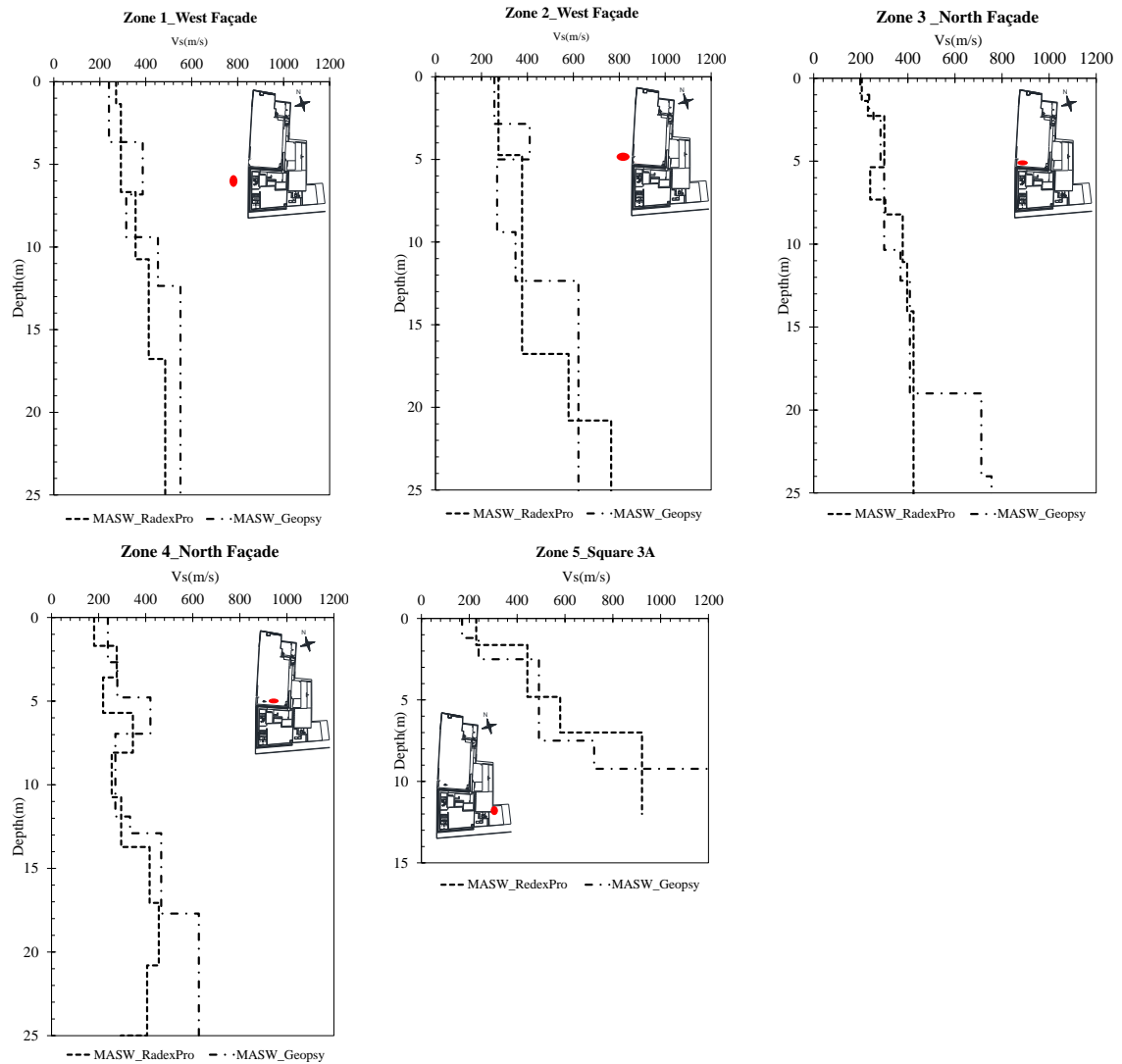
Una de las líneas fue procesada por Choon Park (Park, 2014) como una forma de confirmar que la información tomada en campo era la adecuada. Las otras líneas fueron procesadas por el autor (ver Anexo A y Anexo B) empleando los programas RadexPro (DECO Geophysical, 2014) y Geopsy (Wathelet, 2011) que permiten crear la curva de

dispersión utilizando la transformada de Park y la transformada F-K respectivamente y el posterior análisis de inversión.



**Figura 3.10:** Perfil 1-Imagen de curva de dispersión (Park, 2014) y Perfil 1D de velocidad de onda de corte

Todos los resultados de los perfiles se promediaron y se obtuvieron perfiles representativos por cada zona de tal manera que sean comparables con los resultados de los ensayos geotécnicos. Estos resultados se presentan en la Figura 3.11.

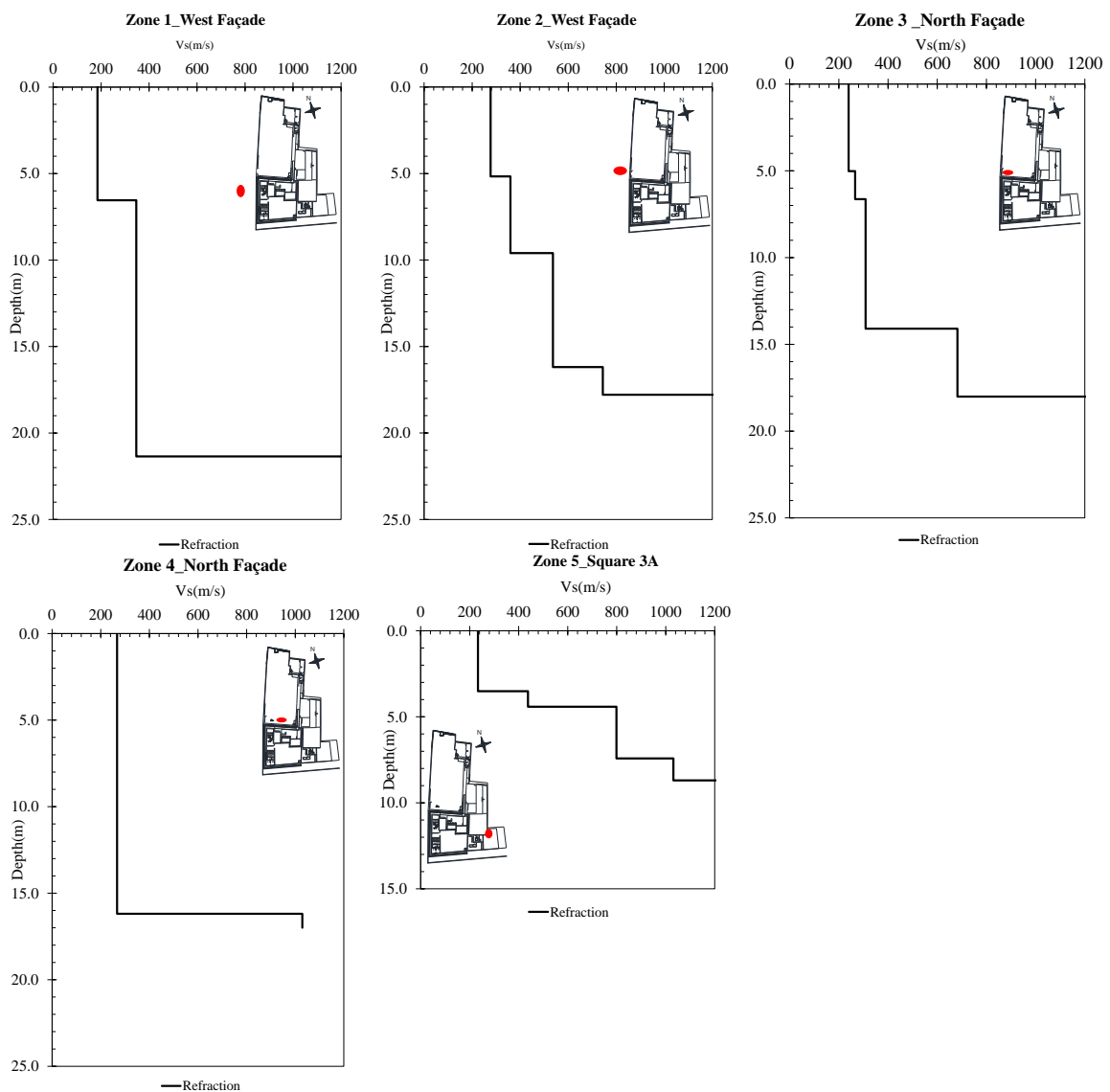


**Figura 3.11** Perfiles de velocidad de onda de corte representativos por cada zona – MASW.

## Exploración con refracción sísmica

En huaca de la luna se empleó el ensayo de refracción sísmica para calcular la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) basándose en el perfil de velocidad de onda P ( $V_p$ ) resultante de este ensayo. La información de campo de las 11 líneas tomadas en el ensayo MASW se procesó empleando la metodología del ensayo de refracción sísmica para un perfil 1D. La velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) se calcula empleando la relación existente entre  $V_s$ ,  $V_p$  y el módulo de poisson ( $\nu$ ), que se encuentran descritas en (Kramer, 1996).

Todos los resultados de los perfiles se promediaron y se obtuvieron perfiles representativos por cada zona de tal manera que sean comparables con los resultados de los ensayos geotécnicos. Esto se puede observar en la Figura 3.12. El detalle de los resultados de  $V_s$  y  $V_p$  de cada perfil ensayado se pueden observar en el Anexo C.



**Figura 3.12:** Perfiles de velocidad de onda de corte representativos por cada zona – Refracción sísmica

### 3.5.2. Investigación del suelo con métodos geotécnicos

En la campaña de campo se realizaron ensayos geotécnicos tradicionales con la finalidad de obtener resultados adicionales que brindan información necesaria para comparar con los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos. Entre los ensayos geotécnicos se realizaron 4 ensayos de placa de carga, 2 sondajes con barreno manual y 2 ensayos de cono de arena. Dichos ensayos se describen a continuación.

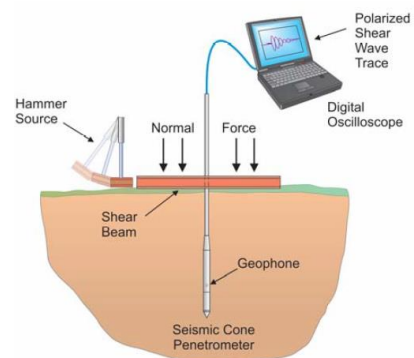
#### Ensayo de cono de penetración sísmico (SCPTu)

El ensayo de cono de penetración o piezocono (CPTu) se basa en la medición de la resistencia de punta, fricción local y presión de poros en el terreno a través de un instrumento cilíndrico con punta cónica (cono), con dimensiones normadas por la (ASTM D5778-12, 2012). Este dispositivo electrónico permite transmitir las señales a superficie de manera continua. La versión moderna del ensayo del cono de penetración en el sísmico (SCPTu) que fue desarrollada por (Robertson, et al., 1986). El cono sísmico consiste en un piezocono típico (CPTu) con un sensor (geófono o acelerómetro) para captar la señal sísmica. El SCPTu combina las mediciones tradicionales típicas del piezocono (resistencia de punta, fricción local y presión de poro) con mediciones geofísicas como las velocidades de onda de corte y compresión. Esta herramienta es considerada actualmente uno de los avances más importantes para la exploración geotécnica insitu puesto que permite determinar hasta cinco parámetros en un mismo sondeo.

Los ensayos SCPTu se realizaron en la fachada norte y oeste de la plataforma principal del complejo, debido a la necesidad de la aplicación de este tipo de ensayos y la facilidad de acceso a la zona. Para la ejecución de estos ensayos se empleó un SCPTu montado sobre un camión oruga equipado con un penetrómetro y un sistema de adquisición de datos fabricado por ConeTec Investigations Ltd de Richmond, British Columbia - Canadá (ConeTec Job No:14-72007, 2014) (ver Figura 3.13).



(a)

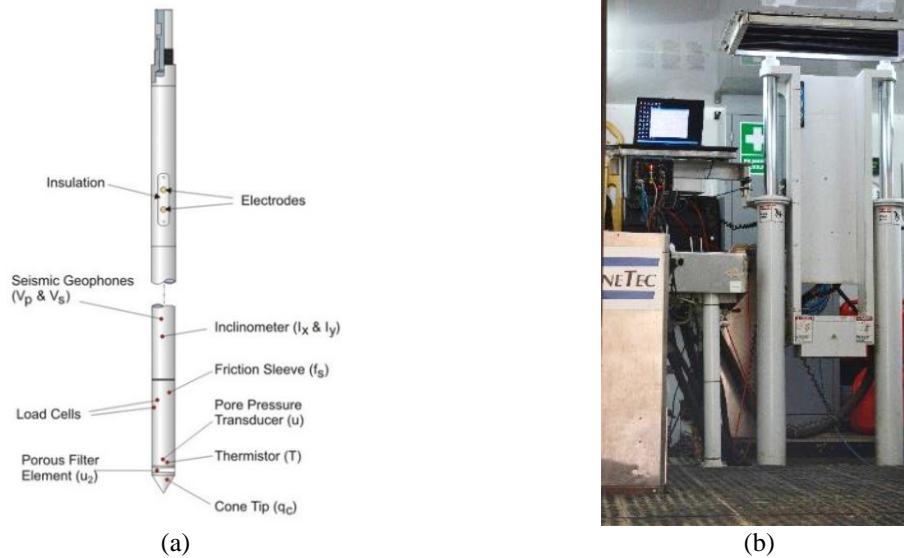


(b)

**Figura 3.13:** (a) Camión oruga SCPTu e (b) Ilustración del sistema SCPTu

**Tabla 3.2:** Características de capacidad de los piezoconos (ConeTec Job No:14-72007, 2014)

Numero de cono	Área de la sección transversal (cm <sup>2</sup> )	Área de fricción (cm <sup>2</sup> )	Resistencia de la punta (bar)	Capacidad por fricción (bar)	Capacidad de presión de poros (psi)
373	15	225	1500	15	500
405	10	150	1000	10	500



**Figura 3.14:** (a) Esquema del sistema del SCPTu y (b) sistema de adquisición de datos (ConeTec Job No:14-72007, 2014)

El sistema de adquisición de datos está conformado por una pantalla, un acondicionador de señal y una caja de la interfaz de alimentación con un convertidor análogo a digital (A/D) de 16 bit (ver Figura 3.14b). Los datos se registran en incrementos fijos de 5 cm en profundidad utilizando una rueda de profundidad conectada a los cilindros de empuje mediante el uso de un resorte cargado a la rueda que es retenida por las barras del cono. El SCPTu se lleva a cabo a una velocidad constante de 2cm/s. El sistema registra la data del SCPTu en tiempo real y graba un soporte de almacenamiento durante la penetración los parámetros de profundidad, resistencia en la punta sin corregir (q<sub>c</sub>), fricción en la manga (f<sub>s</sub>), presión de poros dinámica (u), e inclinación. Cada metro el penetrómetro se detiene y se hace una medida sísmica para obtener la velocidad de onda de corte.

La interpretación del ensayo SCPTu se basa en los valores del piezocono tomados en campo de resistencia en punta, fricción en manga y presión de poros promediados sobre un intervalo de 0.20m. Se debe notar que el q<sub>t</sub> es la resistencia en la punta corregida por efecto de la presión de poros y q<sub>c</sub> es la resistencia en la punta registrada en el equipo (sin corregir). Como todos los conos utilizados en este trabajo tienen área de fricción en las mangas no se requiere corregir por presión de poros el valor de f<sub>s</sub>.

La corrección en la punta es:  $q_t = q_c + (1 - a)u_2$

Dónde:

**q<sub>t</sub>** : Resistencia en punta corregida.

**q<sub>c</sub>**: Resistencia en punta registrada.

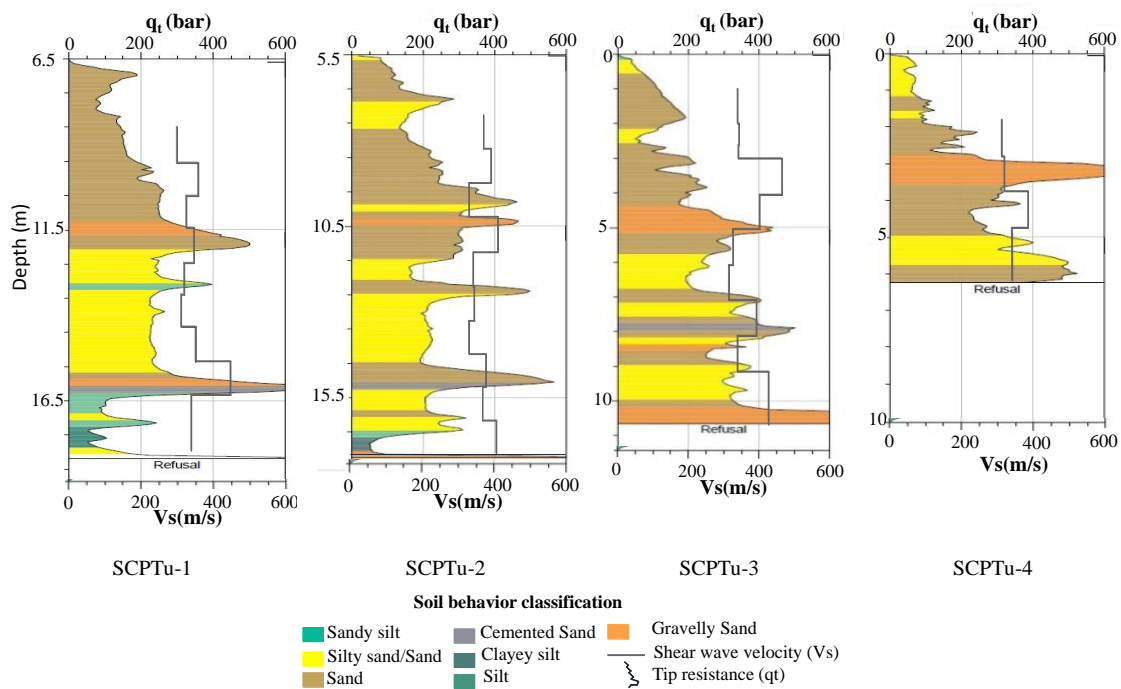
- u<sub>2</sub>**: Presión de poros dinámica registrada por encima de la punta (posición de u<sub>2</sub>)
- a**: Es la relación neta entre áreas de la sección del cono ( 0.8 típico)

Los cálculos de los esfuerzos totales son basados en los pesos unitarios de suelo que han sido asignados al comportamiento del suelo de acuerdo a los tipos de zonas, a partir de un perfil de peso unitario definido por el usuario o mediante el uso de un único valor a lo largo del perfil.

Las tensiones de sobrecarga efectivas se calculan basándose en una distribución hidrostática de equilibrio de presión de poros bajo el nivel de agua o a partir de un perfil de equilibrio de presión de poros definido por el usuario (esto puede ser obtenido de la disipación de presiones de poros del ensayo CPT).

Los métodos utilizados en la interpretación de resultados empleando los parámetros medidos en el campo con el ensayo SCPTu se pueden ver con mayor detalle en. (Robertson, et al., 1986),. (Robertson, 1990), (Robertson & Wride, 1998), (Lunne, et al., 1997).

A continuación en la Figura 3.15 se presenta un resumen de los resultados de los sondajes después de la interpretación de los resultados medidos en campo en cada uno de los puntos ensayados.

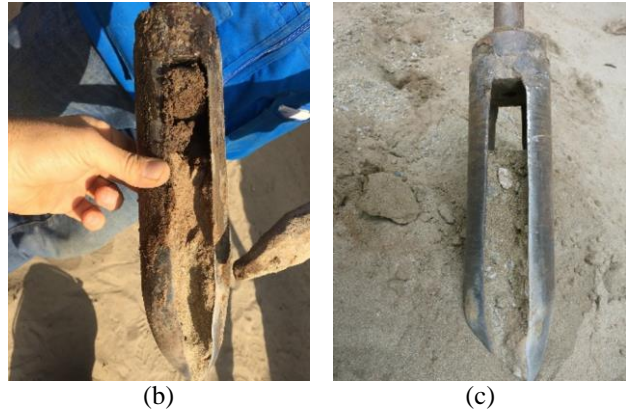


**Figura 3.15:** Valores de resistencia por punta y velocidad de onda de corte y clasificación del suelo de acuerdo los sondajes del SPCTu.

## Muestreo con barreno

El muestreo con barreno manual es uno de los métodos que más se emplea en geotecnia para extraer muestras alteradas de suelo. En la presente investigación se realizaron 2 muestreos con barrenos designados como B-1 y B-2. En ambos barrenos se logró muestrear hasta 3.4m aproximadamente. El barreno B-1 se realizó cerca al SCPTu-4 en la fachada norte con la finalidad de complementar los resultados del SCPTu en esta zona (Figura 3.16a). El barreno B-2 se realizó en la fachada oeste cerca de la zona de túneles (ver Figura 3.8).

Los resultados del sondaje B-1 y sondaje B-2 en base a la clasificación del suelo visual y en laboratorio de las muestras tomadas, indican que hay un estrato superficial de arena limosa, seguido por otro estrato de arena y arena gravosa (ver Figura 3.16b). En el sondaje B-2 se encontró un estrato superficial de arena pobremente gradada seguido por un estrato de arena limosa con fragmentos de adobes. El detalle de estos resultados se pueden observar en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura 3.16:** (a) Muestreo con barreno manual en la fachada norte (B-1) se encuentra en el primer estrato (b) arena medianamente densa, seguido por una capa de (c) arena gravosa a partir de los 3 m aproximadamente.

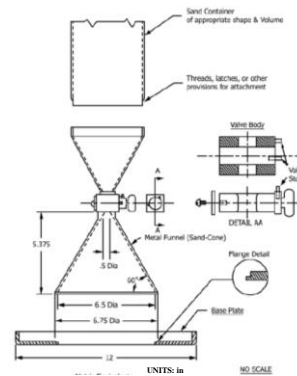
## Ensayo de cono de arena

Este ensayo se emplea para determinar la densidad en sitio y el contenido de agua de un suelo compactado durante la construcción de un terraplén de tierra, estructura de carreteras y relleno estructural. Usualmente se utiliza como una base de aceptación de la compactación del suelo a una densidad específica. Este ensayo esta normado por la (ASTM D1556-07, 2007).

Se calcula la densidad de campo en base a la medición del peso de suelo extraído de un agujero realizado en la zona de estudio y en base al volumen que ocupa una arena estándar (densidad conocida) en el mismo agujero. El material empleado fue una botella y un cono estándar, una plancha cuadrada de 30cm de lado con un agujero en el centro, una comba, una brocha y un cincel y arena estándar de densidad relativa 1.36. Estos se pueden observar en la Figura 3.17a y Figura 3.17b.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.17:** (a) Equipos necesarios para realizar el ensayo de cono de arena, (b) dimensiones del cono de arena de acuerdo al ASTM D1556, (c) ensayo realizado en la fachada oeste y (d) fachada norte.

En el complejo arqueológico de Huaca de la Luna se realizaron dos ensayos de cono de arena. El primero estuvo localizado en la misma ubicación de la placa de carga 3 (PLT-3) y el segundo en la ubicación del PLT-4. (Figura 3.8 y Figura 3.17). Conociendo la densidad de la arena que se emplea en el ensayo y pesando la arena que queda en el agujero se puede obtener el volumen de arena que ingresa en el agujero. Con el volumen del agujero y con el peso de la muestras de suelo recuperado se determina la densidad húmeda del terreno en el sitio.

**Tabla 3.3:** Cálculo de la densidad en campo del suelo

<b>PUNTO</b>	<b>PLT-3</b>	<b>PLT-4</b>
Peso de suelo recuperado	4540.50	2317.50
Peso de arena empleada	5000.00	5000.00
Densidad de arena	1.36	1.36
Arena que queda	1.50	1544.50
peso arena en cono	1591.00	1591.00
Arena en hueco	3407.50	1864.50
Volumen del hueco	2505.51	1370.96
Densidad húmeda	1.8	1.7
Peso:gr	Volumen: cm <sup>3</sup>	Densidad: gr/cm <sup>3</sup>

**Tabla 3.4:** Cálculo de la densidad seca en laboratorio

<b>PUNTO</b>	<b>PLT-3</b>	<b>PLT-4</b>
Cápsula N°	73.00	43.00
Peso de cápsula	28.21	28.88
Peso cáp + sue.humedo	112.00	88.00
Peso cáp + sue.seco	111.00	86.50
Vol suelo	46.24	34.97
Densidad seca	1.79	1.65
%Humedad (h)	1.21	2.60
Densidad seca en campo	1.79	1.65
Peso:gr	Volumen: cm <sup>3</sup>	Densidad: gr/cm <sup>3</sup>



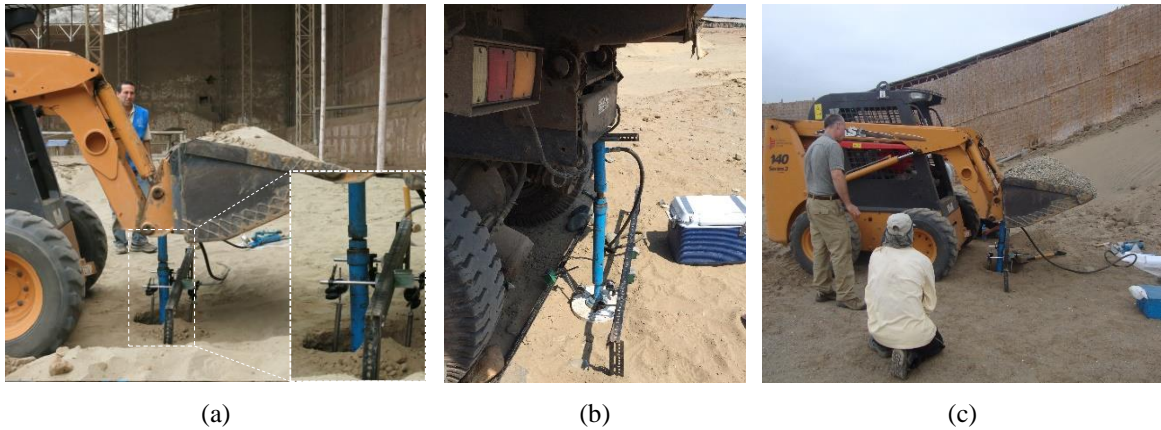
**Figura 3.18:** Muestra de (a) suelo recuperado y (b) arena del ensayo de cono de arena.

Los resultados de este ensayo muestran de la densidad del primer estrato de suelo se encuentra entre 1.7 y 1.8  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . Estos resultados se emplearan como parámetros de entrada de los ensayos geofísicos y el de placa de carga.

### **Ensayo de placa de carga**

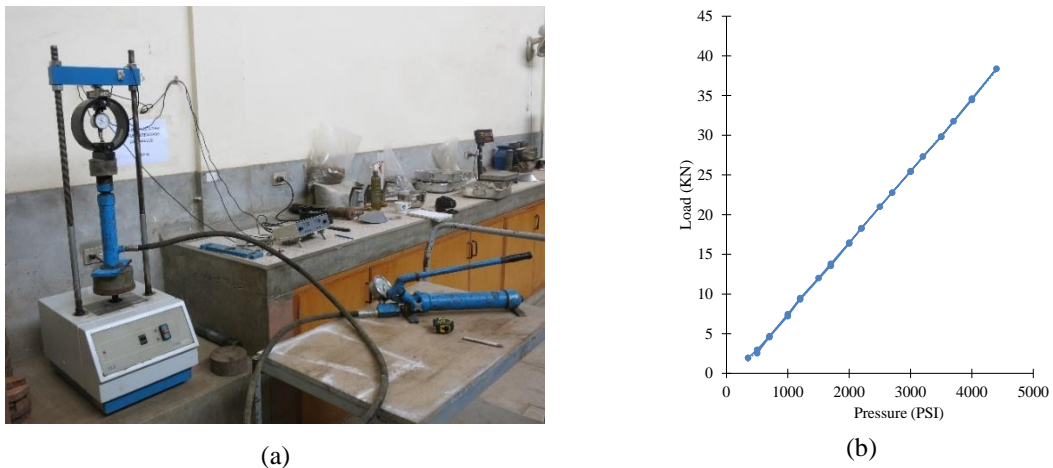
El ensayo de placa de carga consiste en la aplicación de una carga estática en incrementos uniformes sobre una placa circular de acero que se encuentra en total contacto con la superficie que va a ser ensayada. En este ensayo la mayor porción de la deformación total ocurren dentro de una profundidad que es dos veces el diámetro de la placa (Ping & Ge, 1997). En el complejo arqueológico de Huaca de la Luna se llevaron a cabo cuatro ensayos de placa de carga, de los cuales dos se realizaron cercanos a la fachada norte y los otros dos cercanos a la fachada sur.

En el complejo de huaca de la luna se realizaron cuatro ensayos de placa de carga (PLT) en el primer estrato del suelo. Se realizaron dos ensayos cercanos a la fachada norte y otros dos cercanos a la fachada oeste del complejo (ver Figura 3.8). En la Figura 3.19 se pueden observar algunas imágenes referentes a los equipos utilizados para la ejecución de este ensayo en las diferentes locaciones. Los ensayos se llevaron a cabo empleando como base una placa de acero circular de 300mm y como carga de reacción se empleó un camión y un cargador bobcat. Se niveló el área de trabajo y se colocó la placa de tal manera que la carga que transmite la gata hidráulica y la que viene del camión sea transfieran concéntricamente a la base. La carga fue controlada con el medidor de la gata hidráulica y se aplicó en incrementos de 100 psi. Los asentamientos se midieron con tres medidores de dial de 0.01mm de división de dial. Después del asentamiento final en cada estado, se descargó la placa en un promedio de 200 psi. En el anexo A se pueden observar los registros de la data tomada en campo. Las recomendaciones adicionales que se tomaron en el ensayo se pueden ver en la norma (ASTM D1194, 1994).



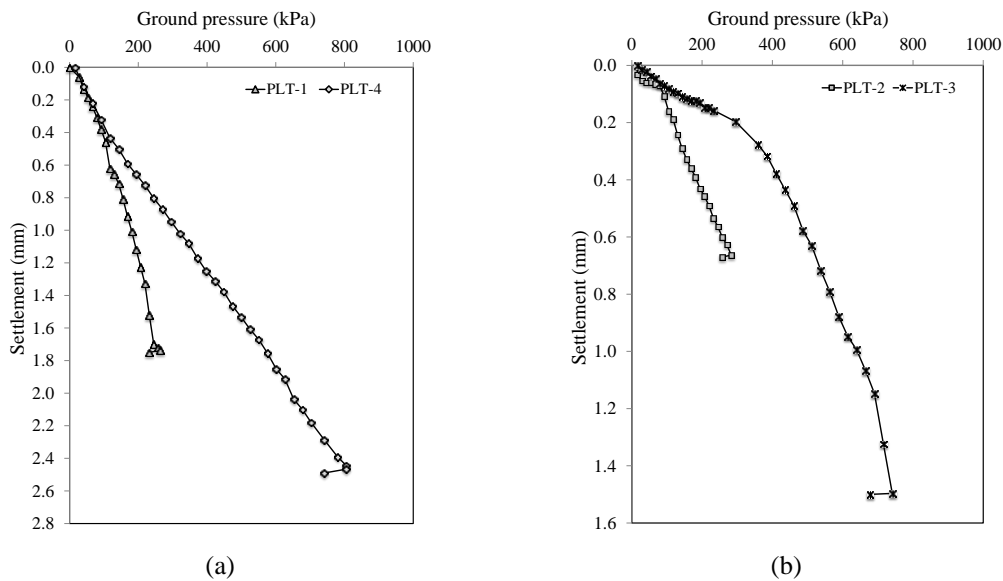
**Figura 3.19:** Ensayo de placa de carga en (a), (b) fachada norte y (c) fachada oeste.

Para correlacionar la presión que se aplica a la placa y la presión medida en el gato hidráulico se debió realizar la calibración de la gata. La calibración consistió en la instalación de la gata en un sistema de medición de carga, de tal manera que a diferentes presiones aplicadas en la gata se pueda medir la fuerza de empuje que ejerce el pistón. Se realizaron tres mediciones de carga y descarga cuyos resultados se pueden observar en la Figura 3.20. Conociendo la fuerza en la gata y el área de la placa de base se calcula la presión en la placa de base.



**Figura 3.20:** (a) Calibración de la gata y (b) grafica de correlación de presión –carga en la gata.

Con los resultados de la pruebas de carga se generaron dos gráficos de las curvas de carga-asentamiento del suelo. Para comparar los resultados se han realizado dos gráficas agrupadas por la cercanía en que se realizaron los ensayos (ver Figura 3.21). Los ensayos de placa PLT-1 y PLT-2 se realizaron empleando un cargador bobcat como reacción, mientras que en los ensayos LT-3 y PLT-4 se realizaron empleando un camión. El cargador bobcat es más liviano que el camión, por eso no fue posible aplicar más carga en los dos primeros ensayos. Esto puede haber generado que la curva de estos ensayos sea más corta y que la de los dos últimos. La deformación máxima que ocurre para la máxima carga es de 2.4 mm y 1.5 mm respectivamente. Estos resultados permitirán calcular el módulo de balastro ( $K_s$ ) y estimar el módulo de elasticidad del suelo ( $E$ ).



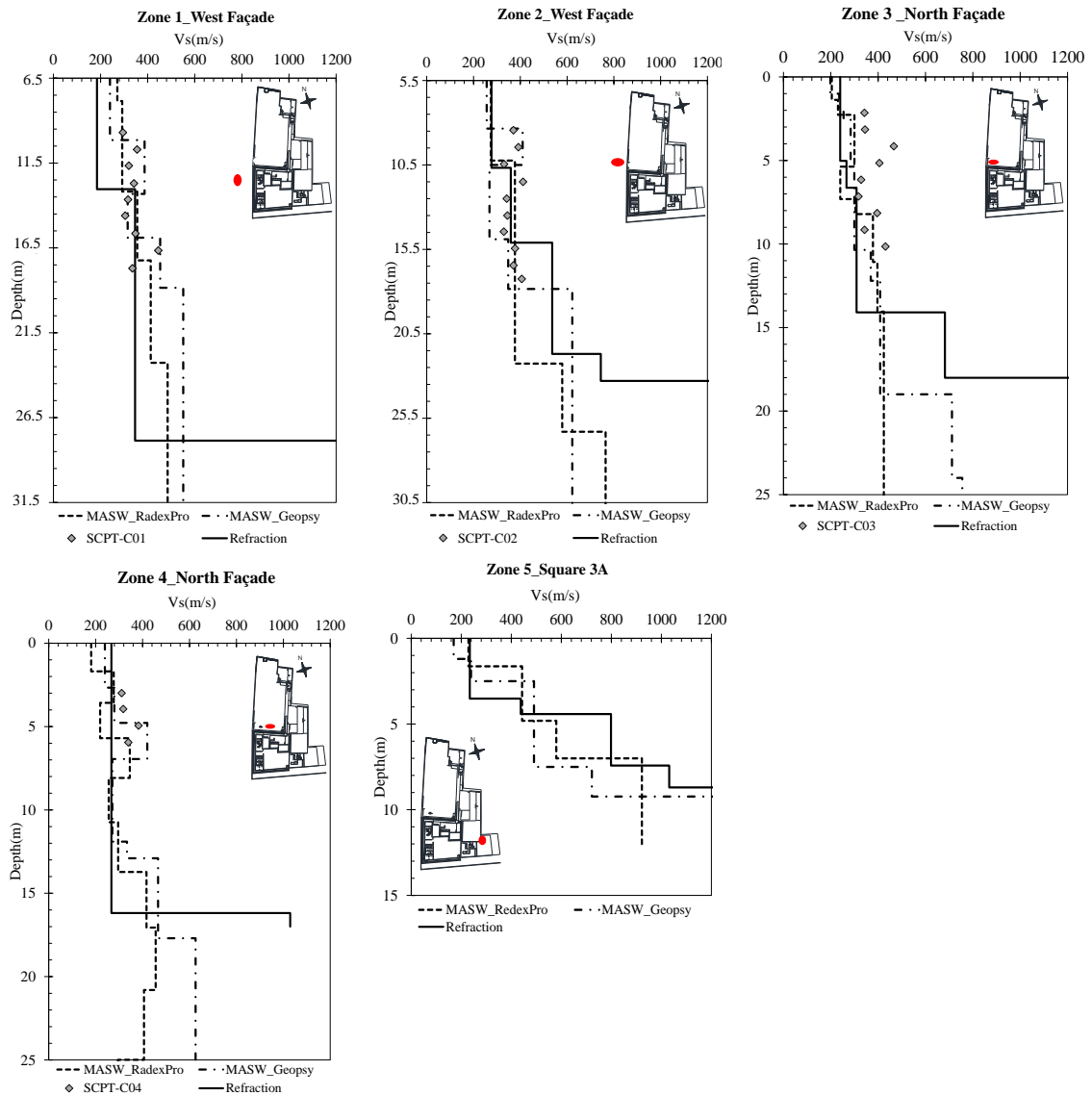
**Figura 3.21:** Curva de carga – deformación del suelo cerca a (a) la fachada norte y (c) fachada oeste.

### 3.6. Interpretación y discusión de resultados

Complementado los resultados de la campaña 2015 con los resultados de la campaña geotécnica del 2014 se puede hacer una mejor estimación del perfil del suelo en el complejo de Huaca de la Luna cerca de la zona de interés (esquina noroeste).

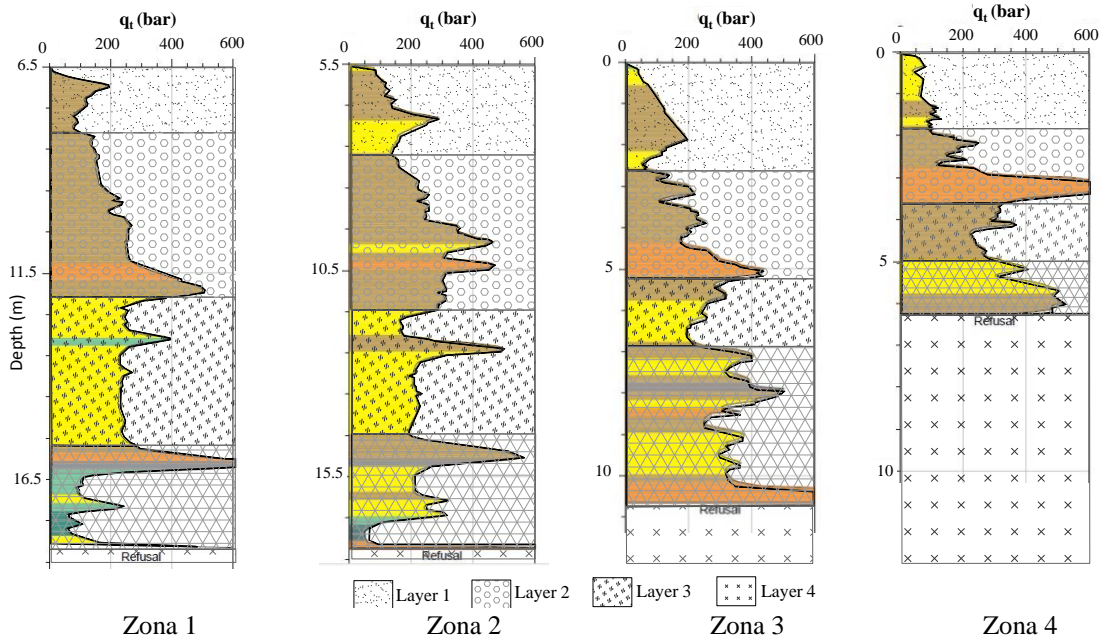
Los resultados del muestreo con barreno manual basados en las pruebas de laboratorio y clasificación visual de las muestras de suelo tomadas muestran que el estrato de suelo superficial en el barreno B-1 de la fachada norte está conformado por arena limosa. El siguiente estrato está compuesto por arena y arena gravosa (ver Figura 3.16). En el barreno B-2 el estrato superficial está conformado por arena pobremente gradada seguido por un estrato de arena limosa con fragmentos de adobe.

Los resultados de la velocidad de onda de corte se agruparon en 5 zonas. La zona 1 se localiza a lo largo de la fachada oeste e incluye al Perfil 7 y SCPTu-1. La zona 2 también se localiza en la fachada oeste pero al norte de la zona 1 e incluye al Perfil 5 y 6 y al SCPTu-2. La zona 3 se ubica en el área oeste de la fachada norte e incluye el Perfil 1 hasta el Perfil 3 y al SCPTu-3. La zona 4 se ubica en el área este de la fachada norte e incluye el Perfil 4 y 8 y el SPCTu-4. Finalmente la zona 5 se localiza en la plaza 3A e incluye el perfil 9 hasta el perfil 11. En la Figura 3.22 se observa la interpretación de los perfiles de velocidad de onda de corte de cada zona. Estos resultados se calcularon tomando un promedio de todos los perfiles de cada zona.



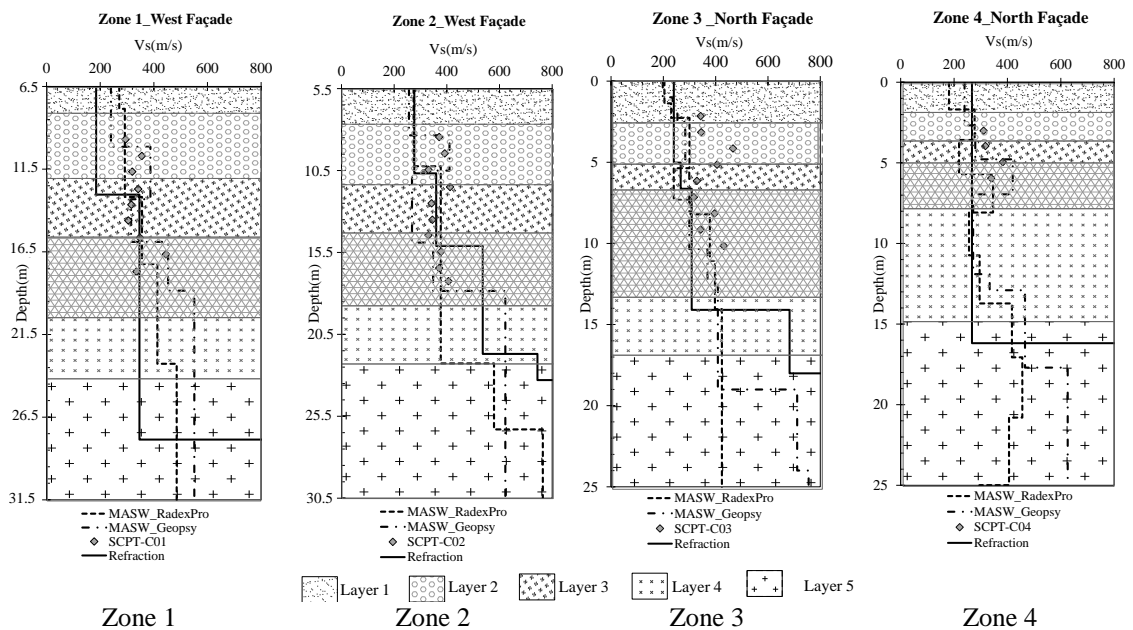
**Figura 3.22:** Comparación de los perfiles de velocidad de onda de corte del MASW, SCPTu y refracción sísmica para cada zona.

En general los resultados del SCPTu indican que el área de estudio tiene un suelo de cimentación comprendido por estratos de arena media densa a arena densa de 5.5 m de espesor, con un estrato intermedio de grava. Este estrato es seguido por un estrato de arena densa a muy densa de un rango de profundidad de 6 a 12 m, que está soportado por un estrato duro. La Figura 3.23 muestra el perfil de suelo interpretado basado en la resistencia por punta del SPCTu, el cual consiste de 4 estratos de arena. Estrato 1 tiene un promedio de resistencia por punta en el rango de 70 to 110 bar (arenas medianamente densas). Estrato 2 tiene un promedio de Resistencia por punta en el rango de 175 to 240 bar (arenas densas a muy densas). Estrato 3 tiene un promedio de resistencia por punta en el rango de 225 to 250 bar (arenas muy densas). El estrato 4 tiene un promedio de resistencia por punta en el rango de 210 to 375 bar (arenas muy densas) y está soportado por un estrato duro donde se encuentra el rechazo del cono.



**Figura 3.23:** Interpretación de los estratos del suelo basados en la resistencia por punta del SCPTu.

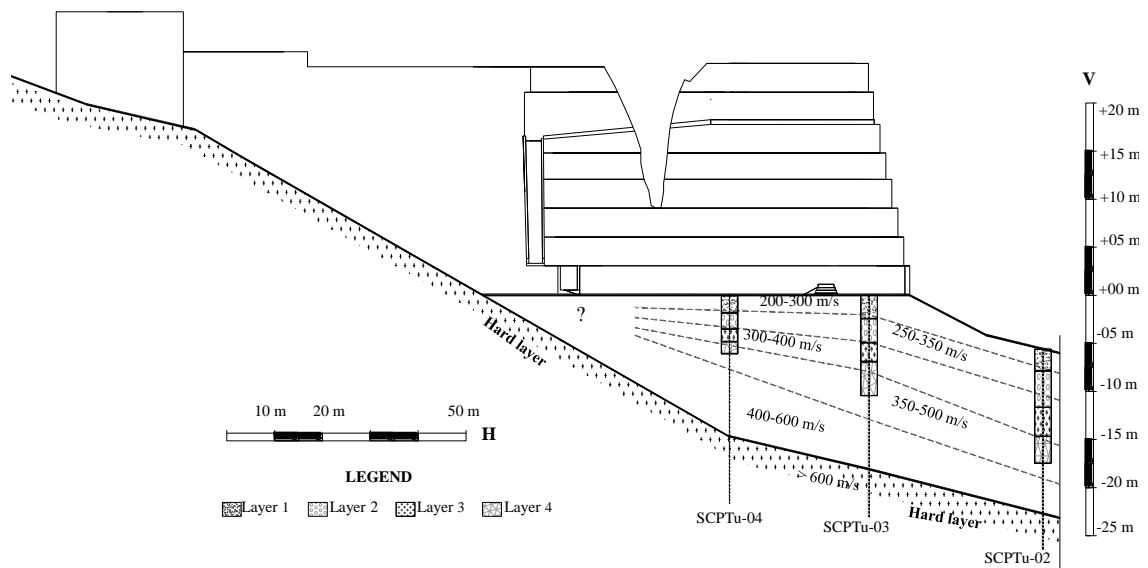
Las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) obtenidas del MASW, refracción sísmica y SPCTu se compararon con la finalidad de evaluar la  $V_s$  del área principal del presente estudio. En la Figura 3.24 se observa la interpretación del perfil del suelo basada en las medidas de la velocidad de onda de corte. El estrato 1 presenta una  $V_s$  promedio en el rango de 200 a 300 m/s. El estrato 2 presenta un  $V_s$  promedio en el rango de 250 a 350 m/s. El estrato 3 presenta un  $V_s$  promedio en el rango de 300 a 400 m/s. El estrato 4 presenta un  $V_s$  promedio en el rango de 350 a 500 m/s. El estrato 5 presenta un  $V_s$  promedio en el rango de 400 a 600 m/s y está soportado por un estrato duro con  $V_s$  superior a 600 m/s. Este último estrato se podría considerar que es la roca de fondo en base a la  $V_s$  encontrada y de acuerdo a referencia de otros estudios (Olona, et al., 2010), (Seshunarayana & Sundararajan, 2004) y (Miller, et al., 1999).



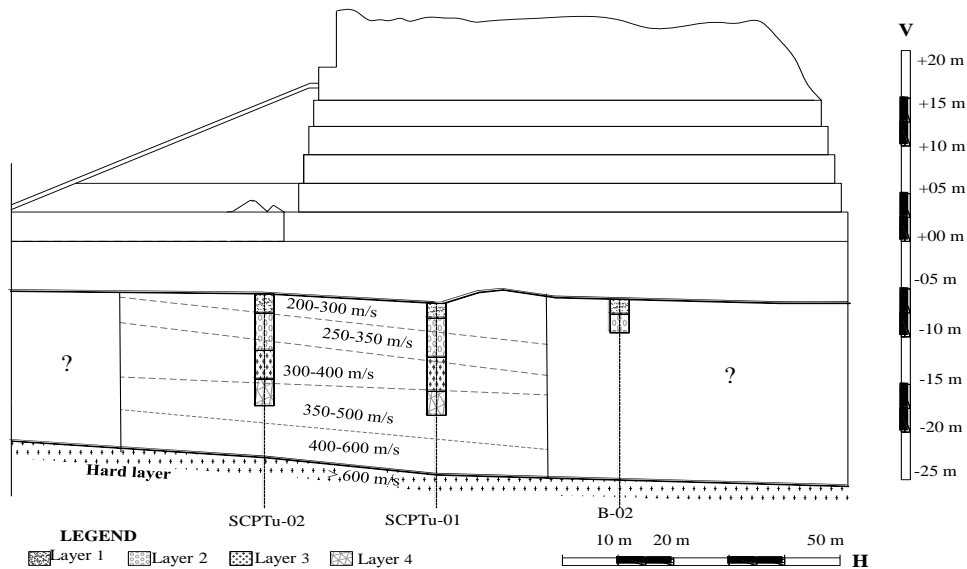
**Figura 3.24:** Interpretación de la estratigrafía del suelo basado en la velocidad de onda de corte

La Figura 3.25 muestra una comparación de los resultados obtenidos con los estudios geofísicos y geotécnicos. La clasificación del suelo basada en la resistencia por punta del SCPTu y el muestre con barreno manual se detalla como columnas con diferentes estratos. Dichos estudios llegaron hasta una profundidad de 12 m aproximadamente. La clasificación del suelo basada en la velocidad de onda de corte se muestra con estratos horizontales indicando los rangos de Vs.

La interpretación geofísica concuerda bastante bien con los resultados calculados a través de los ensayos geotécnicos, encontrándose diferencia de profundidades menores a  $\pm 2.5$  m.



(a) Estratigrafía en la fachada norte.



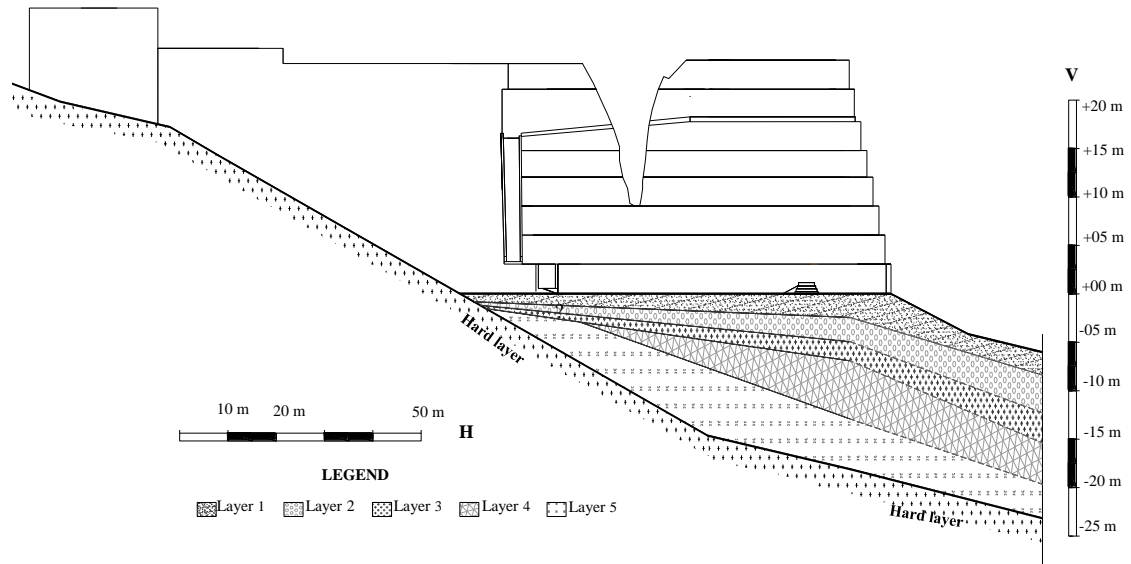
(b) Estratigrafía en la fachada Oeste.

**Figura 3.25:** Comparación de los resultados de los métodos geofísicos y de los resultados de los métodos geotécnicos del SCPTu y barreno manual.

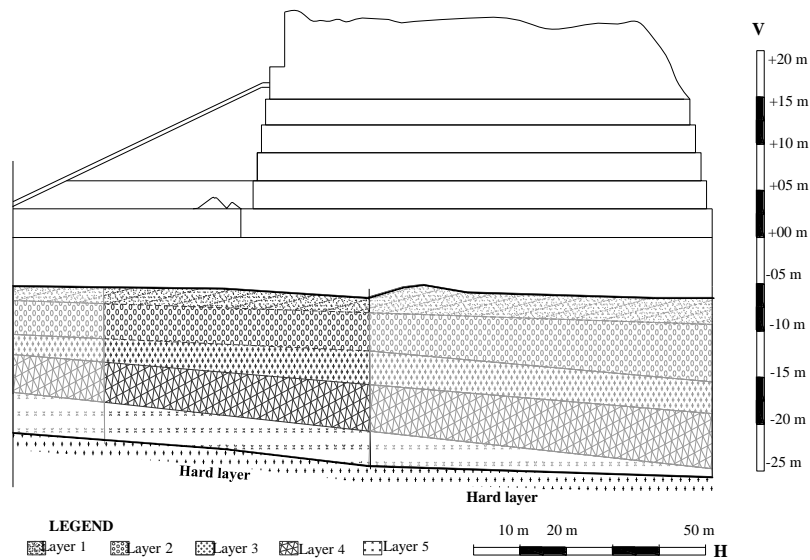
En la Figura 3.26 se observa un perfil estratigráfico generalizado de la fachada norte y de la fachada oeste que fue interpretado empleado la resistencia por punta del SCPTu y la

velocidad de onda de corte del MASW, refracción sísmica y SCPTu. Ambos perfiles muestran la existencia de 5 estratos que se describirán a continuación y que tienen una pendiente que va de este a oeste, generalmente siguen la pendiente del estrato duro del fondo que aflora al este de la huaca.

El suelo de cimentación en el área de la esquina noroeste está conformado por arena medio densa (*Layer 1*) a muy densa (*Layer 2, 3 y 4*), roca erosionada (*Layer 5*) y en el fondo se presenta un estrato que podría ser la roca base.



(a) Estratigrafía en la fachada norte.



(b) Estratigrafía en la fachada Oeste.

**Figura 3.26:** Interpretación final del perfil estratigráfico del suelo basados en los métodos geofísicos y geotécnicos.

Basándose en la interpretación de los perfiles de suelo, es probable que el asentamiento sea mayor en la esquina noroeste que en los alrededores. Esta información se empleará en el futuro para desarrollar modelos en elementos finitos para investigar más a fondo si el daño estructural puede estar relacionado con las condiciones de cimentación de la Huaca. Estos

resultados también se emplearán para complementar la información necesaria para llevar a cabo una evaluación sísmica global de todo el monumento.

### **3.7. Conclusiones**

En Huaca de la Luna, uno de los monumentos arqueológicos más importantes del Perú, se realizó una extensa campaña de ensayos geotécnicos y geofísicos que incluyen MASW, SCPTu, placa de carga, muestreo con barreno manual y densidad de campo. La interpretación de los perfiles de suelo basados en los ensayos geofísicos y geotécnicos a manera general se encuentra en buena relación, lo que resalta la utilidad de los ensayos geofísicos para ayudar a definir las condiciones del suelo de cimentación. La principal ventaja de los ensayos es su naturaleza no invasiva. Por eso los investigadores tienen gran interés en los ensayos con ondas de superficie aplicados a la investigación de monumentos arqueológicos. Estos métodos son una de las pocas opciones para la exploración geotécnica en sitios de estructuras patrimoniales.

En general los resultados indican que el área afectada tiene un suelo de cimentación comprendido por arena medio densa de 5.5 m de espesor, seguido por arena muy densa de 6 a 13 m aproximadamente y que están soportadas por dos estratos duros que podrían ser roca erosionada y en el fondo roca fresca (roca base). Los resultados muestran que los estratos de suelo generalmente siguen la pendiente del estrato duro del fondo que aflora al este de la huaca. Los perfiles 2D del suelo indican que la profundidad de la roca base en el lado Noroeste es más profunda que en otras áreas de la huaca. Los resultados de la presente investigación se utilizarán en la evaluación estructural de la huaca. Esta evaluación incluye el análisis de asentamiento y respuesta dinámica de la iteración suelo-estructura bajo movimiento sísmico simulado que toma en cuenta las características de sismicidad local.

## **Capítulo 4 - Caso de estudio Iglesia San Pedro en Andahuaylillas-Cusco.**

Este Capítulo muestra los resultados de la campaña de ensayos geofísicos de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW) y técnica de cociente espectral (H/V) llevados a cabo con fines de caracterización geotécnica en Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas (Cusco). Esta Iglesia se encuentra localizada a 41 km de la ciudad de Cusco sobre los 3100m.s.n.m en el distrito de Andahuaylillas y fue construida por la congregación de los Jesuitas en el siglo XVI sobre una huaca pre-colombina. La Iglesia es denominada la “Capilla Sixtina de los Andes” por lo hermoso de su pintura mural y su arquitectura. Pertenece al grupo de Iglesias de la denominada “ruta de del barroco andino”, que son monumentos patrimoniales de los siglos XVII y XVIII.

Antes de empezar los trabajos se realizó una inspección preliminar para determinar las áreas donde se realizarían los ensayos. Las áreas seleccionadas fueron los lados laterales, posterior y frontis de la de la estructura de la Iglesia. Se realizaron 8 líneas de MASW y 4 puntos de cocientes espectral (H/V). Para ambos ensayos se emplearon acelerómetros con sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 a 1000 Hz, un sistema de adquisición de datos de 12 canales y 24 bits y una computadora portátil para almacenar la información.

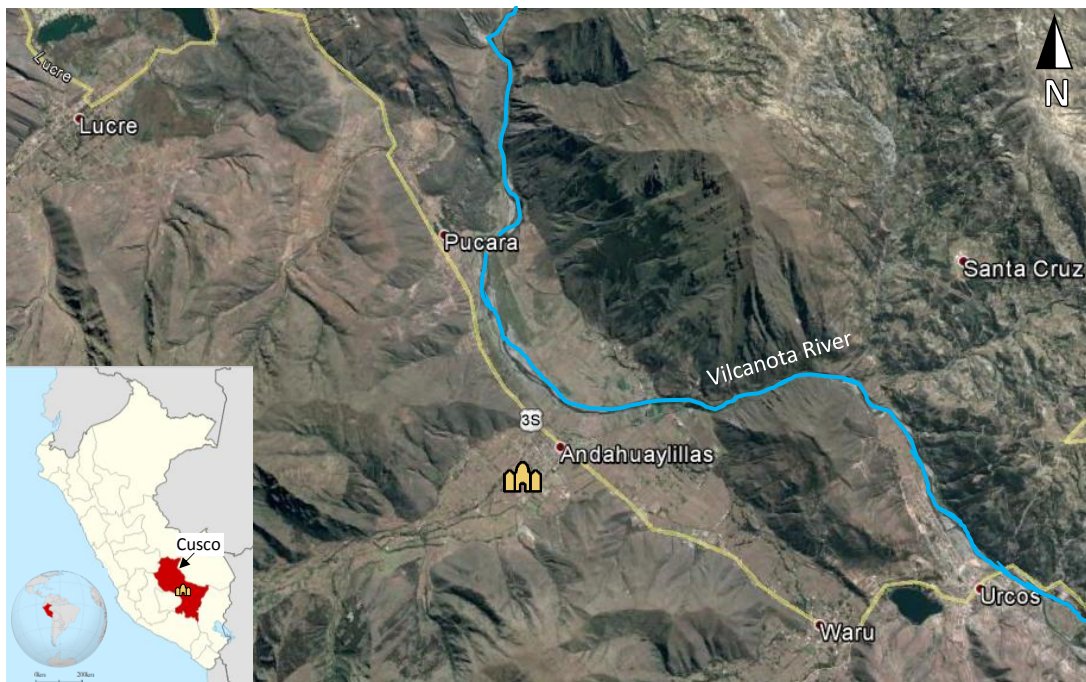
El resultado final de los estudios muestra que el suelo de cimentación de la Iglesia está constituido por 4 estratos de suelo. El primer estrato está conformado por material aluvional de compacidad medianamente densa (limo arenoso y rellenos) con  $V_s$  entre 150 a 260 m/s y los tres estratos siguientes están conformados por grava arenosa con diferentes densidades. El segundo estrato esta conformados por material aluvional de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 270 a 480 m/s. El tercer estrato es un material aluvional de compacidad densa a muy densa con  $V_s$  entre 550 a 730 m/s y finalmente el cuarto estrato es un material aluvional de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  980 a 1300 m/s. De acuerdo a los resultados de  $V_{s30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo entre 7.9 Hz hasta 9.7 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.10 s hasta 0.13 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.4 a 2.4.

Los resultados de este estudio servirán para determinar las condiciones del suelo de cimentación de la Iglesia. Adicionalmente esta información se empleará como información complementaria para realizar la evaluación estructural integral de la Iglesia con el objetivo de determinar su comportamiento ante cargas de gravedad y de sismos.

## 4.1.Introducción

En el presente capítulo se desarrolla la aplicación de los métodos geofísicos para la exploración del suelo en la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas (Cusco). Entre los métodos geofísicos que se emplearon tenemos el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y el cociente espectral (H/V). Los resultados de este estudio llevado a cabo con fines geotécnicos servirán para determinar las condiciones del suelo de cimentación de la Iglesia. Adicionalmente esta información se empleará como información complementaria para realizar la evaluación estructural integral de la Iglesia con el objetivo de determinar su comportamiento ante cargas de gravedad y de sismo.

La iglesia San Pedro Apóstol se ubica a 41 km de la ciudad de Cusco sobre los 3100m.s.n.m en el distrito de Andahuaylillas (Ver Figura 4.1a). Esta Iglesia es destacada en América, es Patrimonio Nacional del Perú desde 1980 y fue construida por la congregación de los Jesuitas en el siglo XVI sobre una huaca pre-colombina o espacio ceremonial. La construcción del templo actual empezó en 1570 con la creación de una pequeña capilla correspondiente al ábside (bóveda) del santuario. La nave y la fachada del santuario fueron construidas en 1606. La iglesia San Pedro Apóstol es llamada la “Capilla Sixtina de los Andes” por lo hermosos de su pintura mural y su arquitectura (ver Figura 4.1b y Figura 4.1c). El santuario tiene un techo policromado de estilo mudéjar construido utilizando un método de construcción prehispánico llamado Kur-Kur que combina la caña, paja y barro en lugar de madera (WMF, 2015).



(a)



**Figura 4.1:** (a) Mapa de ubicación, (b) Frontis y (c) vista interna de la Iglesia (WMF, 2015)

La estructura de la Iglesia tiene dimensiones de 27 m x 61 m aproximadamente y está conformada por dos sectores: la nave central y el presbiterio. En el primer sector se encuentra el acceso principal, el baptisterio, la torre del campanario y dos capillas laterales. En el segundo sector se ubica el Arco Triunfal y cuatro capillas laterales. La nave principal de la Iglesia tiene un segundo nivel donde se encuentra el coro cuyo acceso es por la torre del campanario. La estructura de la Iglesia está constituida principalmente por muros de adobe de 2 m de ancho. La cimentación es de mampostería de piedra con mortero de barro y tiene una profundidad de 0.50 m aproximadamente. Existen además sobrecimientos con la misma mampostería de piedra que tienen 1m de altura aproximadamente. Los muros de adobe están recubiertos con una capa de yeso decorado de espesor variable. La estructura del techo de la nave es de “par y nudillo”, que se forma por elementos de madera dispuestos en un arreglo triangular, unidos por un madero horizontal en el tercio superior de su altura. También existen en la nave varios tensores dobles horizontales a nivel del nacimiento de los pares. La cobertura es de teja de arcilla cocida tradicional en la zona (Vargas, et al., 2013).

Los primeros trabajos de restauración de la Iglesia de los cuales se tiene conocimiento datan de los años 1957 y 1958 donde la Corporación de Reconstrucción y Fomento del Cusco (CRIF), a través de su Departamento de Reconstrucción de Monumentos Históricos, intervino la Iglesia. Los trabajos de la CRIF implicaron cambios en las estructuras de las cubiertas, construcción de dos contrafuertes de piedra en la fachada, reconstrucción del cuerpo superior de la torre y refuerzos en las cimentaciones de los muros. Posteriormente entre 1979 a 1981 la UNESCO con aportes del Plan COPESCO y del BID también realizaron trabajos de intervención. Más adelante en la presente década con el apoyo de La Fundación Repsol, el *World Monuments Fund* y la Compañía de Jesús se ejecutaron trabajos de restauración integral de la edificación arquitectónica, las obras de arte y los bienes muebles (Andahuaylillas, 2015).

La mayoría de intervenciones que se han realizado en la Iglesia consistieron principalmente solo en trabajos de puesta en valor y conservación estética. Lamentablemente en los últimos años se ha evidenciado una serie de problemas estructurales de carácter global y local que implican riesgos de inestabilidad estática y dinámica. De ahí la importancia de

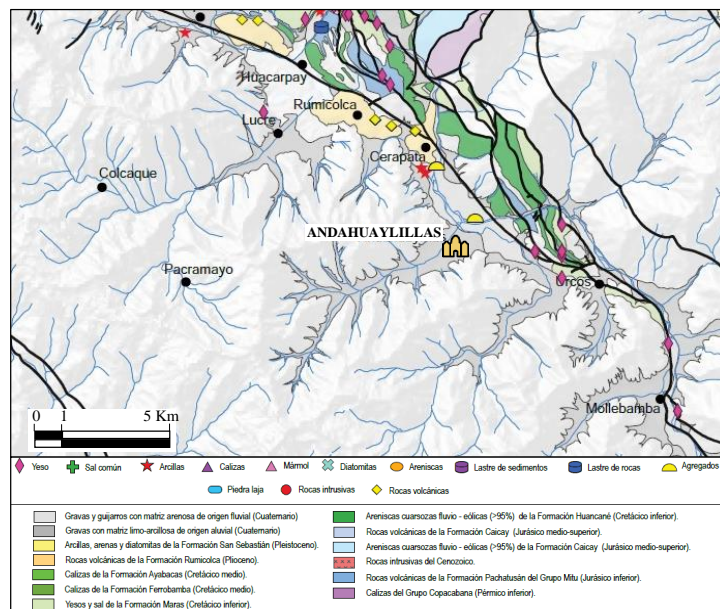


entre las areniscas como en las limolitas. Ocasionalmente se encuentran depósitos lenticulares de yeso muy pequeños.



**Figura 4.3:** Imágenes del cono de deyección en Andahuaylillas (a) vista hacia el Suroeste y (b) vista hacia el Noreste cercano al río Vilcanota.

De acuerdo a la descripción de la carta geológica el cuadrángulo de Cusco se caracteriza por presentar rocas y minerales industriales (RMI) como arcillas, arenas, piedra de construcción, yesos, gravas, etc., que se explotan actualmente. Esto se puede observar a detalle en el mapa de la Figura 4.4. En este mapa se aprecia que Andahuaylillas se encuentra ubicado en una formación geológica de suelos conformados por gravas con matriz limo - arcillosas de origen aluvial, que provienen de los conos aluviales cuaternarios situados en las desembocaduras de las quebradas transversales al río Vilcanota. Esto confirma lo que se mencionó anteriormente con respecto a la formación geológica donde se encuentra ubicada la zona en estudio.



**Figura 4.4:** Mapa de rocas y minerales de los alrededores de la zona en estudio (Adaptado de (Carlotto, et al., 2011))

### 4.3. Metodología del estudio

Para la caracterización del suelo en la Iglesia de Andahuaylillas se aplicaron técnicas de exploración geofísica ubicadas alrededor de la Iglesia. Los resultados de los estudios geofísicos se complementaron con los resultados de la investigación geológica que se presenta en el acápite anterior y con los resultados de 5 calicatas realizadas años en dicho monumento histórico y que se reporta en el estudio de mecánica de suelos efectuado por (Fernández Baca, 2008). Finalmente se realizó una discusión e interpretación de los resultados para determinar el perfil de suelo aproximado en función a toda la información con la que se contaba. Estos resultados también incluyen determinar el periodo fundamental del suelo y las velocidades de onda de corte de cada estrato.

Entre las técnicas de investigación geofísica que se aplicaron en la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas tenemos el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y la técnica del cociente espectral (H/V). Los ensayos comprendieron 8 líneas de MASW y 4 puntos de H/V. Un plano con la ubicación de los ensayos se puede observar en la Figura 4.5.

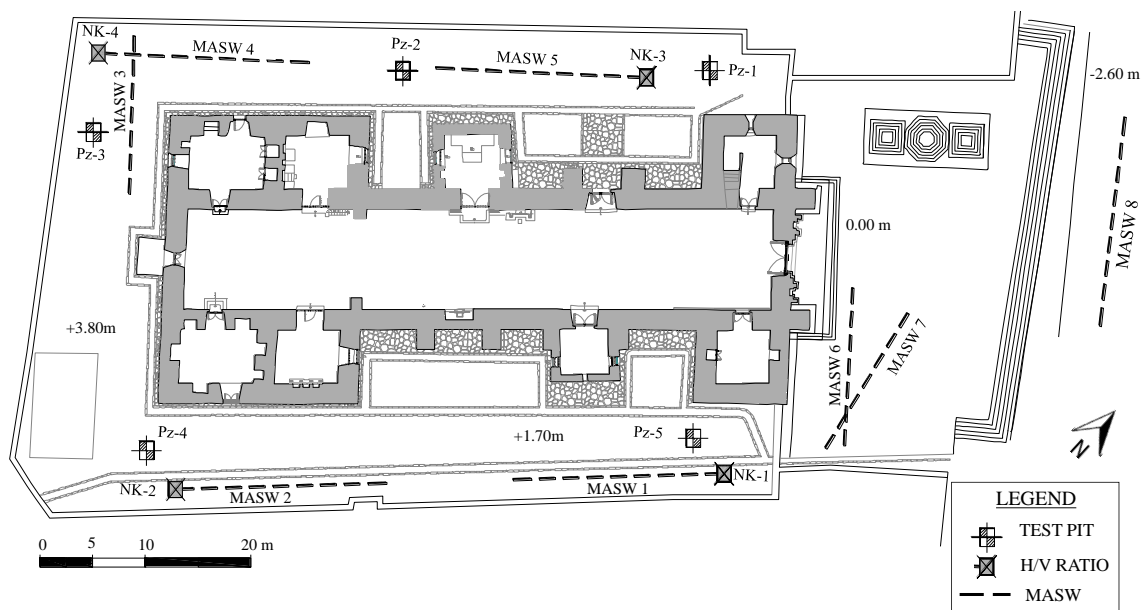


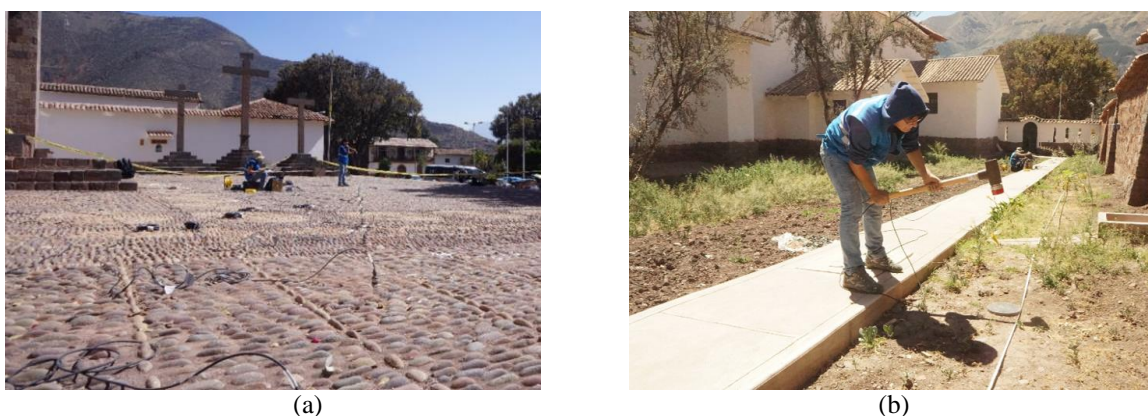
Figura 4.5: Ubicación de los ensayos de MASW y cociente espectral realizados en la Iglesia.

#### 4.3.1. Exploración con MASW

En la Iglesia se establecieron ocho líneas de registro para ensayos MASW ubicadas en los exteriores de la estructura principal tal como se observa su ubicación en la Figura 4.5. Tres líneas se realizaron en el frontis de la Iglesia, dos líneas en el lado lateral izquierdo, dos líneas en el lado lateral derecho y una en la parte posterior de la Iglesia. En la Figura 4.6 se muestra la aplicación del MASW al frente de la fachada de la Iglesia y en el lado derecho.

En este caso para registrar las señales se emplearon acelerómetros que tienen una sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 a 1000Hz. La señal medida en cada acelerómetro fue de 1 s muestreando a una frecuencia de 12.8 kHz. En algunos casos se

obvió el empleo de la plancha de base para impactar con el martillo debido a cada que se golpeaba sobre la plancha ésta rebotaba y generaba un impacto doble. Esto generaba dos picos en la señal de los acelerómetros.



**Figura 4.6:** Ensayos MASW en (a) el frontis y (b) en el lateral Este de la Iglesia

Cada uno de estas líneas de registro presenta una dirección y longitud determinada tal como se resume en la Tabla 4.1

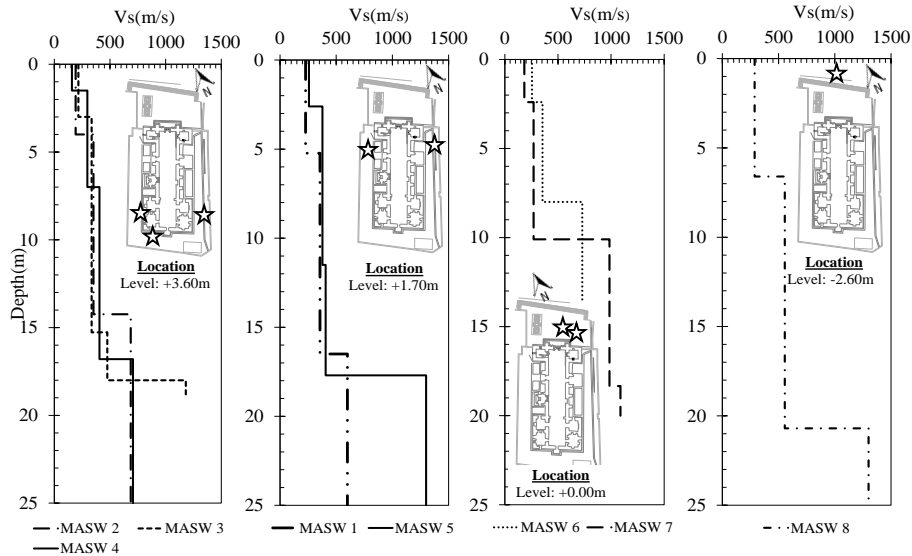
**Tabla 4.1:** Descripción de las líneas de registro del ensayo MASW.

Item	Nombre de línea	Dirección	dx (m)	Longitud (m)	Ubicación
1	MASW 1	S-N	2	20	Lateral Oeste
2	MASW 2	N-S	2	20	
3	MASW 3	E-O	1.5	15	Posterior
4	MASW 4	N-S	2	20	Lateral Este
5	MASW 5	S-N	2	20	
6	MASW 6	O-E	1.5	15	Frontis
7	MASW 7	NO-SE	1.5	15	
8	MASW 8	O-E	2	20	

Para procesar las señales se realizó un pre-procesamiento de la información tomada en campo, empleando una rutina en MATLAB para realizar la suma (*stacking*) de las 10 señales tomadas en cada acelerómetro para cada ubicación del martillo. Posteriormente se calculó la curva de dispersión y se realizó un análisis de inversión para determinar el perfil de velocidad de onda de corte empleando el programa Geopsy (Wathelet, 2011), que tiene módulos que facilitan el procesamiento de la información del MASW.

En el Anexo F se muestra los resultados de las curvas de dispersión experimental, la comparación de la curva de dispersión teórica con la experimental y el perfil 1D de la velocidad de onda de corte de cada uno de los perfiles de MASW realizados.

En la Figura 4.7 se presentan 4 gráficas donde se hace un resumen comparativo de los 8 perfiles de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Los perfiles se han agrupado en cuatro zonas, debido al desnivel topográfico en el que se encuentran los lugares donde se realizaron los ensayos MASW.



**Figura 4.7:** Comparación de los perfiles de Vs de las líneas MASW de los (a) laterales y (b) frontis de la Iglesia

Con estos resultados se ha determinado la velocidad de propagación de ondas de corte promedio  $V_{S30}$  de acuerdo al (IBC, 2009). A pesar que se tiene la limitación de que los perfiles de Vs calculados han llegado hasta una profundidad no mayor a 25 m se asumió que la velocidad de ondas de corte se mantiene constante en los últimos metros y es igual al último valor registrado. Esta aproximación es conservadora si se considera que en la mayor cantidad de los casos la velocidad de ondas de corte aumenta con la profundidad.

Bajo estas consideraciones se calculó los valores de  $V_{S30}$  y el tipo de suelo correspondiente para las diferentes líneas de MASW ensayadas que se muestran en la Tabla 4.2. Con estos resultados se puede concluir que la Iglesia se encuentra cimentada sobre un suelo clasificado sísmicamente como tipo C que es un suelo muy denso o roca suave.

**Tabla 4.2:** Velocidad de onda de corte  $V_{S30}$  y tipo de suelo.

Item	Nombre de línea	$V_{S30}$	Tipo de suelo (IBC 2009)
1	MASW 1	389	Tipo C- Suelo muy denso o roca suave $360 < V_{S30} < 760$ (m/s)
2	MASW 2	412	
3	MASW 3	452	
4	MASW 4	424	
5	MASW 5	514	
6	MASW 6	542	
7	MASW 7	495	
8	MASW 8	540	

### 4.3.2. Ensayo del cociente espectral (H/V)

En la Iglesia se realizaron mediciones con esta técnica en cuatro puntos, dos ubicados en el lado lateral derecho y dos en el lado lateral izquierdo de la Iglesia. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante un tiempo de 30 minutos. En la Figura 4.8 se muestra imágenes de los trabajos durante la medición.



(a)



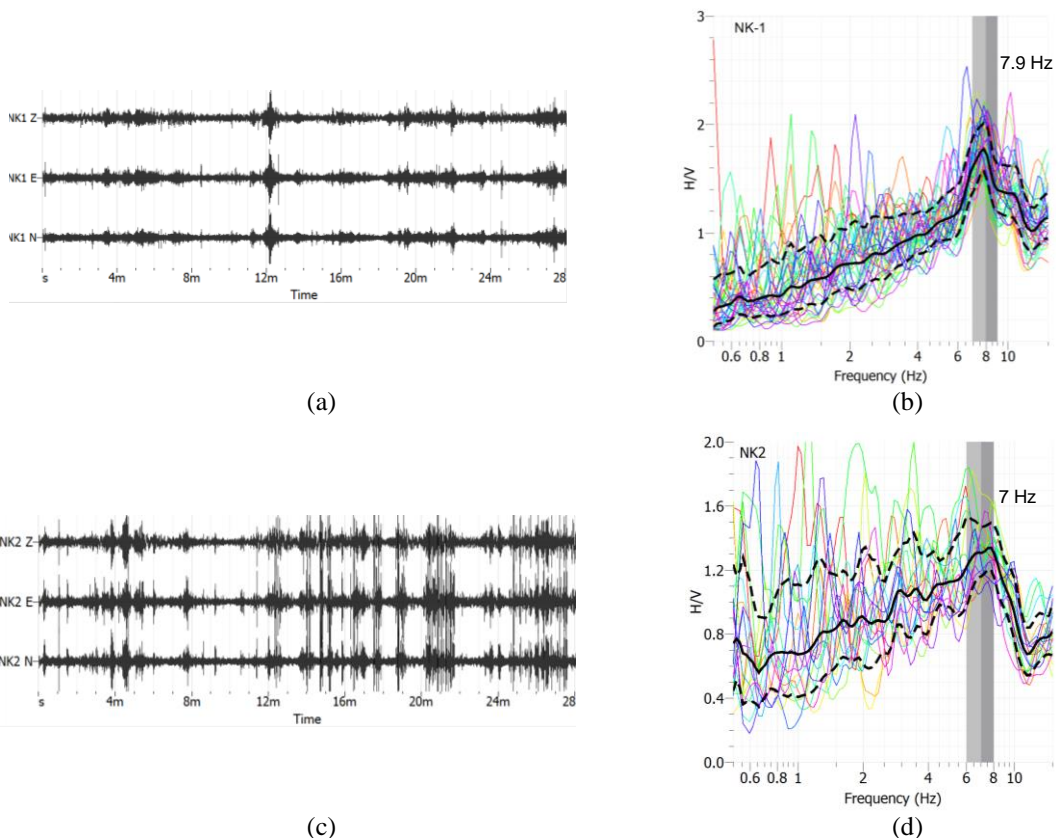
(b)

**Figura 4.8:** Ensayo del cociente espectral realizado en el (a) lado lateral este y (b) lado lateral oeste de la Iglesia.

El procesado de las mediciones tomadas en campo se realizó utilizando el programa Geopsy (Wathelet, 2011) que tiene un módulo que facilita el procesamiento de las señales del ensayo H/V.

Al aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V en los cuatro puntos de registro ubicados en los laterales de la Iglesia, se consideraron los registros de los componentes vertical (V) y horizontales ( $H_{E-O}$  y  $H_{N-S}$ ).

En la Figura 4.9 y Figura 4.10 se observa las señales registradas en cada sensor y los resultados obtenidos después del procesamiento de las señales registradas en campo en cada uno puntos de medición.



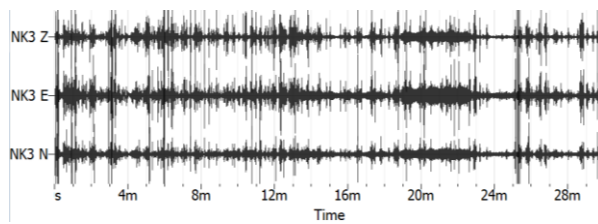
(a)

(b)

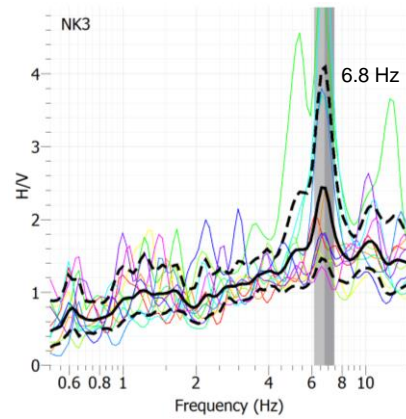
(c)

(d)

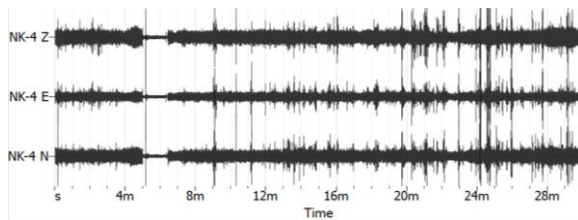
**Figura 4.9:** Señales registradas en el tiempo y resultados de cociente espectral H/V para el punto (a), (b) NK-1 y (c), (d) NK-2 respectivamente.



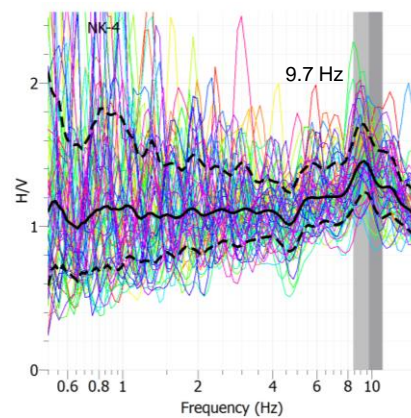
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.10:** Señales registradas en el tiempo y resultados de cociente espectral H/V para el punto (a), (b) NK-3 y (c), (d) NK-4 respectivamente.

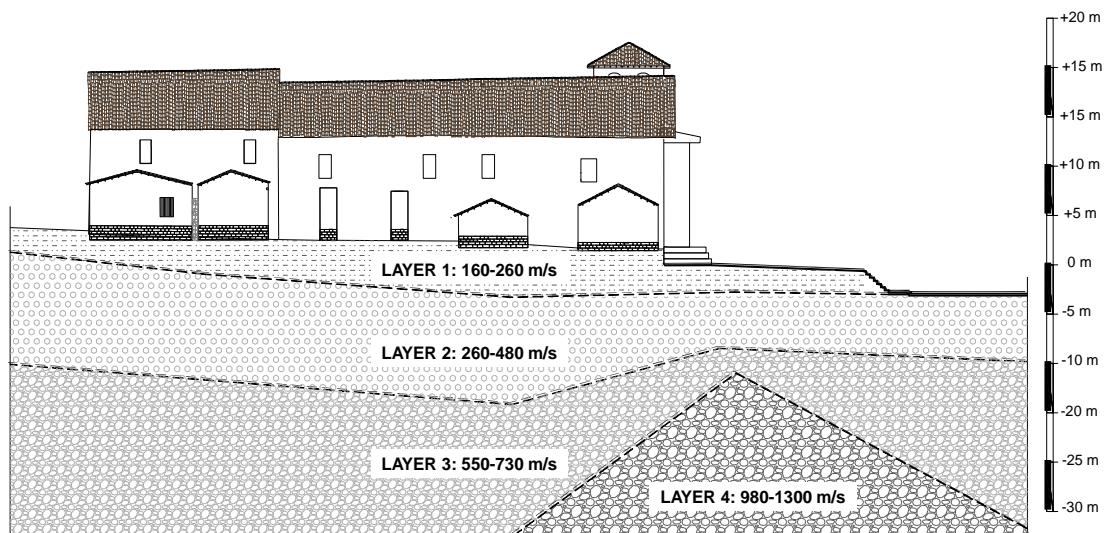
En función a las ventanas que se toman de toda la señal con el programa se calculan múltiples gráficas de cociente espectral de frecuencia (Hz) versus H/V (amplitud) para cada ventana. De estos múltiples resultados se calcula un valor promedio de amplitud y una desviación estándar por encima y por debajo de la media. Adicionalmente se calcula un valor de frecuencia promedio, y una desviación estándar por encima y por debajo del promedio. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.3 a continuación:

**Tabla 4.3:** Valores de frecuencia y amplitudes

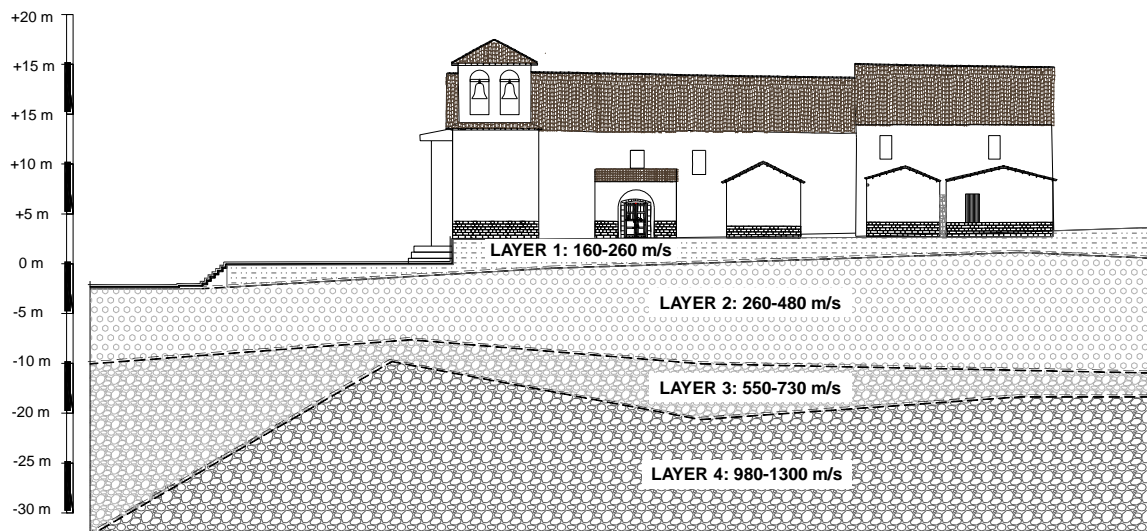
Punto de medición	Frecuencia (Hz)		Amplitud promedio
	Promedio	Desv. estándar	
NK-1	7.9	1.01	1.7
NK-2	7	1.01	1.4
NK-3	6.8	0.65	2.4
NK-4	9.7	1.3	1.4

#### 4.4. Interpretación de los resultados

En base a los perfiles de velocidad de onda de corte se puede estimar los perfiles 2D de los estratos del suelo vistos desde el lado lateral derecho y lado lateral izquierdo de la estructura de la Iglesia uniendo las zonas de cambio de velocidad en los diferentes perfiles de MASW. La interpretación de estos resultados se pueden observar en la Figura 4.11.



(a) Estratigrafía del suelo y velocidad de onda de corte – Vista lateral derecho.



(b) Estratigrafía del suelo y velocidad de onda de corte – Vista lateral izquierdo.

**Figura 4.11:** Interpretación del perfil del suelo en base al MASW

Los estratos están compuestos tal como se muestra en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4:** Distribución de los estratos del suelo.

Estrato	Vs (m/s)	Descripción
Layer 1	150 a 260	Material aluvional de compacidad medianamente densa
Layer 2	270 a 480	Material aluvional de compacidad medianamente densa a densa
Layer 3	550 a 730	Material aluvional de compacidad densa a muy densa
Layer 4	980 a 1300	Material aluvional de compacidad extremadamente densa

De acuerdo a la geología del lugar los estratos de suelo aluviales están compuestos en su primera capa por limos arenosos y rellenos, y en las capas inferiores por gravas arenosas. Adicionalmente de acuerdo a los resultados de  $V_{s30}$  se logró la clasificación sísmica del suelo como un suelo Tipo C – suelo denso o roca suave.

Adicionalmente gracias a los resultados de la técnica de cociente espectral (H/V) se obtuvieron las frecuencias del suelo en los diferentes puntos de medición. Las frecuencias de vibración están entre 7.9 Hz hasta 9.7 Hz que corresponde a un rango de periodos del

suelo desde 0.10 s hasta 0.13 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.4 a 2.4.

Esta información se empleará en el futuro para desarrollar modelos en elementos finitos para investigar más a fondo si el daño estructural puede estar relacionado con las condiciones de cimentación de la Iglesia. Estos resultados también se emplearán para complementar la información necesaria para llevar a cabo una evaluación sísmica global de todo el monumento.

#### **4.5. Conclusiones**

En la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, una de las Iglesias más importantes del Perú desde el punto de vista del patrimonio cultural, se realizó una campaña de ensayos geofísicos que incluyen MASW y técnicas de cociente espectral (H/V) con el objetivo de evaluar las propiedades geotécnicas del suelo.

En general los resultados indican que la zona en estudio presenta un suelo de cimentación comprendido por un estrato de material aluvional de compacidad medianamente densa (limo arenoso y rellenos) con  $V_s$  entre 150 a 260 m/s, seguido por tres estratos de grava arenosa con diferentes densidades. Estos estratos están conformados por material aluvional de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 270 a 480 m/s, material aluvional de compacidad densa a muy densa con  $V_s$  entre 550 a 730 m/s y finalmente soportados por un estrato de material aluvional de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  980 a 1300 m/s. De acuerdo a los resultados de  $V_{s30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo entre 7.9 Hz hasta 9.7 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.10 s hasta 0.13 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.4 a 2.4.

Los resultados de la presente investigación se utilizarán en la evaluación estructural de la huaca. Esta evaluación incluye el análisis de asentamiento y respuesta dinámica de la interacción suelo-estructura bajo movimiento sísmico simulado que toma en cuenta las características de sismicidad local.

## Capítulo 5 - Caso de estudio Iglesia San Juan Bautista en Huarro-Cusco

El presente capítulo muestra los resultados de la campaña de ensayos geofísicos de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW) y técnica de cociente espectral (H/V) llevados a cabo con fines geotécnicos en Iglesia San Juan Bautista de Huarro (Cusco). La Iglesia se encuentra localizada a 45 km de la ciudad de Cusco sobre los 3162m.s.n.m en el distrito de Huarro perteneciente a la provincia de Quispicanchi. Esta Iglesia colonial posiblemente fue construida en el siglo XVII y terminada en el siglo XVIII, está dedicada a San Juan Bautista y se ubica hacia el este de la plaza principal del poblado. La Iglesia forma parte de la “ruta del barroco andino” debido a la impresionante decoración arquitectónica y la riqueza en sus pinturas murales que combina la pintura mural andina y el barroco clásico.

Antes de empezar los trabajos se realizó una inspección preliminar para determinar las áreas donde se realizarían los ensayos. Las áreas seleccionadas fueron los lados laterales, posterior y frontis de la de la estructura de la Iglesia. Se realizaron 6 líneas de MASW y 2 puntos de cocientes espectral (H/V). Para ambos ensayos se emplearon acelerómetros con sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 a 1000Hz, un sistema de adquisición de datos de 12 canales y 24 bits y una computadora portátil para almacenar la información.

El resultado final de los estudios muestra que el suelo de cimentación de la Iglesia está constituido principalmente por 3 estratos. El primero estrato está conformado por material aluvial de compacidad medianamente densa con  $V_s$  entre 155 a 242 m/s, seguido un estratos de material aluvial de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 379 a 658 m/s y finalmente soportados por un estrato de material aluvial de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  1086 a 1800 m/s. De acuerdo a los resultados de  $V_{s30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo entre 12.8 Hz hasta 15.4 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.08 s hasta 0.06 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.3 a 1.6.

Los resultados de este estudio servirán para determinar las condiciones del suelo de cimentación de la Iglesia. Adicionalmente esta información se empleará como información complementaria para realizar la evaluación estructural integral de la Iglesia con el objetivo de determinar su comportamiento ante cargas de gravedad y de sismos.

## 5.1.Introducción

En el presente capítulo se desarrolla la aplicación de los métodos geofísicos para la exploración del suelo en la Iglesia San Juan Bautista de Huaro (Cusco). Entre los métodos geofísicos que se emplearon se tiene el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y el cociente espectral (H/V). Los resultados de este estudio llevados a cabo con fines geotécnicos servirán para determinar las condiciones del suelo de cimentación de la Iglesia. Adicionalmente esta información se empleará como información complementaria para realizar la evaluación estructural integral de la Iglesia con el objetivo de determinar su comportamiento ante cargas de gravedad y de sismo.

La Iglesia San Juan Bautista se ubica a 45 km de la ciudad de Cusco sobre los 3162°m.s.n.m en el distrito de Huaro perteneciente a la provincia de Quispicanchi (Ver Figura 5.1a). Esta Iglesia colonial posiblemente fue construida en el siglo XVII y terminada en el siglo XVIII está dedicado a San Juan Bautista y se ubica hacia el este de la plaza principal del poblado. La Iglesia es parte de la “ruta del barroco andino” (Andahuayllillas, 2015) debido a la impresionante decoración arquitectónica y su riqueza en las pinturas murales en toda la nave que combina la pintura mural andina y el barroco clásico (Figura 5.1b y Figura 5.1c).



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.1:** (a) Mapa de ubicación, (b) vista interna de la Iglesia y (c) vista de la fachada.

Su longitud es de 55 m de largo y 9.35 m. de ancho, presenta muros gruesos de adobe de 1.65 m de ancho aproximadamente, cimentación de piedra y cielo raso con cubierta de par y nudillo que se forma por elementos de madera dispuestos en un arreglo triangular con techo a dos aguas. La estructura de la Iglesia está conformada por una sola nave estrecha y alargada propia del estilo mudéjar y tiene una fachada del primitivismo clásico con decoraciones nativas. Las otras áreas que la conforman están adosadas a la nave y son el baptisterio, la torre espadaña de piedra donde se ubica el campanario, dos capillas, una sacristía y una contra sacristía. El templo fue declarado monumento histórico por el Gobierno Local de Huaró en diciembre de 1972. Su primera restauración fue realizada por el Instituto Nacional de Cultura en 1988. Entre los años 2004 y 2007 se realizaron trabajos de conservación y restauración de los bienes muebles del templo con apoyo de la *World Monuments Fund* y del Instituto Nacional de Cultura, hoy Ministerio de Cultura (Kuon Arce, 2013).

La mayoría de intervenciones que se han realizado en la Iglesia consistieron principalmente solo en trabajos de puesta en valor y conservación estética de la estructura y bienes inmuebles. Debido a que las tareas de intervención pasadas se realizaron sin previa evaluación estructural, es un buen caso de estudio para realizar una evaluación integral detallada que permita tomar decisiones sobre medidas de intervención estructural en la Iglesia para que resista eventos sísmicos.

## 5.2. Geología del lugar

La geología de la Regional del Cusco se describe ampliamente en el Boletín 138 S de la Carta Geológica Nacional zona 28-S del Cuadrángulo del Cusco publicado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) en el 2011 (Carlotto, et al., 2011).

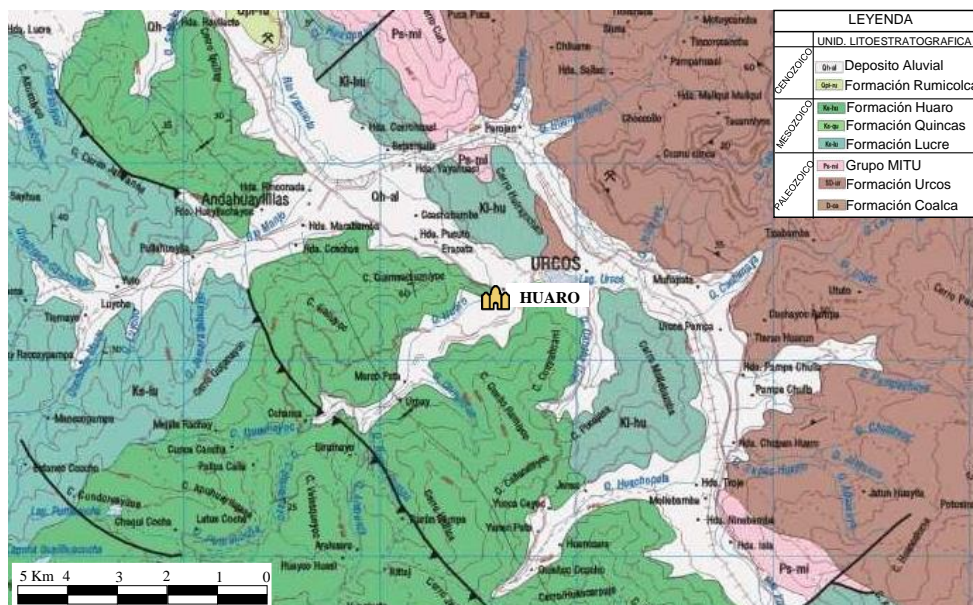


Figura 5.2: Mapa geológico de la zona donde se ubica el distrito Huaró (Adaptado de (Carlotto, et al., 2011))

Los depósitos aluviales están conformados tanto por los conos aluviales y por los conos de deyección. Estos conos están adosados principalmente a la desembocadura de las quebradas y ríos adyacentes al valle del río Vilcanota, producto de un cambio repentino de pendiente. Los conos están conformados por bloques y gravas de calizas, cuarcitas, areniscas, rocas volcánicas, etc., envueltos por una matriz areno-arcillosa (ver Figura 5.3).

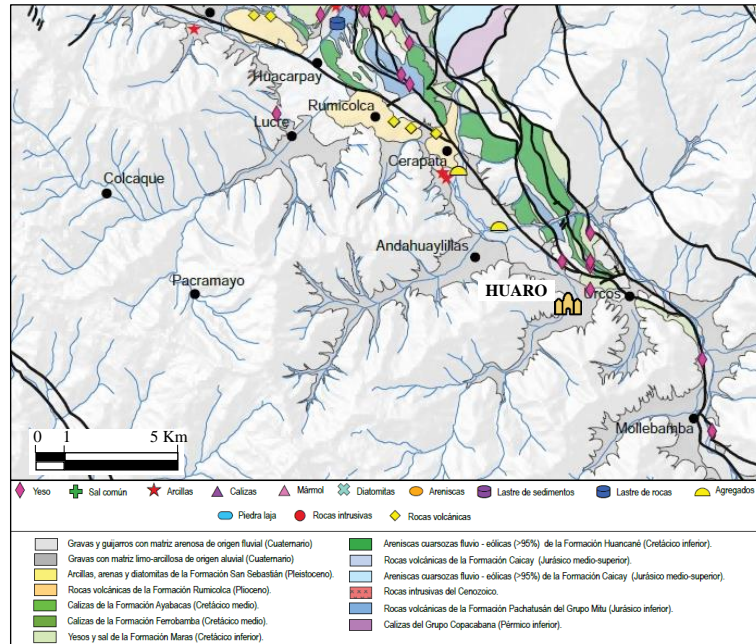
La formación Huaro está constituida por intercalaciones de areniscas, limolitas arcilitas y microconglomerados. Las areniscas son de coloración verdusca y en ella se puede apreciar venillas de calcita. Las arcilitas o en algunos casos las limolitas y arciliticas, son casi siempre marrones y laminares, formando estratos delgados que se intercalan indistintamente tanto entre las areniscas como en las limolitas. Ocasionalmente se encuentran depósitos lenticulares de yeso muy pequeños.



**Figura 5.3:** Imágenes del Cono de deyección en Huaro (a) vista hacia el Suroeste y (b) vista hacia el Noreste cercano al río Vilcanota.

La formación Lucre está compuesta por un conjunto monótono de areniscas limolitas y arcilitas. Las areniscas son de colores marrón oscuro, verdosos de colores claros, en estratos que llegan a sobrepasar hasta los 5 m. Algunos de ellos poseen un bandeamiento con bandas marrones hacia el tope y base con niveles verdosos al centro. También se encuentran areniscas verdosas de grano fino que lateralmente pasan a limolitas. Las areniscas son esencialmente arcósicas y cuarzosas y con cierta.

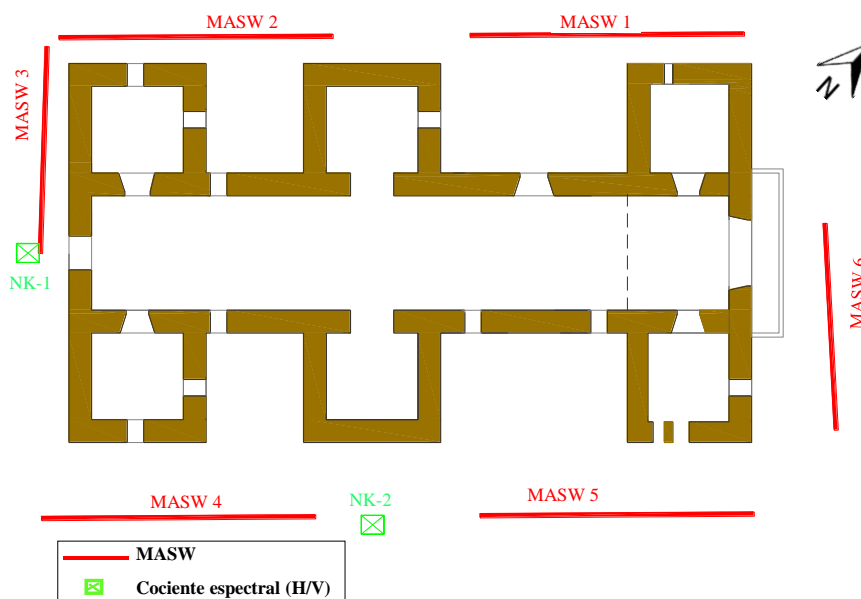
De acuerdo a la descripción de la carta geológica El cuadrángulo de Cusco se caracteriza por presentar rocas y minerales industriales (RMI) como arcillas, arenas, piedra de construcción, yesos, gravas, etc., que se explotan actualmente. Esto se puede observar a detalle en el mapa de la Figura 5.4. En este mapa se aprecia que Huaro se encuentra ubicado en una formación geológica de suelos conformados por gravas con matriz limo - arcillosas de origen aluvial, que provienen de los conos aluviales cuaternarios situados en las desembocaduras de las quebradas y ríos transversales al río Vilcanota. Esto confirma lo que se mencionó anteriormente con respecto a la formación geológica donde se encuentra ubicada la zona en estudio.



**Figura 5.4:** Mapa de rocas y minerales de los alrededores de la zona en estudio (Adaptado de (Carlotto, et al., 2011)).

### 5.3. Metodología del estudio

Para la caracterización del suelo en la Iglesia de Huaró se aplicaron técnicas de exploración geofísica ubicadas alrededor de la Iglesia. En este caso no se contó con información de estudios geotécnicos, por lo que la interpretación del suelo se realizó en base a los ensayos geofísicos realizados durante esta campaña y la geología del lugar que se describe en el acápite anterior. Finalmente se realizó una discusión e interpretación de los resultados para determinar el perfil de suelo aproximado en función a toda la información con la que se contaba. Estos resultados también incluyen determinar el periodo fundamental del suelo y las velocidades de onda de corte de cada estrato.



**Figura 5.5:** Ubicación de los ensayos de MASW y cociente espectral realizados en la Iglesia.

Entre las técnicas de investigación geofísica que se aplicación en la Iglesia San Judas Tadeo de Huaró tenemos el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y la técnica del cociente espectral (H/V). Los ensayos comprendieron 6 líneas de MASW y 2 puntos de cociente espectral (H/V). La ubicación de los ensayos se puede observar en la Figura 5.5.

## 5.4.Exploración con MASW

En la Iglesia se establecieron 6 líneas de registro para ensayos MASW ubicadas en los exteriores de la estructura principal tal como se observa en la Figura 5.5. Una línea se realizó en el frontis de la Iglesia, dos líneas en el lado lateral izquierdo, dos líneas en el lado lateral derecho y una en la parte posterior de la Iglesia. Cada una de estas líneas de registro presenta una dirección y longitud determinada tal como se muestra en la Tabla 5.1. En la Figura 5.6 se muestra la aplicación del MASW al frente de la fachada de la Iglesia y en el lado derecho.



**Figura 5.6:** Ensayos MASW en (a) el frontis y (b) en el lateral Este de la Iglesia de Huaró

En este estudio para registrar las señales se emplearon acelerómetros que tienen una sensibilidad de 10 V/g y un rango de frecuencias de 0.15 a 1000Hz. La señal medida en cada acelerómetro fue de 1 s muestreando a una frecuencia de de 12.8 kHz.

Cada uno de estas líneas de registro presenta una dirección y longitud determinada tal como se resume en la Tabla 5.1.

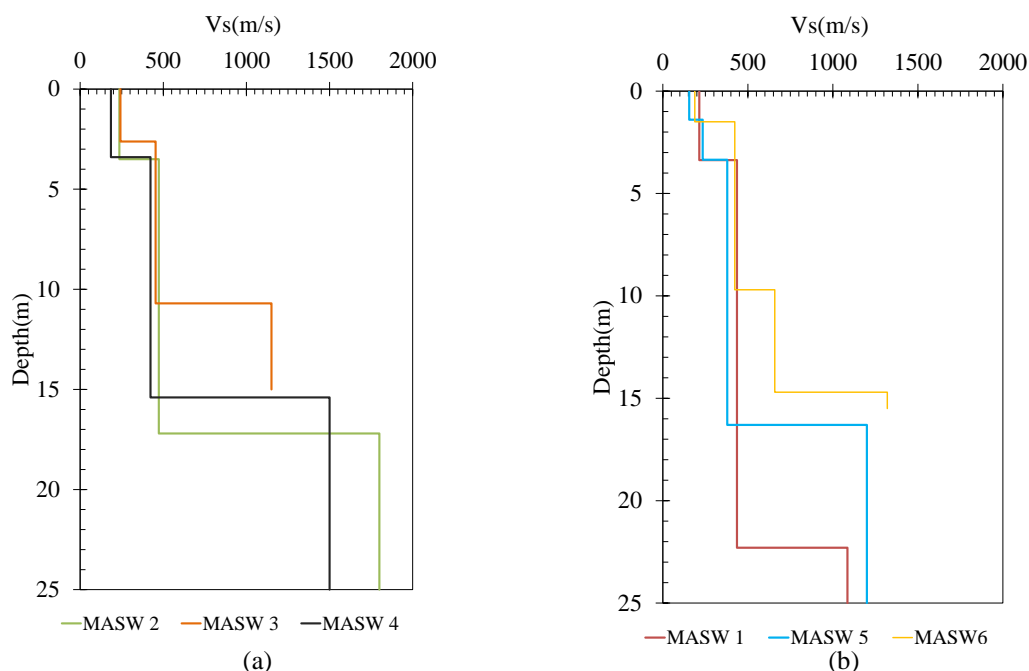
**Tabla 5.1:** Descripción de las líneas de registro del ensayo MASW.

Item	Nombre de línea	Dirección	dx (m)	Longitud (m)	Ubicación
1	MASW 1	S-N	2	20	Lado lateral derecho
2	MASW 2	N-S	2	20	
3	MASW 3	E-O	1.5	15	Posterior
4	MASW 4	N-S	2	20	Lado lateral izquierdo
5	MASW 5	S-N	2	20	
6	MASW 6	O-E	1.5	15	Frontis

Para procesar las señales se realizó un pre-procesamiento de la información tomada en campo, empleando una rutina en MATLAB para realizar la suma (*stacking*) de las 10 señales tomadas en cada acelerómetro para cada ubicación del martillo. Posteriormente se calculó la curva de dispersión y posterior análisis de inversión para determinar el perfil de velocidad de onda de corte empleando el programa Geopsy (Wathelet, 2011), que tiene módulos que facilitan el procesamiento de la información del MASW.

En el Anexo F se muestra los resultados de las curvas de dispersión experimental, la comparación de la curva de dispersión teórica con la experimental y el perfil 1D de la velocidad de onda de corte de cada uno de los perfiles de MASW realizados.

En la Figura 5.7 se presentan 4 gráficas donde se hace un resumen comparativo de los 8 perfiles de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Los perfiles se han agrupadas en dos zonas, debido al desnivel topográfico en el que se encuentran los lugares donde se realizaron los ensayos MASW.



**Figura 5.7:** Comparación de los perfiles de  $V_s$  de las líneas MASW de los (a) lados laterales y (b) frentes de la Iglesia

Con estos resultados se ha determinado la velocidad de propagación de ondas de corte promedio  $V_{S30}$  de acuerdo al (IBC, 2009). A pesar que se tiene la limitación de que los perfiles de  $V_s$  calculados han llegado hasta una profundidad no mayor a 25m se asumió que la velocidad de ondas de corte se mantiene constante en los últimos metros y es igual al último valor registrado. Esta aproximación es conservadora si se considera que en la mayor cantidad de los casos la velocidad de ondas de corte aumenta con la profundidad.

Bajo estas consideraciones se calculó los valores de  $V_{S30}$  tipo de suelo correspondiente para las diferentes líneas de MASW ensayadas que se muestran en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2:** Velocidad de onda de corte  $V_{S30}$  y tipo de suelo.

Item	Nombre de línea	$V_{S30}$	Tipo de suelo (IBC 2009)
1	MASW 1	453	Tipo C- Suelo muy denso o roca suave $360 < V_{S30} < 760$ (m/s)
2	MASW 2	589	
3	MASW 3	661	
4	MASW 4	531	
5	MASW 5	447	
6	MASW 6	644	

## 5.5. Ensayo del cociente espectral (H/V)

En la Iglesia de Huaro se realizaron mediciones con esta técnica en dos puntos, uno ubicado en el lado lateral derecho y el otro en la parte posterior de la Iglesia. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante un tiempo de 30 minutos para el punto NK-1 y 10 minutos para el punto NK-2. En la Figura 5.8 se aprecia una imagen de los trabajos durante la medición.

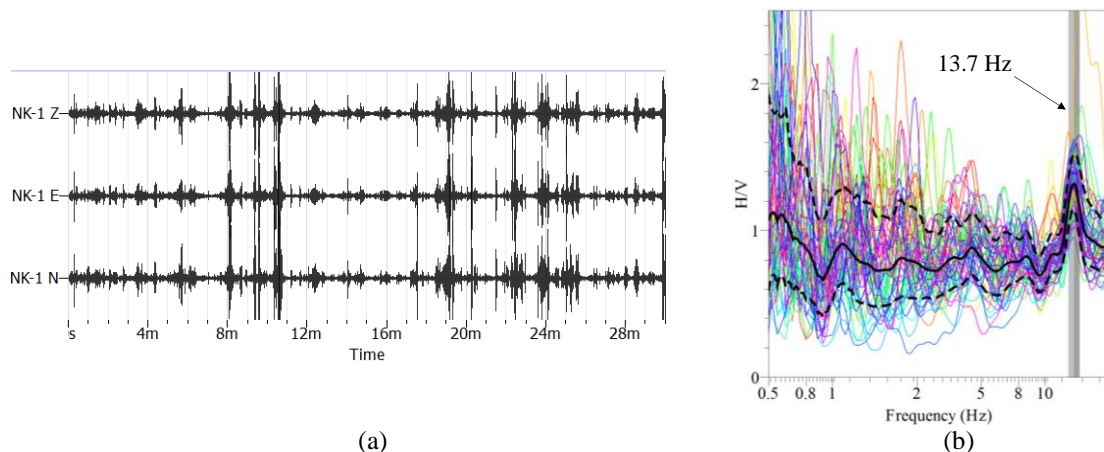


**Figura 5.8:** Ensayo H/V en el lado lateral de la iglesia.

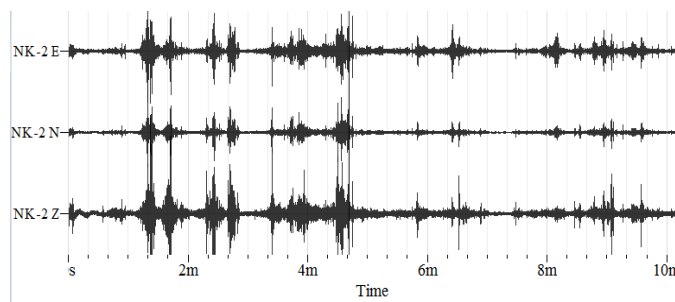
El procesado de las mediciones tomadas en campo se realizó utilizando el programa Geopsy (Wathelet, 2011) que tiene un módulo que facilita el procesamiento de las señales del ensayo H/V.

Al aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V en los dos puntos de registro se consideraron los registros de los componentes vertical (V) y horizontales ( $H_{E-O}$  y  $H_{N-S}$ ).

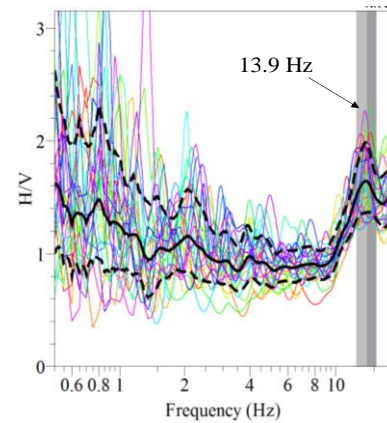
En la Figura 5.9 y Figura 5.10 se observa las señales registradas en cada sensor y los resultados obtenidos después del procesamiento de las señales registradas en campo en cada punto de medición..



**Figura 5.9:** (a) Señales registradas en el tiempo y (b) resultados de cociente espectral H/V para el punto NK-1.



(c)



(d)

**Figura 5.10:** (a) Señales registradas en el tiempo y (b) resultados de cociente espectral H/V para el punto NK-2.

La selección de las ventanas se hizo manualmente debido a que cuando se activaba el módulo *antitrigger* del programa Geopsy ninguna de las ventanas seleccionadas cumplía con los límites establecidos que se recomiendan.

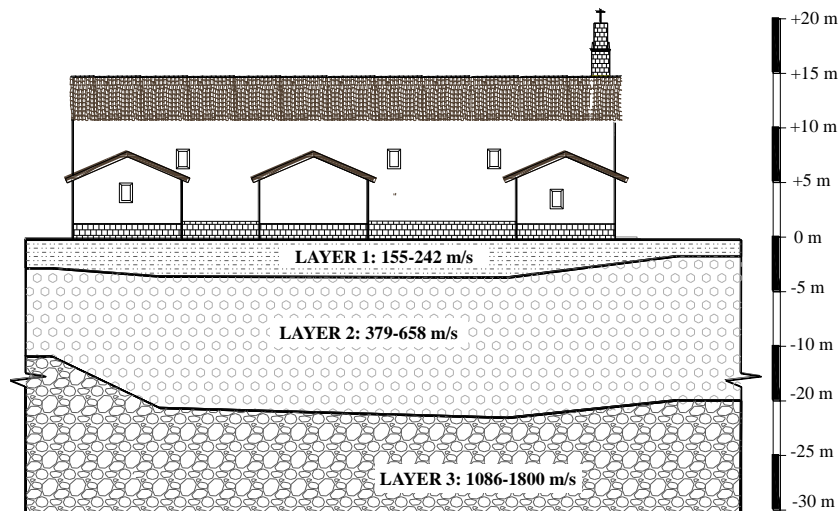
En función a las ventanas que se toman de toda la señal con el programa se calculan múltiples graficas de cociente espectral de frecuencia (Hz) versus H/V (amplitud) para cada ventana. De estos múltiples resultados se calcula un valor promedio de amplitud y una desviación estándar por encima y por debajo de la media. Adicionalmente se calcula un valor de frecuencia promedio, y una desviación estándar por encima y por debajo del promedio. Estos resultados se resumen en la Tabla 5.3 a continuación:

**Tabla 5.3:** Valores de frecuencia y amplitudes

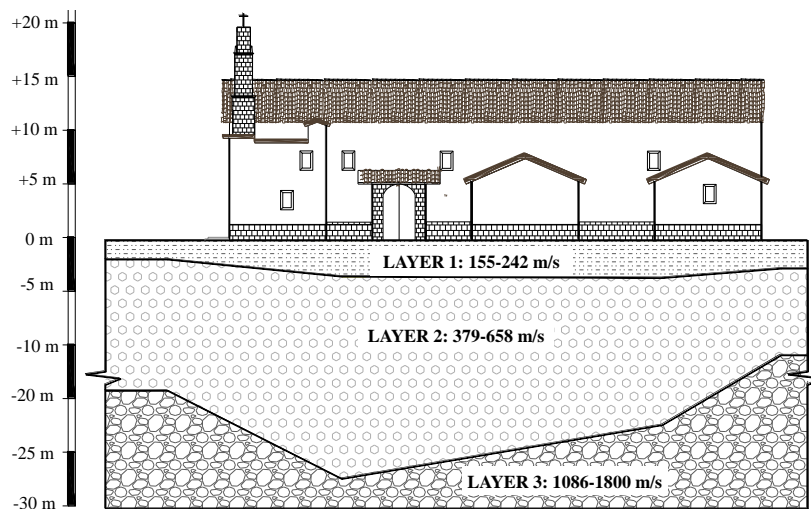
Punto de medición	Frecuencia (Hz)		Amplitud promedio
	Promedio	Desv. estándar	
NK-1	13.7	0.84	1.3
NK-2	13.9	1.5	1.6

## 5.6. Interpretación de los resultados

En base a los perfiles de velocidad de onda de corte se puede estimar los perfiles 2D de los estratos del suelo vistos desde el lado lateral derecho y lado lateral izquierdo de la estructura de la Iglesia uniendo las zonas de cambio de velocidad en los diferentes perfiles de MASW. Estos resultados se pueden observar en la Figura 5.11.



(a) Estratigrafía del suelo y velocidad de onda de corte – Vista lateral derecha.



(b) Estratigrafía del suelo y velocidad de onda de corte – Vista lateral izquierda.

**Figura 5.11:** Interpretación del perfil del suelo en base al MASW

Los estratos están compuestos tal como se muestra en la Tabla 5.4 :

**Tabla 5.4:** Distribución de los estratos del suelo.

Estrato	Vs (m/s)	Descripción
Layer 1	155 a 242	Material aluvial de compacidad medianamente densa
Layer 2	379 a 658	Material aluvial de compacidad medianamente densa a densa
Layer 3	1086 a 1800	Material aluvial de compacidad extremadamente densa

De acuerdo a la geología del lugar los estratos de suelo aluviales están compuestos en su primera capa por limo arenosos y rellenos, y en las capas inferiores está compuesto por gravas arenosas. Adicionalmente de acuerdo a los resultados de  $V_{S30}$  se logró la clasificación sísmica del suelo como un suelo Tipo C – suelo denso o roca suave.

Adicionalmente gracias a los resultados de la técnica de cociente espectral (H/V) se obtuvieron las frecuencias del suelo en los diferentes puntos de medición. Las frecuencias de vibración están entre 12.8 Hz hasta 15.4 Hz que corresponden a un rango de periodos del

suelo desde 0.08 s hasta 0.07 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.3 a 1.6.

Esta información se empleará en el futuro para desarrollar modelos en elementos finitos para investigar más a fondo si el daño estructural puede estar relacionado con las condiciones de cimentación de la Iglesia. Estos resultados también se emplearán para complementar la información necesaria para llevar a cabo una evaluación sísmica global de todo el monumento.

## **5.7. Conclusiones**

En la Iglesia San Juan Bautista de Huaro se realizó una campaña de geofísicos que incluyen MASW y técnicas de cociente espectral (H/V) con el objetivo de evaluar las propiedades geotécnicas del suelo.

En general los resultados indican que la zona en estudio presenta un suelo de cimentación comprendido por un estrato de material aluvial de compacidad medianamente densa con  $V_s$  entre 155 a 242 m/s, seguido un estratos de material aluvial de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 379 a 658 m/s, finalmente soportados por un estrato de material aluvial de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  1086 a 1800 m/s. De acuerdo a los resultados de  $V_{S30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo entre 12.8 Hz hasta 15.4 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.08 s hasta 0.06 s, y factores de amplificación del movimiento suelo entre 1.3 a 1.6.

Los resultados de la presente investigación se utilizarán en la evaluación estructural de la huaca. Esta evaluación incluye el análisis de asentamiento y respuesta dinámica de la iteración suelo-estructura bajo movimiento sísmico simulado que toma en cuenta las características de sismicidad local.

## **Capítulo 6 - Conclusiones**

En general los métodos geofísicos demostraron ser una buena alternativa de solución para la exploración de suelos con fines geotécnicos debido a sus resultados aceptables, su naturaleza no destructiva y al poco tiempo que toma el trabajo en campo durante los ensayos realizados en los monumentos históricos.

El estudio de la teoría en la que se fundamentan los ensayos y la práctica que se realizó en campo fueron muy importantes debido a que para llevar a cabo esta investigación se emplearon equipos que se disponía en el momento como son los acelerómetros y DAQs que inicialmente el grupo de investigación los empleaba para otros fines. A diferencia de utilizar equipos convencionales que se emplean en la industria como son geófonos y sismógrafo que son equipos que ya vienen implementados para leer y procesar la información de este tipo de ensayos.

El ensayo de MASW es el más complejo de los tres métodos, debido a esto se emplearon dos programas que trabajan con metodologías diferentes para el procesamiento de la información tomada en campo. Esto permitió tener una mejor certeza de los resultados encontrados, por lo que se recomienda que cuando se trabaje con este método y no se tiene mucha experiencia se emplee otra alternativa para el procesamiento y análisis de la información.

El estudio realizado en Huaca de la Luna fue el primer paso en campo para poner a prueba los conocimientos adquiridos acerca de los ensayos y permitió realizar comparaciones de los resultados con otros ensayos geotécnicos que se creyeron conveniente realizar. Se obtuvieron resultados comparables en lo que se refiere a la estimación de valores de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) y a la estimación del perfil estratigráfico. En general los resultados permitieron concluir que el área afectada tiene un suelo de cimentación comprendido por arena medio densa de 5.5 m de espesor, seguido por arena muy densa de 6 a 13 m aproximadamente y que están soportadas por dos estratos duros que podrían ser roca erosionada y en el fondo roca fresca (roca base). En todo el perfil presenta valores de  $V_s$  entre 200 a 600 m/s, siendo los estratos más profundos lo que presentan mayor  $V_s$ . Los estratos de suelo generalmente siguen la pendiente del estrato duro del fondo que aflora al este de la huaca.

En el estudio realizado en la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas los resultados permitieron concluir que el suelo de cimentación está comprendido por un estrato de material aluvional de compacidad medianamente densa (limo arenoso y rellenos) con  $V_s$  entre 150 a 260 m/s, seguido por tres estratos de grava arenosa con diferentes densidades. Estos estratos están conformados por material aluvional de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 270 a 480 m/s, material aluvional de compacidad densa a muy densa con  $V_s$  entre 550 a 730 m/s y finalmente soportados por un estrato de material aluvional de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  980 a 1300 m/s. De acuerdo a los resultados de  $V_{S30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo están entre 7.9 Hz hasta 9.7 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.10 s hasta 0.13 s, que se puede considerar como un suelo rígido.

La Iglesia San Juan Bautista de Huaro al ubicarse en la misma unidad geológica que la Iglesia de Andahuaylillas también se concluyó que el terreno bajo el cual está cimentado es suelo aluvial de diferentes densidades. El primer estrato es un suelo aluvial de compacidad medianamente densa con  $V_s$  entre 155 a 242 m/s, seguido un estratos de material aluvial de compacidad medianamente densa a densa con  $V_s$  entre 379 a 658 m/s, finalmente soportados por un estrato de material aluvial de compacidad extremadamente densa con  $V_s$  1086 a 1800 m/s. De acuerdo a los resultados estimados del  $V_{s30}$  la clasificación sísmica del suelo es del Tipo C – suelo denso o roca suave. Adicionalmente las frecuencias de vibración fundamental del suelo entre 12.8 Hz hasta 15.4 Hz que corresponde a un rango de periodos del suelo desde 0.08 s hasta 0.06 s. En este caso se recomienda hacer un par de puntos más de cociente espectral H/V para confirmar los resultados obtenidos en este estudio, puesto que las frecuencias estimadas en los dos puntos ensayados no muestran con mucha claridad la frecuencia fundamental predominante.

Los resultados de la presente investigación se utilizarán en la evaluación estructural de la huaca. Esta evaluación incluye el análisis de asentamiento y respuesta dinámica de la iteración suelo-estructura bajo movimiento sísmico simulado que toma en cuenta las características de sismicidad local.

En los casos de las la Iglesia de Andahuaylillas y Huaro se recomienda realizar algunos sondeos hasta 25m si es posible con el objetivo de comprobar y calibrar si es el caso, los resultados del perfil estratigráfico obtenidos en este estudio si es que se desea tener una mejor estimación de los estratos del suelo.

Los resultados que se presentan en este estudio se pueden emplear como información geotécnica para complementar los estudios necesarios para realizar la evaluación estructural integral en las tres estructuras patrimoniales estudiadas.

## Referencias

- Hebeler, G. L. (2001). *Site characterization in shelby county, tennessee using advanced surface wave methods*, s.l.: PhD Diss. Georgia Institute of Technology.
- Aguilar, Z. y otros (2012). *Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de lima*. Lima.
- Aki, K. & Richards, P. G. (1980). *Quantitative seismology*. second ed. s.l.:University Science Books.
- Andahuaylillas (2015). *Andahuaylillas*. [En línea] Available at: <http://www.andahuaylillas.com/es/> [Último acceso: 28 Octubre 2015].
- ASTM D1194, A. (1994). *Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings*.
- ASTM D1556-07 (2007). *Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method*.
- ASTM D5777 (2011). Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. Issue pp. 1-14.
- ASTM D5778-12 (2012). Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils.
- ASTM D6429 (2011). Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. pp. 1-11.
- Bernal, I. & Tavera, H. (2008). Microzonificación sísmica en los AAHH 7 y 9 de octubre, vicentelo Bajo en el Agustino y ribera izq. del rio Rimac -Lima. *Instituto Geofísico del Perú - IGP - CNDG*.
- Carlotto, V., Cardénas, J. & Carlier, G. (2011). INGEMMET. Boletín N° 138, Serie A: Carta Geológica Nacional. En: *Geología del Cuadrángulo de Cusco 28-s - 1:50 000*.. s.l.:Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET, p. 247.
- Chácará, C. y otros (2014). *On-site investigation and numerical analysis for structural assessment of the archaeological complex of Huaca de la Luna*. Mexico City (Mexico).
- Chatelain, J. L. y otros (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings,. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Issue 6, pp. 33-74.
- ConeTec Job No:14-72007 (2014). *Presentation of site investigation results- Huaca de la Luna, Perú, ConeTec Investigations Ltd*.
- Constable, S. C., Parker, R. L. & Constable, G. G. (1987). Occam's Inversion: A Practical Algorithm For Generating Smooth Models From Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics*,, Volumen 52, pp. 289-300..

- Cossío, A. & Jaén, H. (1967). Geología de los cuadrángulos de Puemape, Chocope, Otuzco, Trujillo, Salaverry y Santa.. *Servicio de Geología y Minería*, Volumen 17, p. 141p.
- Cox, B. R. & Wood, S. M. (2011). Surface Wave Benchmarking Exercise: Methodologies, Results and Uncertainties. *GeoRisk - ASCE*, pp. 845-852.
- Czelada, A. (2009). Medición del módulo de young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas. *Tesis de grado- Universidad de Buenos Aires - Argentina*.
- Dávila, S. (1994). Estudio geodinámico de la cuenca del río Moche, Departamento de La Libertad.. En: *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 14A*. s.l.:INGEMMET, p. 109.
- DECO Geophysical (2014). *RadEXPro seismic software*. [En línea] Available at: [www.radexpro.com](http://www.radexpro.com) [Último acceso: 2014].
- Dobrin, M. B. & Sawl, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting, Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Duffy, B. G., (2008). *Development of Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) for Characterising the Internal Structure of Active Fault Zones as a Predictive Method of Identifying the Distribution of Ground Deformation..* Christchurch, New Zealand, s.n.
- Dziewonski, A. M. & Hales, A. L. (1972). Numerical Analysis of Dispersed Seismic Waves. *Methods in Computational Physics, Seismology: Surface waves and Earth Oscillations*, Volumen 11, pp. 39-85.
- Fernández Baca, V. C. (2008). *Estudio de mecánica de suelos para diagnóstico de humedad subterránea- Templo de Andahuaylillas*, Cusco.
- Foti, S., (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*, Torino - Italy: PhD Diss. Politecnico di Torino.
- Foti, S., Lancellota, R., Socco, L. V. & Sambuell, L. (2001). *Application of FK analysis of surface waves for geotechnical characterization*. San Diego -california.
- Foti, S., Parolai, S., Albarello, D. & Picozzi, M. (2011). Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization. -. *Surveys in Geophysics*, 32(6), p. 777-825.
- Franklin, R. y otros (2006). Estimación de la respuesta de sitio mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental: aplicado a la Ciutat Vella de Valencia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño ode ingeniería*, 22(2), pp. 169-191.
- Haskell, N., (1953). *The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media*.
- Hemeda, S., Gamal, M. & Pitilakis, P. (2013). *Seismic hazard and geophysical investigations for architectural heritage preservation in Egypt: The case of Habib Sakakini Palace*. Chicago.
- Humire, G. F. (2013). *Aplicación De Métodos Geofísicos Basados En Ondas Superficiales Para La Caracterización Sísmica De Suelos. Aplicación A La Microzonificación Sísmica*

*Del Norte Y Poniente De Santiago, Chile: MSc. Diss. Pontificia Universidad Católica de Chile.*

IBC, I. B. C. (2009). *International Code Council, INC.*

IIDMA, 2002. -Instituto de Investigación en desastres y medio ambiente - Mapa de peligros de la ciudad de Trujillo y zonas aledañas.

INGEMMET (2015). *Mapa Geológico del cuadrángulo de Salaverry (hoja 17f) cuadrante IV. - 2012.* [En línea] Available at: [URL: http://www.ingemmet.gob.pe](http://www.ingemmet.gob.pe) [Último acceso: 2015].

Jaramillo, A., Piña, J. & Aguilar, R. (2012). *Application of the method of spectral ratios for the reconfiguration Isoperiodos detailed map of the Valley of Mexico basin..* Quintana Roo - Cancún.

Joh, S. H. (1996). *Advances in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements.* Texas.

Jones , R. & Thrower , E. (1965). An analysis of waves in a two-layer composite plate and its application to surface wave propagation experiments on roads. *Journal of Sound and Vibration*, Volumen 2, p. 328–335.

Kausel, E. & Roesset, J. M. (1981). Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volumen 71, pp. 1743-1761.

Kennett, B. L. (1974). Reflections, rays, and reverberations.. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Issue 64, pp. 1685-1696.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.* New Jersey: Prentice Hall.

Kuon Arce, E. (2013). *Manual para Guías de Turismo - Templo San Juan Bautista - Huaro Quispicanchi.*

Kværna, T. & Ringdahl, F. (1986). *Stability of various fk-estimation techniques, in Semiannual Technical Summary.* Kjeller, Norway.

Lacoss, R., Kelly, E. & Toksöz, M. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, Volumen 34, pp. 21-38.

Leyton, F. y otros (2010). *Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago de Chile.* Valdivia-Santiago de Chile.

Linares, G. (2005). Introducción y aplicación del método de microtemores en áreas urbanas. *Tesis de grado - Universidad Simón Bolívar -Caracas -Venezuela.*

Luna , R. & Jardi, H. (2000). *Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods.* St. Louis, MO.

Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. (1997). Cone penetration testing in geotechnical practice. *Blackie Academic and Professional.*

McMechan, G. & Yedlin, M. (1981). Analysis of dispersive waves by wave-field transformation. *Geophysics*, 46(6), pp. 869-874..

- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B. & Inanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12), pp. 1392-1396.
- Moscattelli , M. y otros (2012). Integrated subsoil model for seismic microzonation in the Central Archaeological Area of Rome (Italy). *Disaster Advances*, 5(3), pp. 109-124.
- MPT, (2002). *Atlas ambiental de la ciudad de Trujillo (Peru)*. Trujillo: Municipalidad Provincial de Trujillo.
- Mucho , R. y otros (2005). The application of Ground penetrating Radar (GPR) at Machu Picchu, Peru (C101-1). *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. En: *QR of RTR 30, no. 1.*, pp. 25-33pp.
- Nazarian , S. & Stokoe II , K. H. (1984). *In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves*.
- Nazarian, S., Hiltunen, D. R. & Rix, G. L. (2010). *Surface Wave Benchmarking Symposium*.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T. (1970). On the propagation characteristics of microtremors. *J.. Seism. Soc. Japan*, Volumen 23, pp. 264-280.
- Nolet, G. , G., (1981). Linearized inversion of (teleseismic) data. In R. Cassinis (Ed.),. *The Solution of the Inverse Problem in Geophysical Interpretation*, pp. 9-37.
- Olona, J. y otros (2010). Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods. *Near Surface Geophysics*, Volumen 8, pp. 585-599.
- Ortigao, J. A. (2007). Wave Propagation and Microstrain Behaviour of Soils. Terratek.
- Palmieri, M. y otros (2012). Reduction of seismic risk of Roman and Hindu temples. *SAHC 2012 - 8th international conference on Structural analysis of historical, October 15-17 Wroclaw -Poland*.
- Park, C. B. (2005). *MASW-Horizontal resolution in 2-D shear-wave velocity ( $V_s$ ) mapping*.
- Park, C. B. (2008). *Imaging dispersion of passive surface waves with active scheme..* Philadelphia.
- Park, C. B. (2014). *Analysis of MASW Data Sets from Peru,(Along the N. Facade of the Huaca de la Luna, Trujillo, Peru)*, s.l.: Report by Park Seismic LLC.
- Park, C. B. & Carnevale, M. (2009). *3-D MASW*. Fort Worth, Texas.
- Park, C. B. & Miller, R. (2008). Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Volumen 13, pp. 1-11.
- Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), pp. 800-808.
- Park, C. B. y otros (2004). Imaging dispersion curves of passive surface waves. *Soc. Expl. Geophys.*, pp. 1357-1360.

- Park, C., Miller, R. & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record.. *The Society of Exploration Geophysicists*, pp. 1377-1380..
- Park, C. M. R. M. H. (2002). *Optimum field parameters of an MASW survey*. Tokyo.
- Park, H. J., Kim, K. S., Ahn, H. Y. & Kim, D. S. (2012). Noninvasive geotechnical site investigation for stability of Cheomseongdae. *Journal of Cultural Heritage*, Volumen 13, pp. 98-102.
- Perez-Gracia, V. y otros (2009). Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca. *Journal of Archaeological Science*, Issue 36, p. 1289–1299.
- Ping, W. V. & Ge, L. (1997). Field verification of laboratory resilient modulus measurements on subgrade Soils. *Transportation Research Record*, pp. 53-61.
- Quispe, S. y otros (2012). *Evaluation of local site effects in Lima City, Peru from ground motion data*. Lima.
- Richart, F. E., Hall, J. R. J. & Woods, R. D. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*, , New Jersey: Prentice Hall, Inc..
- Ritta, R. J., Suárez, L. E. & Pando, M. A. (2012). *Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical*. s.l., s.n., pp. 1399-1419.
- Rix, G. J. & Leipski, E. A. (1991). Accuracy and resolution of surface wave inversion. *Geotechnical special publication - Data acquisition and testing in soil - ASCE*, Issue 29, pp. 17-32.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*,, Volumen 27.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. & Greig, J. (1986). *Use of piezometer cone data*. Blacksburg, Virginia.
- Robertson, P. K. & Wride, C. E. (1998). Cyclic liquefaction and its evaluation based on spt and cpt. *NCEER Workshop Paper, January 22, 1997*.
- Samanez, M. & Arturo , E. (2009). *Estructuras de concreto armado tsunamisismorresistentes basadas en experiencias de los tsunamis en el océano indico (2004) y Camaná (2001), Tesis de Maestría*. Lima: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sambridge, M. (2001). Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm.. *Inverse Problems*, Volumen 17, p. 387–403.
- Sambridge, M. M. K. (2002). Monte Carlo methods in geophysical inverse problems.. *Reviews of Geophysics*.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A. & Fan, M. A. (2001). *Soils and Waves : Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, s.l.: John Wiley & Sons.

- Seshunarayana, T. & Sundararajan, N. (2004). *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) for Mapping Shallow Subsurface Layers – A Case Study, Jabalpur, India*. Hyderabad-India.
- Socco, L. & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization, a tutorial. *Near surface Geophysics*, pp. 165-185.
- Stokoe II, K. H., Wright, G. W., James, A. B. & Jose, M. R. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysical characterization of sites - ISSMFE Technical Committee*.
- Stokoe, K., Joh, S. & Woods, R. (2004). *Some Contributions on In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems*. Porto, Portugal.
- Suarez, L. E., Pando, M. A. & Ritta, R. (2012). *Ambient Vibration Measurements for Estimation of Site Fundamental Periods at the City of Mayagüez, Puerto Rico*. University of Puerto Rico at Mayaguez.
- Suzuki, H. & Hayashi, K. (2003). *Shallow s-wave velocity sounding using the Microtremors array measurements and the surface wave method*. San Antonio, Texas.
- Thomson, W. (1950). Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid. *Journal of Applied Physics*, Vol. 21, Volumen 21, pp. 89-93.
- Tokimatsu, K. (1997). *Geotechnical site characterisation using surface waves*.
- Uceda, S. (1996). Al final del camino. En: *El poder y la muerte en la sociedad Moche*.. Lima: SIDEA.
- Uceda, S. & Canziani, J. (1993). Evidencia de grandes precipitaciones en diversas etapas constructivas de la Huaca de la Luna, costa norte del Perú. *Bull. Inst.fr.études andines-Trujillo*, I(22), pp. 313-343.
- Uceda, S. & Paredes, A. (1994). *Arquitectura y función de la Huaca de la Luna*.. Trujillo: Instituto Nor Peruano de Desarrollo Económico y Social.
- Vargas, J., Aguilar, R., Gonzales, M. & Briceño, C. (2013). *Intervención Estructural en la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas en Cusco, Perú*. Valparaiso - Chile.
- Vincent, P. D., Tsoflias, G. P., Steeples, D. W. & Sloan, S. D. (2006). Fixed-source and fixed-receiver walkaway seismic noise tests: A field comparison. *Geophysics*, Volumen 71, pp. W41-W44.
- Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. *Ph.D. thesis, Université de Liège, Liège, Belgium*..
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9), pp. 1-5.
- Wathelet, M. (2011). GEOPSY, Geophysical Signal Database for Noise Array Processing. Version 2.9.1.

WMF (2015). *World monument Fund.* [En línea] Available at: [https://www.wmf.org/project/san-pedro-ap%C3%B3stol-de-andahuaylillas\\_church](https://www.wmf.org/project/san-pedro-ap%C3%B3stol-de-andahuaylillas_church) [Último acceso: 27 Octubre 2015].

Xia, J., Miller, R. D. & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves.. *Geophysics*, Volumen 64, pp. 691-700.

Yoon, S. & Rix, G. (2004). Combined active-passive surface wave measurements for near-surface site characterization. *SAGEEP 2004*.

Zywicki, D. J. (1999). *Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves*. s.l.:Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.

# Anexo A

## Resultado de perfiles de Vs procesados con RadexPro – Huaca de la Luna

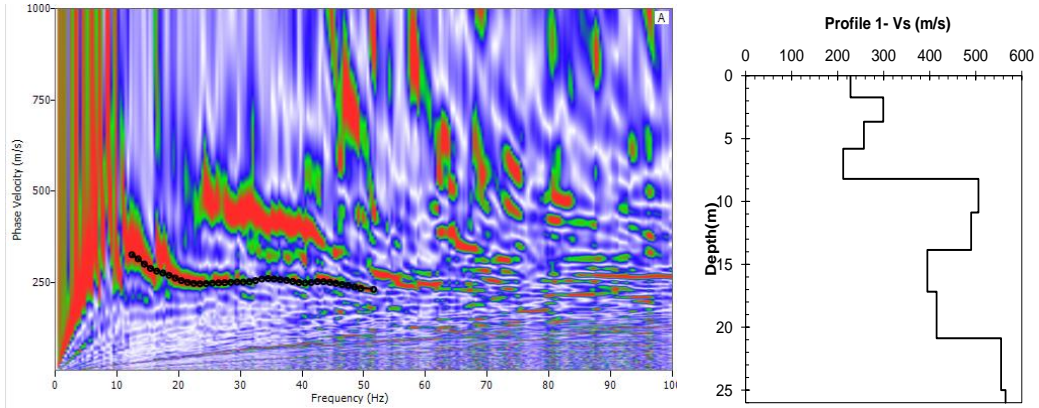


Figura A.1: Perfil 1-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte

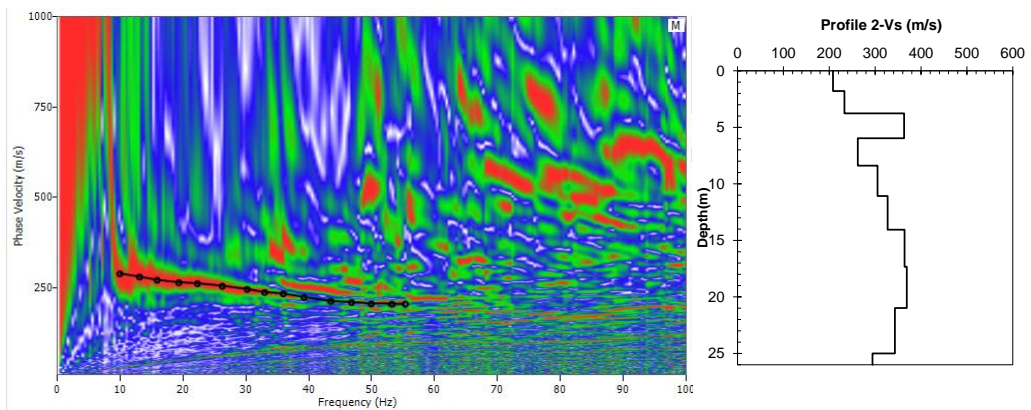


Figura A.2: Perfil 2-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte

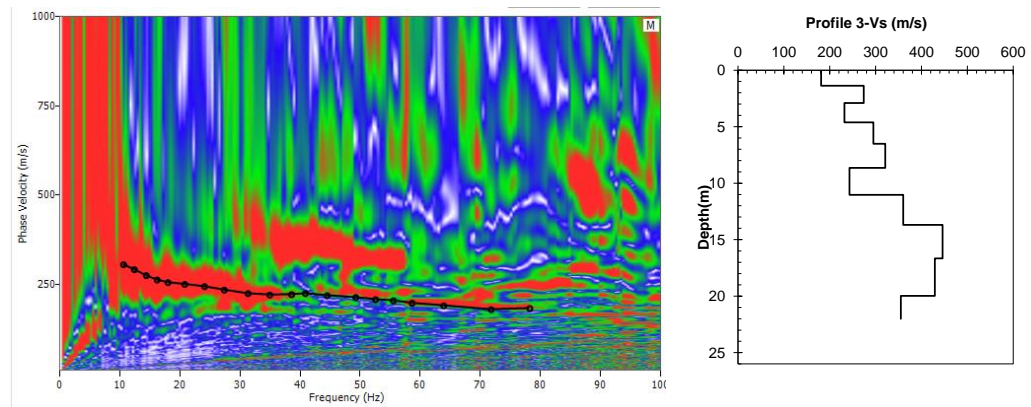
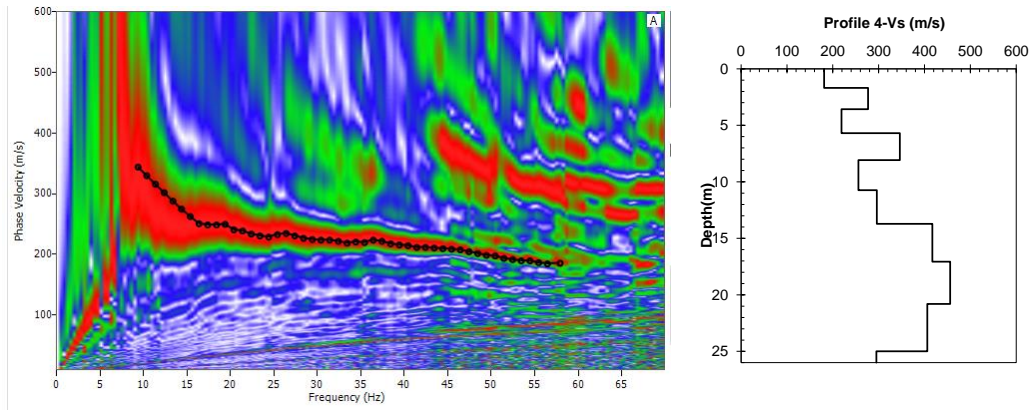
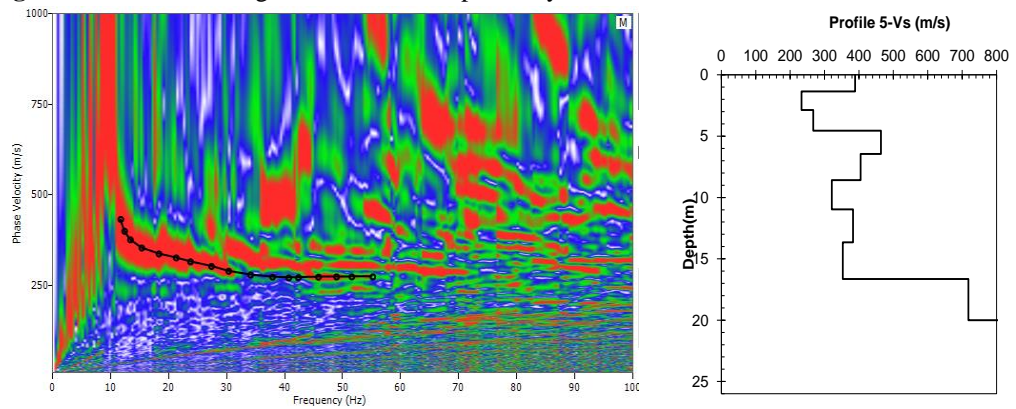


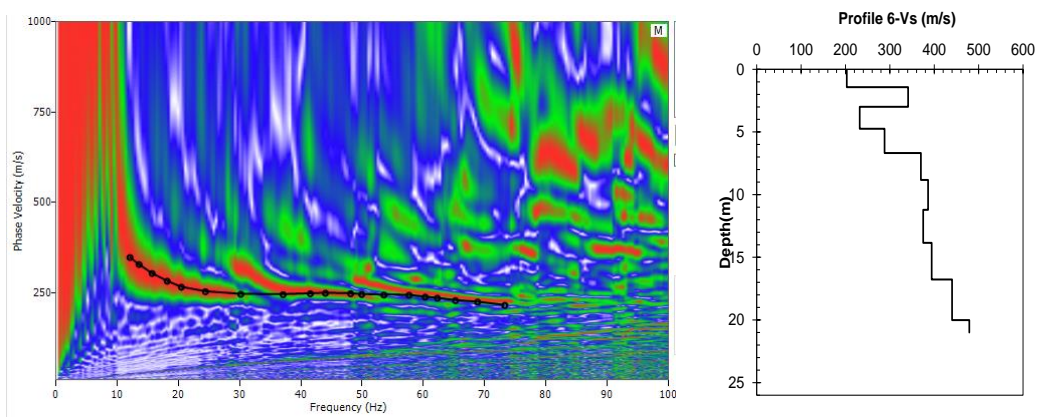
Figura A.3: Perfil 3-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



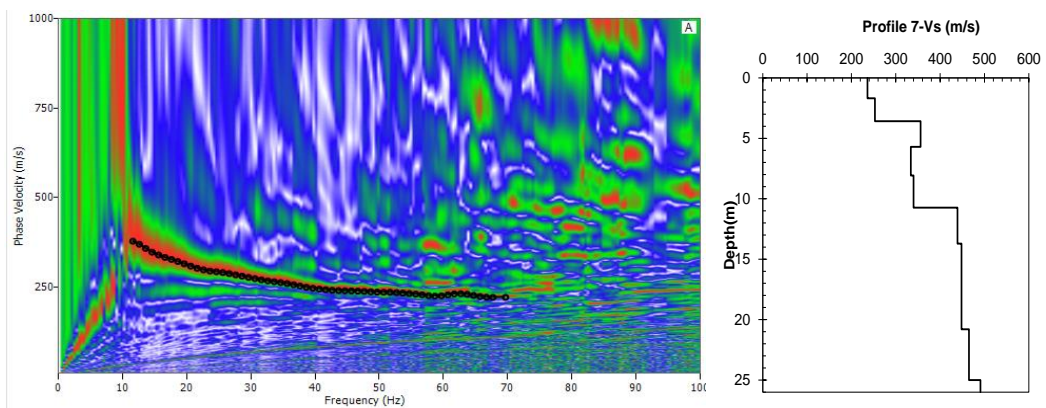
**Figura A.4:** Perfil 4-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



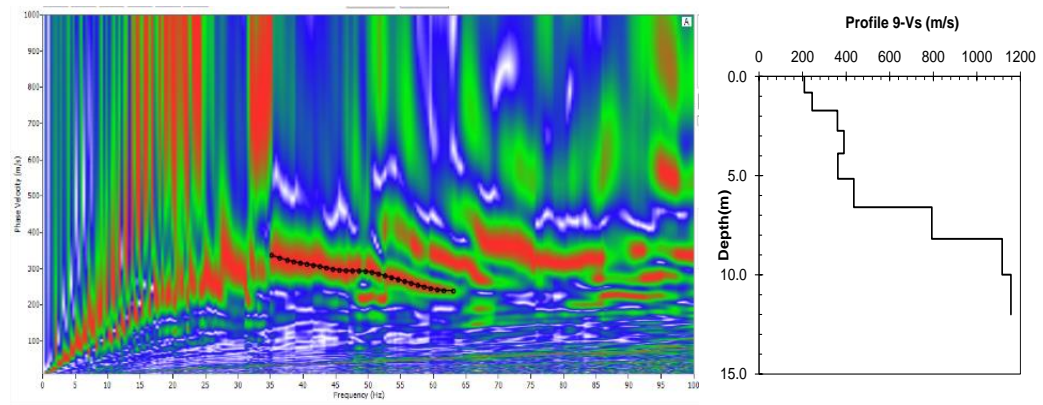
**Figura A.5:** Perfil 5 - Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



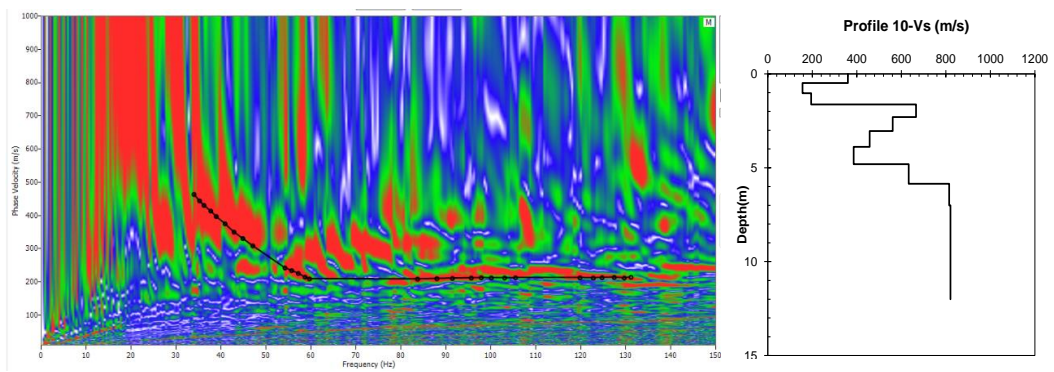
**Figura A.6:** Perfil 6- Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



**Figura A.7:** Perfil 7-Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



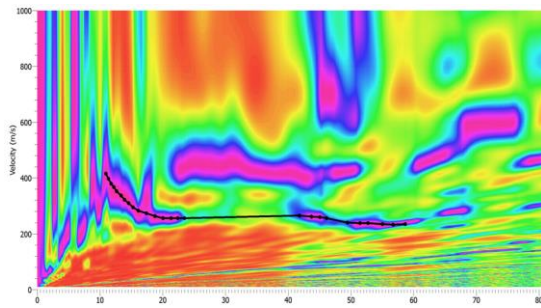
**Figura A.8:** Perfil 9 -Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte



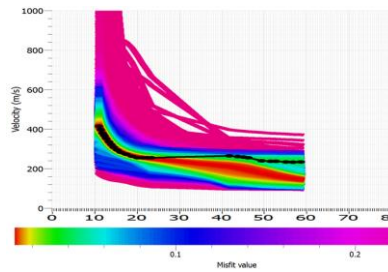
**Figura A.9:** Perfil 10 -Imagen de curva de dispersión y Perfil 1D de velocidad de onda de corte

# Anexo B

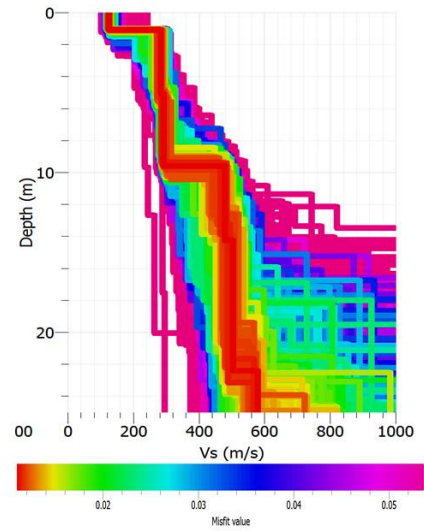
## Resultado de perfiles de Vs procesados con Geopsy – Huaca de la Luna



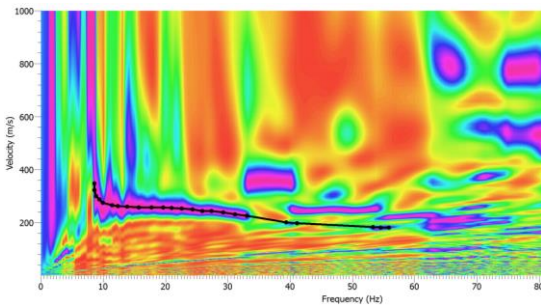
(a) Imagen de curva de dispersión



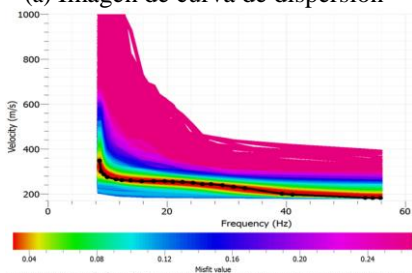
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.1: Perfil 1**



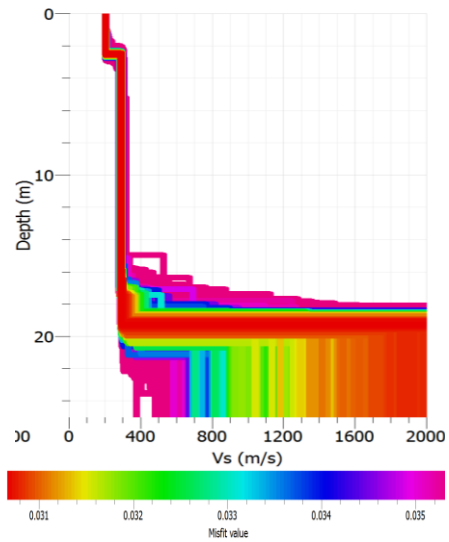
(c) perfil velocidad de onda de corte



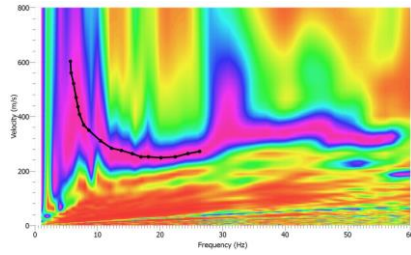
(a) Imagen de curva de dispersión



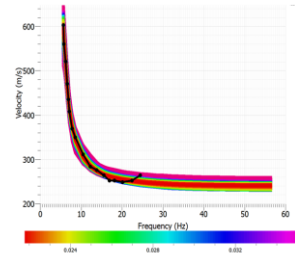
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.2: Perfil 2**



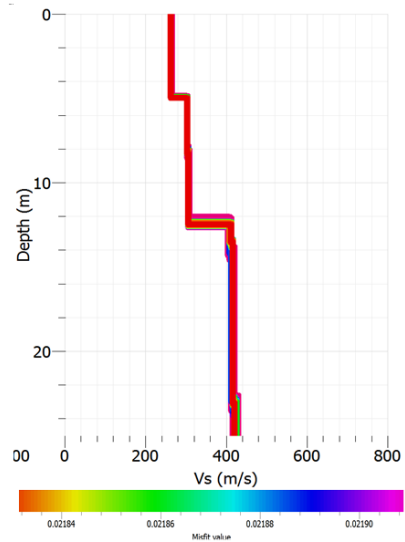
(c) perfil velocidad de onda de corte



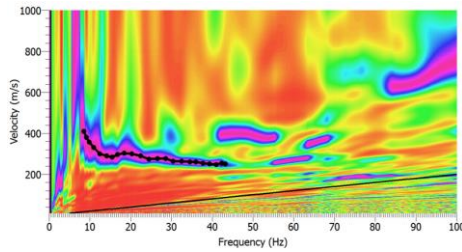
(a) Imagen de curva de dispersión



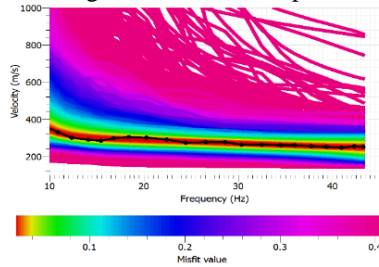
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.3:** Perfil 3.



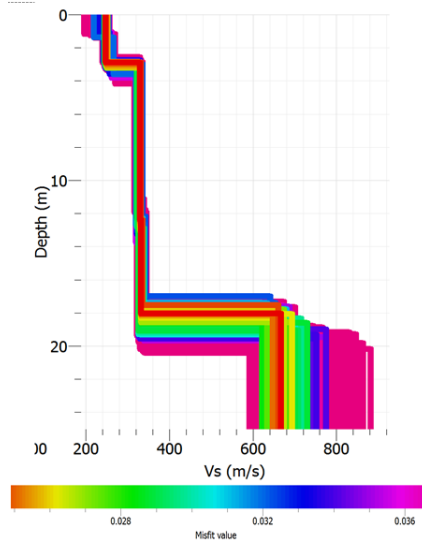
(c) perfil velocidad de onda de corte



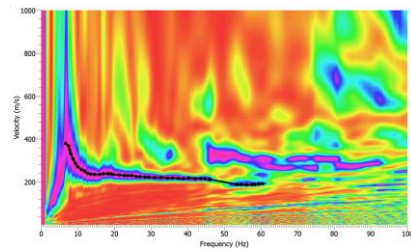
(a) Imagen de curva de dispersión



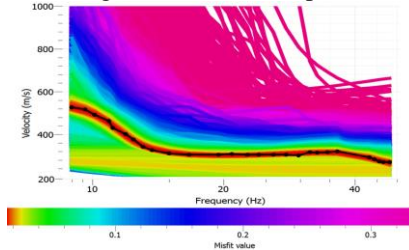
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.4:** Perfil 4.



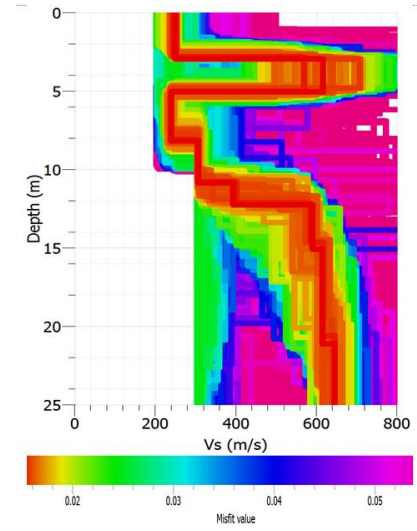
(c) Perfil velocidad de onda de corte



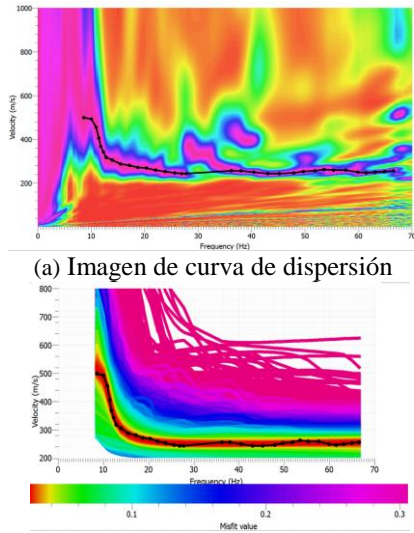
(a) Imagen de curva de dispersión



(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.5:** Perfil 5.

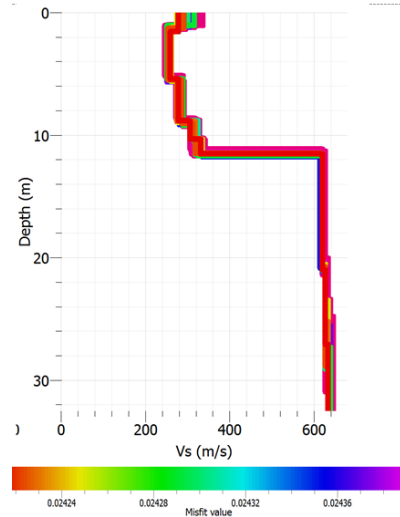


(c) Perfil velocidad de onda de corte

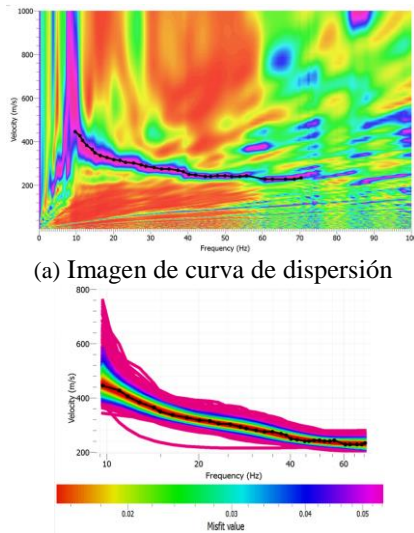


(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.6:** Perfil 6.

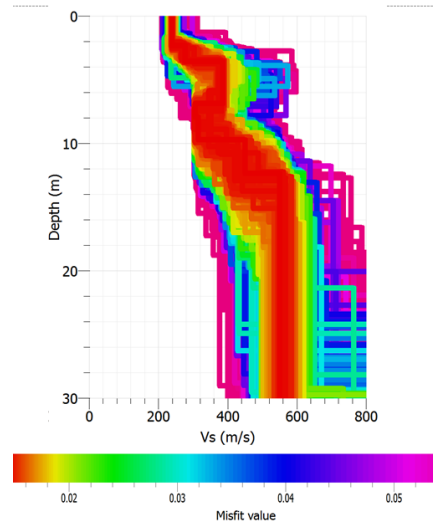


(c) Perfil velocidad de onda de corte

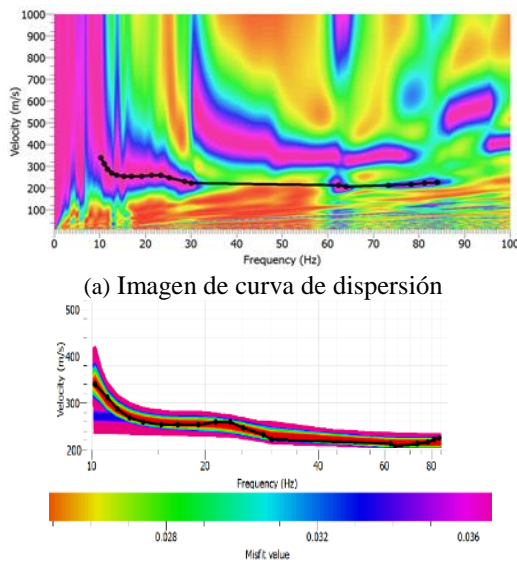


(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.7:** Perfil 7.

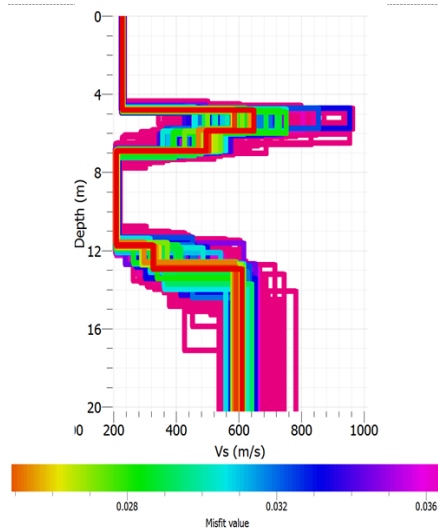


(c) Perfil velocidad de onda de corte

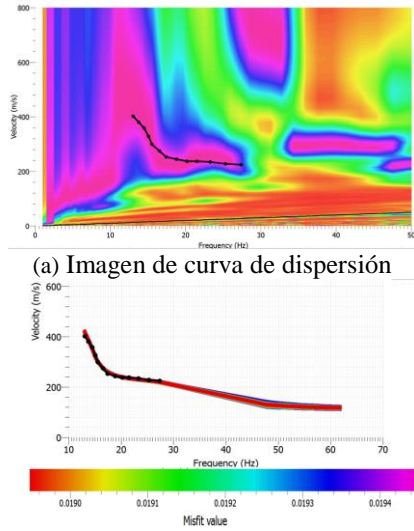


(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.8:** Perfil 8.

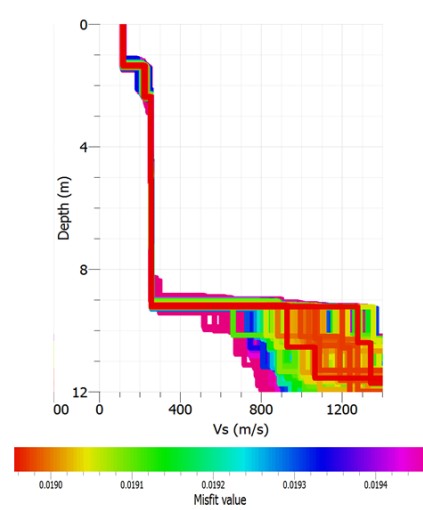


(c) Perfil velocidad de onda de corte

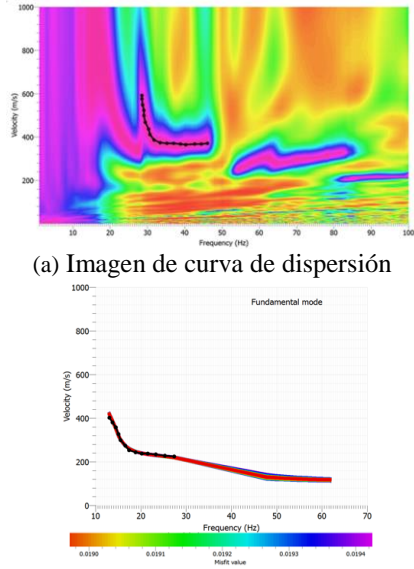


(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.9:** Perfil 9.

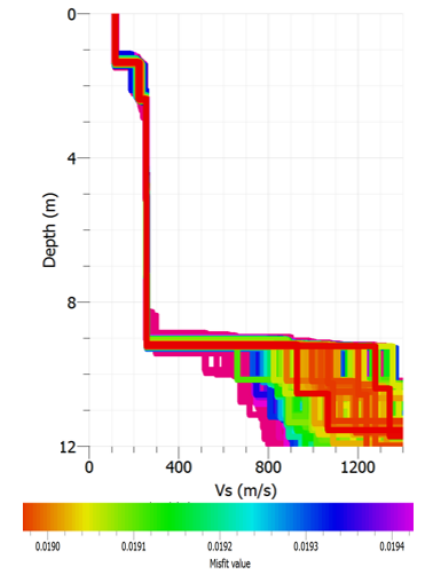


(c) Perfil velocidad de onda de corte

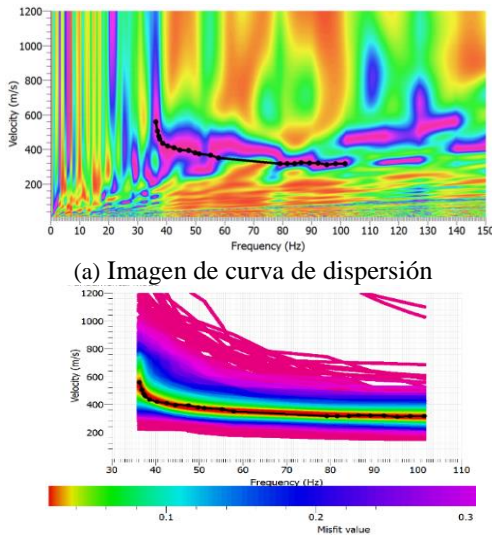


(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.10:** Perfil 10.

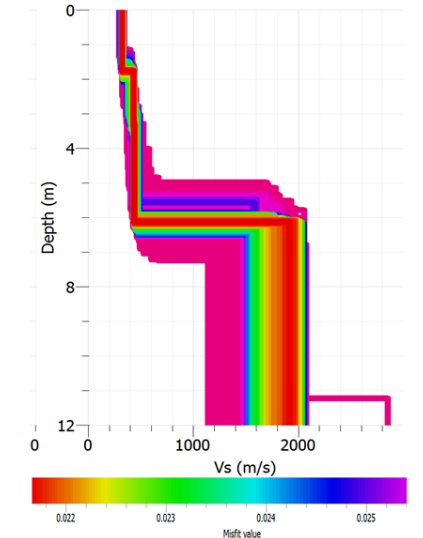


(c) Perfil velocidad de onda de corte



(a) Imagen de curva de dispersión

(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura B.11:** Perfil 11.



(c) Perfil velocidad de onda de corte

# Anexo C

## Resultado de perfiles de Vs y Vp calculados con refracción sísmica - Huaca de la Luna

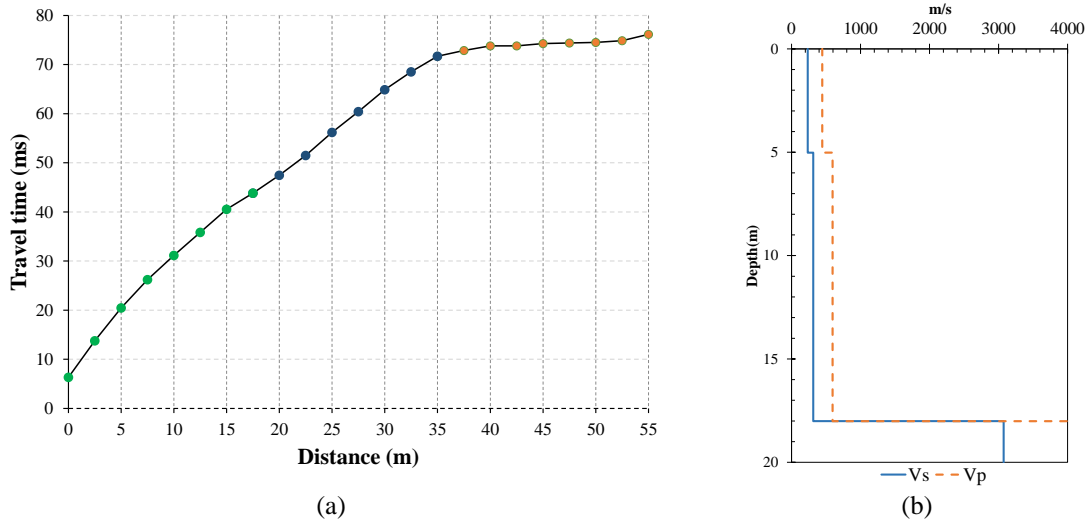


Figura C.1: Perfil 1 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs)

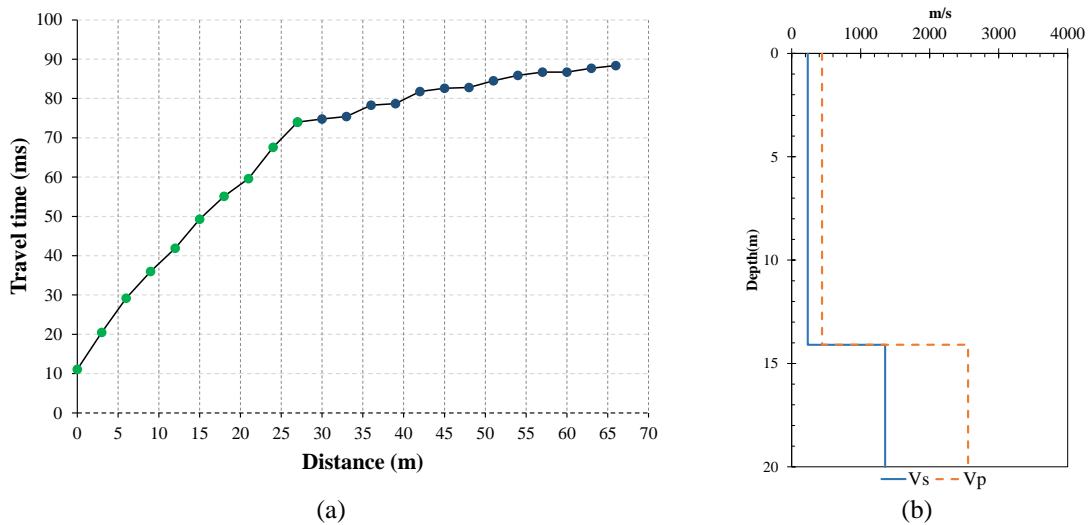


Figura C.2: Perfil 2 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P (Vp) y onda S (Vs)

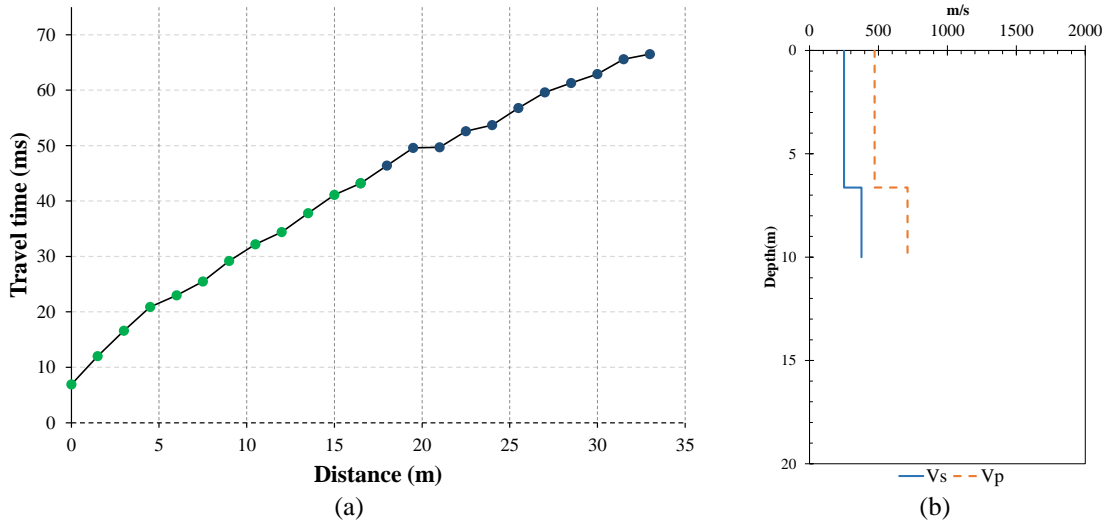


Figura C.3: Perfil 3 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

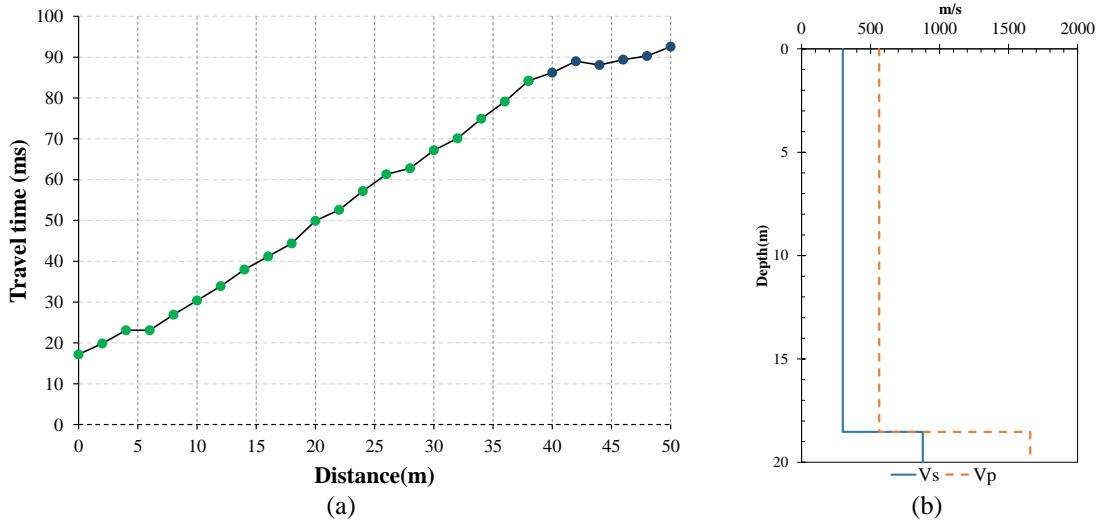


Figura C.4: Perfil 4 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

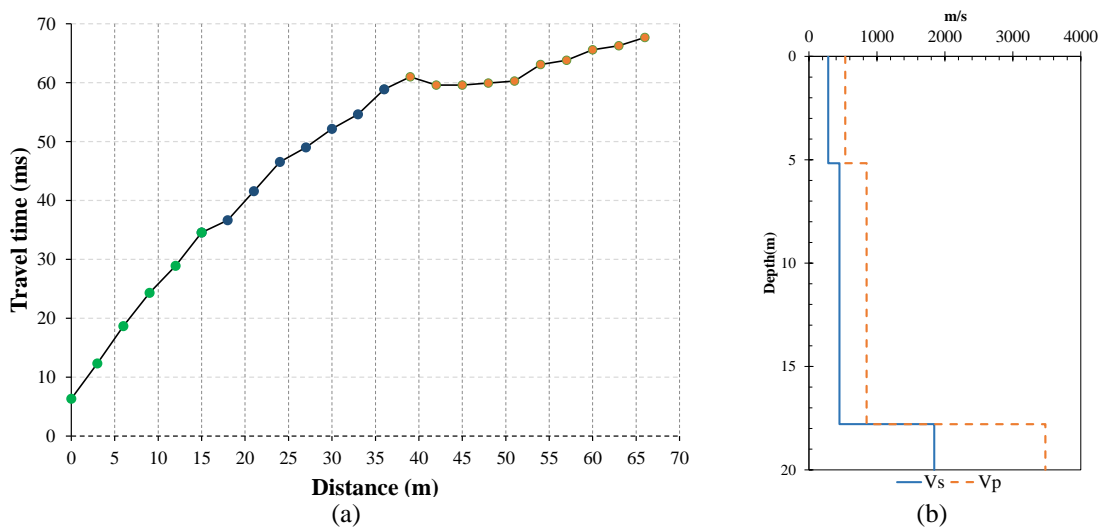


Figura C.5: Perfil 5 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ ).

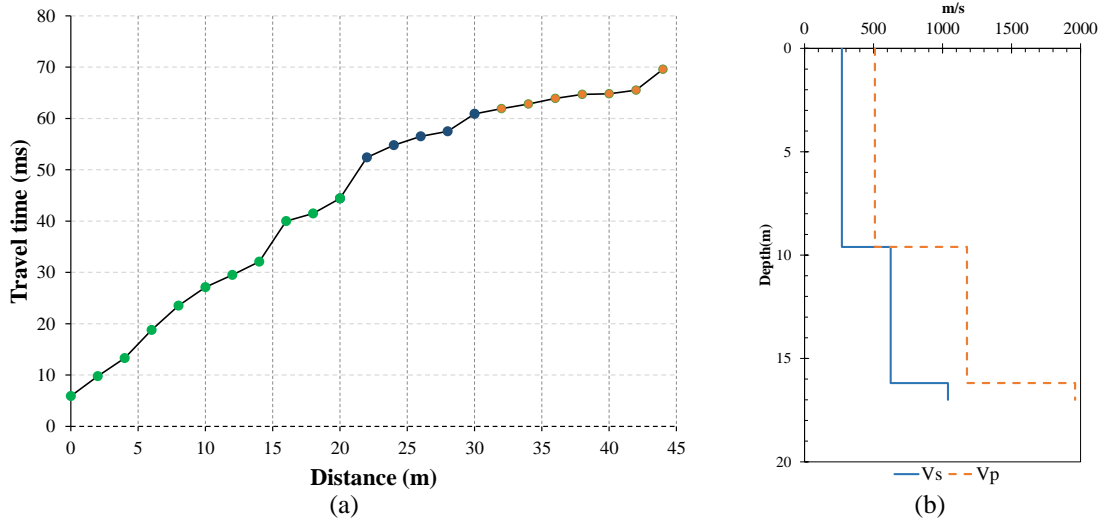


Figura C.6: Perfil 6 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

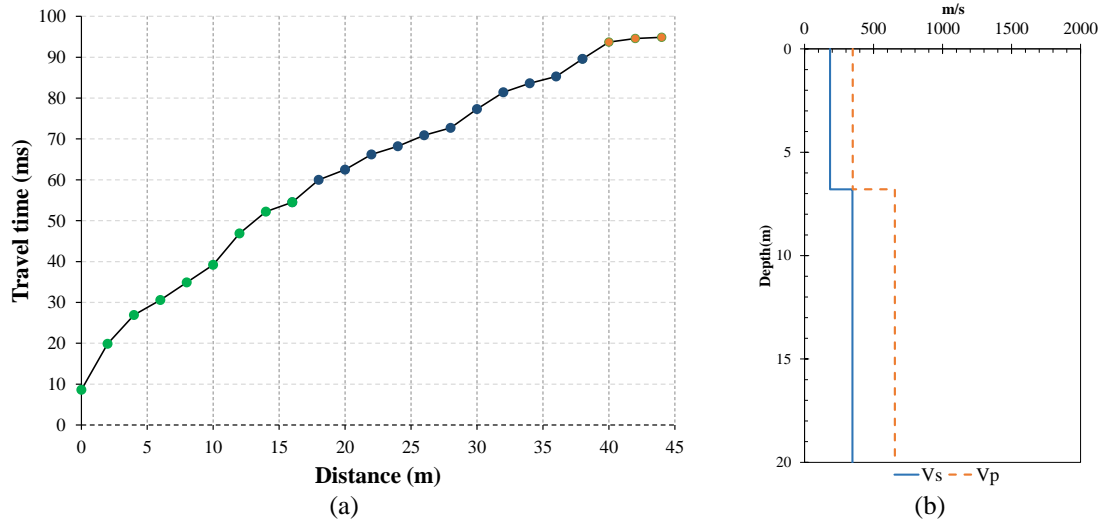


Figura C.7: Perfil 7 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

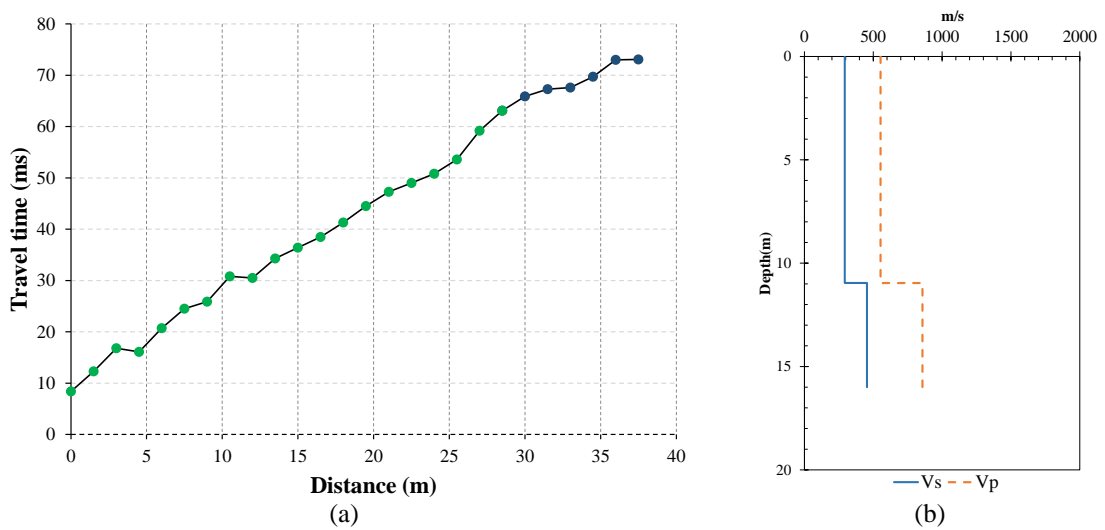
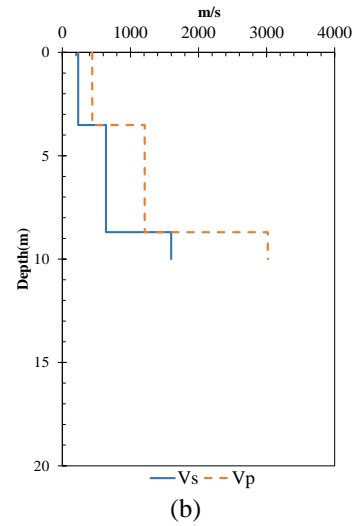
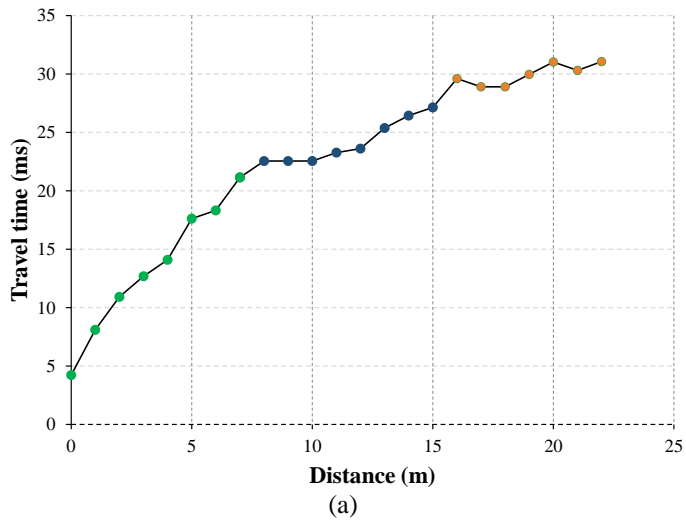
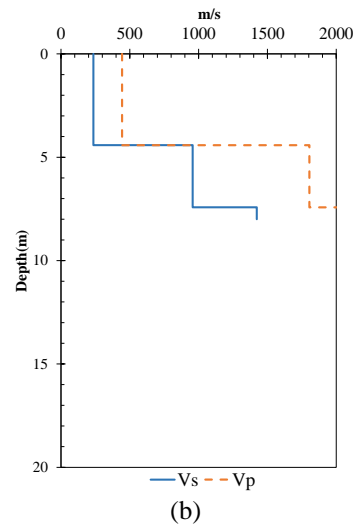
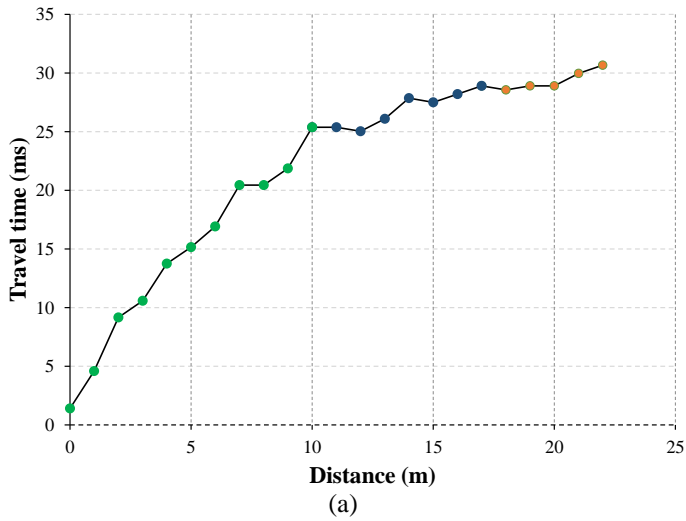


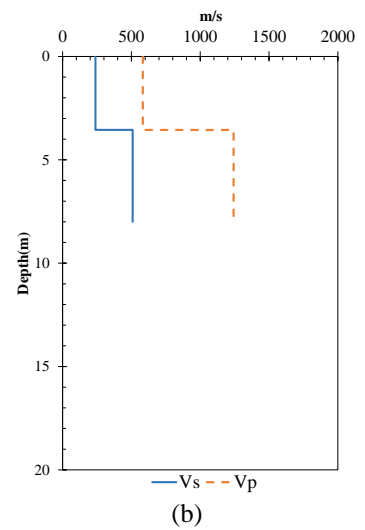
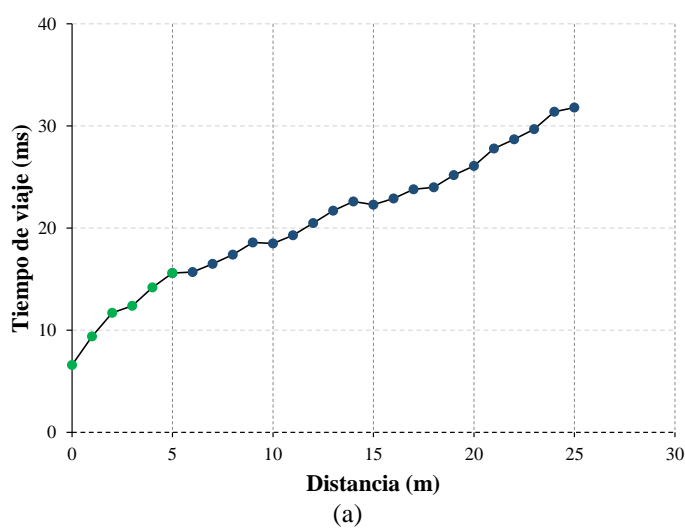
Figura C.8: Perfil 8 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )



**Figura C.9:** Perfil 9 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )




**Figura C.10:** Perfil 10 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

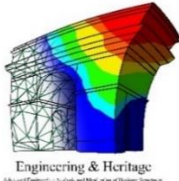


**Figura C.11:** Perfil 11 (a) curva de tiempo de viaje de la onda P y (b) velocidad de onda P ( $V_p$ ) y onda S ( $V_s$ )

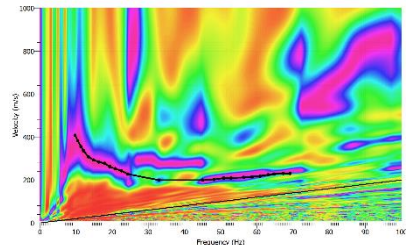
# Anexo D

## Registro de sondaje con barreno manual – Huaca de la Luna

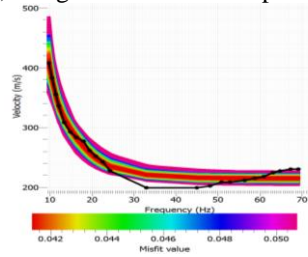
PERFIL DEL SUELO			Perforación B-1			
Proyecto : HUACA DE LA LUNA			 <small>Engineering &amp; Heritage</small>		Página: 1 de 1	
Ubicación: :Moche-Trujillo					Fecha :12-13/07/2015	
Referencia: En la misma ubicación que SCPT-4					Fondo:-3.35 m	
Método de excavación : Barreno manual			Superficie : +/- 0.00 m			
Cotas: Referencia : Nivel del terreno: +0.00m			Nivel Freático: NO Profundidad:-			
Prof.(m)	SUCS	DESCRIPCIÓN	MUESTRA			
			Nº	Tipo	Prof.(m)	
0.00		Arena limosa/arcilla	1	Mab	0.30-0.35	
			2	Mab	0.80-0.85	
			3	Mab	0.90-0.95	
		Arena limpia	4	Mab	1.30-1.35	
		Arena limosa	5	Mab	2.10-2.15	
2.00						
		Arena gravosa	6	Mab	3.00-3.10	
		Fin del ensayo – 3.35 m				
4.00						
5.00						
Mab = muestra en bolsa      Mib = muestra en bloque      Pm = penetrómetro manual Mis = muestra en shelby      Dn = densidad natural      qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> )						

PERFIL DEL SUELO			Perforación B-2		
Proyecto : HUACA DE LA LUNA			 Engineering & Heritage	Página: 1 de 1	
Ubicación: :Moche-Trujillo				Fecha :14/07/2015	
Referencia: Frente a la fachada oeste, cerca de túnel de huaquero				Fondo:-3.40 m	
Método de excavación : Barreno manual				Superficie : +/- 0.00 m	
Cotas: Referencia : Nivel del terreno: +0.00m			Nivel Freático: NO Profundidad: -		
Prof.(m)	SUCS	DESCRIPCIÓN	MUESTRA		
			Nº	Tipo	Prof.(m)
0.00		Arena mal gradada (SP)	1	Mab	0.40-0.45
		Arena limosa, lentes de arcilla (posibles rastros de adobe)	2,3,4	Mab	1.00-1.50
2.00		Arena limpia	5	Mab	1.80-1.90
		Arena limpia	6	Mab	3.35-3.40
4.00		Fin del ensayo – 3.4 m			
Mab = muestra en bolsa      Mib = muestra en bloque Mis = muestra en shelby      Dn = densidad natural			Pm = penetrómetro manual qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> )		

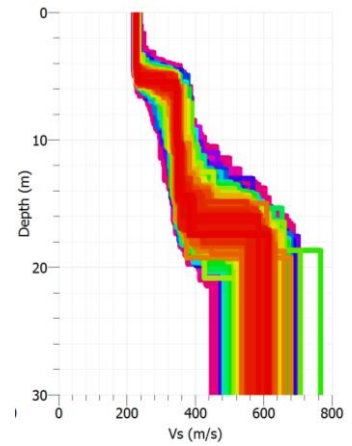
## Resultado de perfiles de Vs en la Iglesia de Andahuaylillas



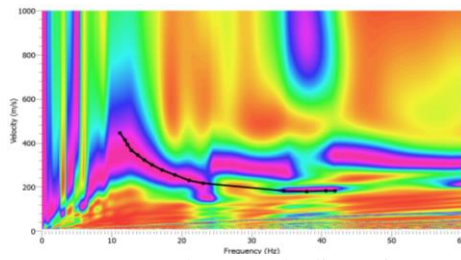
(a) Imagen de curva de dispersión



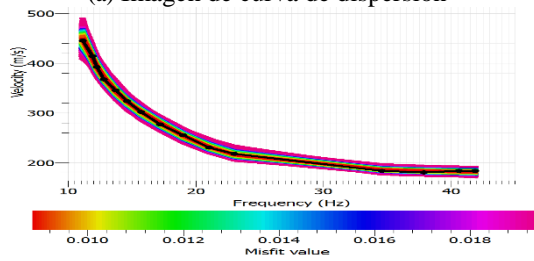
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura E.1: Línea MASW 1**



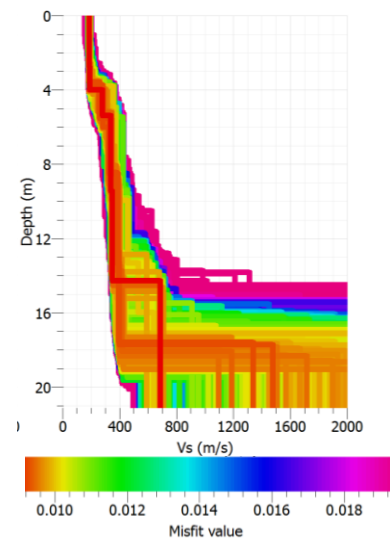
(c) Perfil velocidad de onda de corte



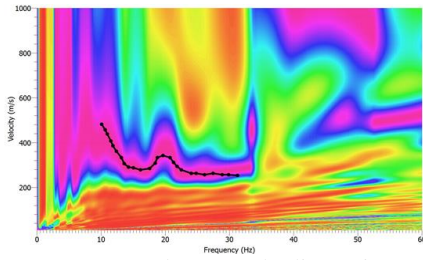
(a) Imagen de curva de dispersión



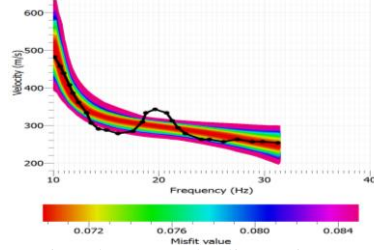
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura E.2: Línea MASW 2**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

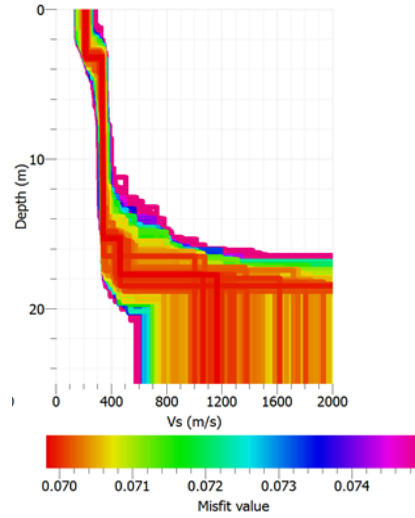


(a) Imagen de curva de dispersión

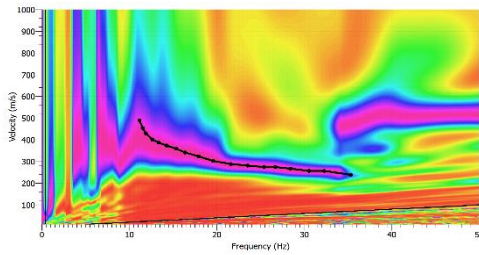


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

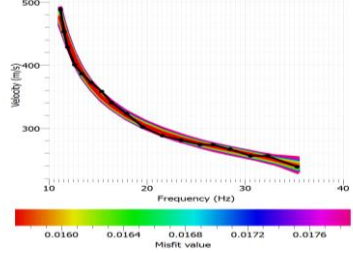
**Figura E.3: Línea MASW 3**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

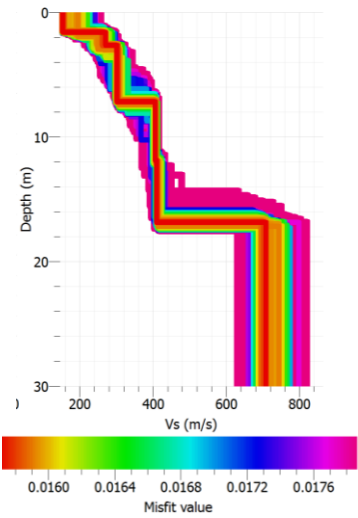


(a) Imagen de curva de dispersión

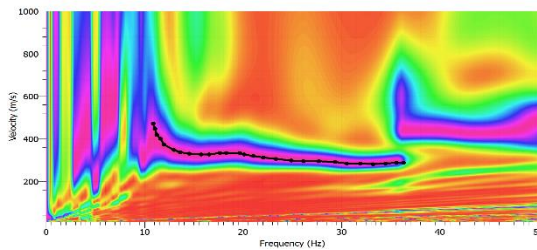


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

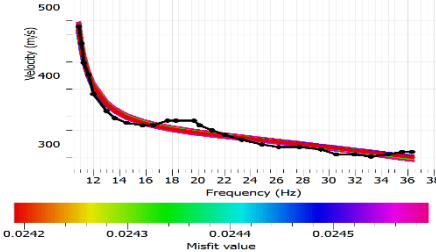
**Figura E.4: Línea MASW 4**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

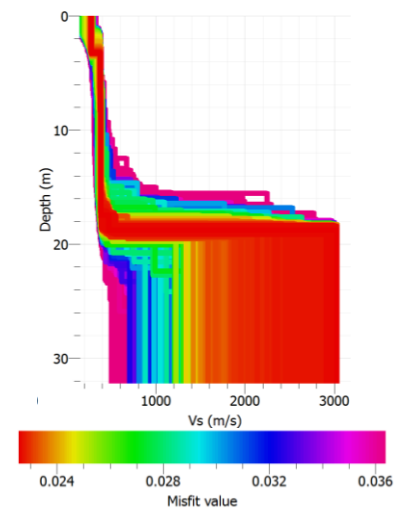


(a) Imagen de curva de dispersión

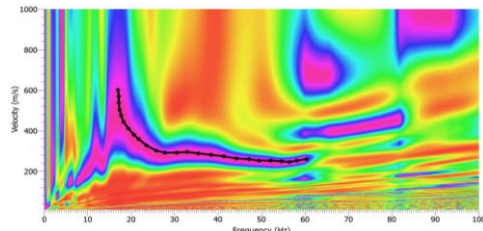


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

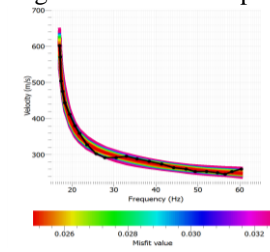
**Figura E.5: Línea MASW 5**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

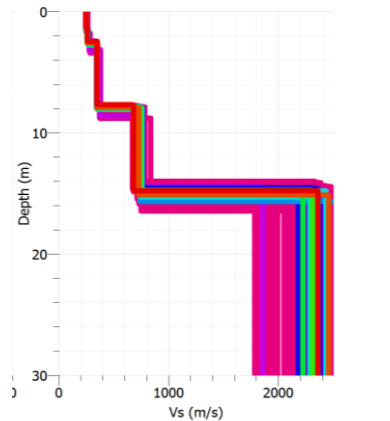


(a) Imagen de curva de dispersión

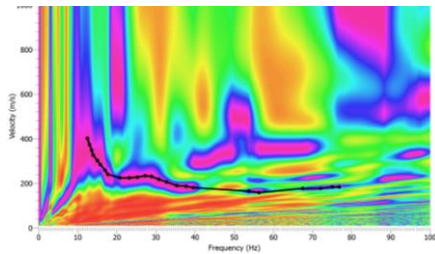
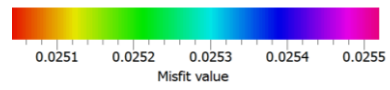


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

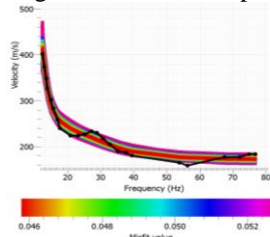
**Figura E.6: Línea MASW 6**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

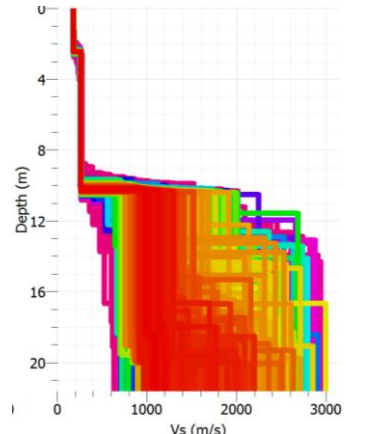


(a) Imagen de curva de dispersión

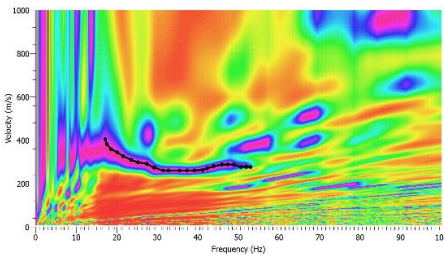
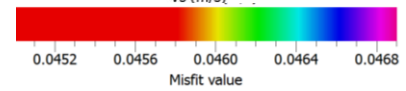


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

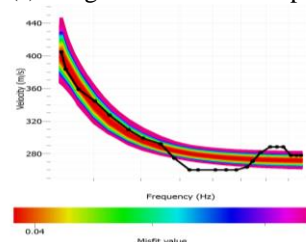
**Figura E.7: Línea MASW 7**



(c) Perfil velocidad de onda de corte

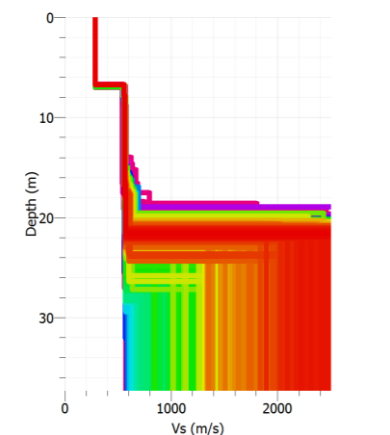


(a) Imagen de curva de dispersión

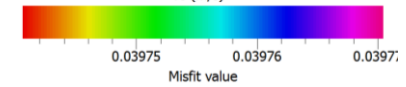


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

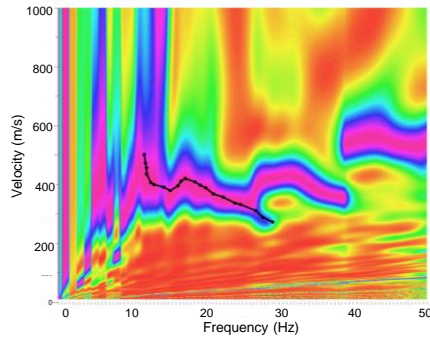
**Figura E.8: Línea MASW 8**



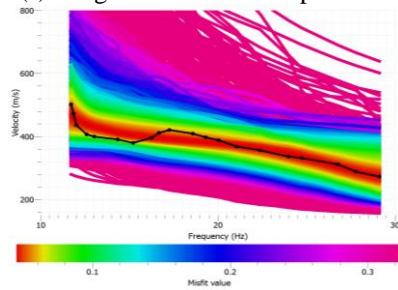
(c) Perfil velocidad de onda de corte



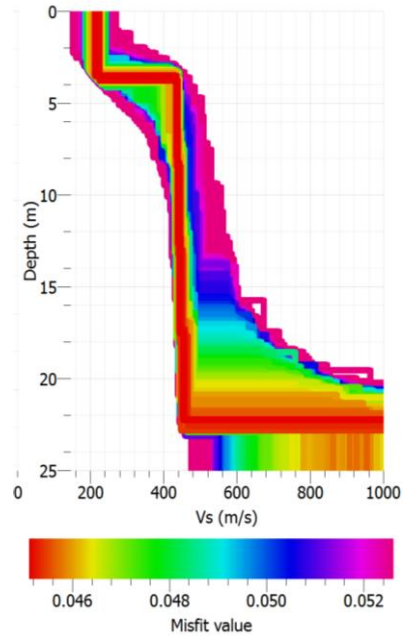
## Resultado de perfiles de Vs en la Iglesia de Huaro



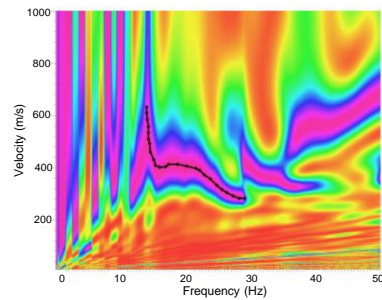
(a) Imagen de curva de dispersión



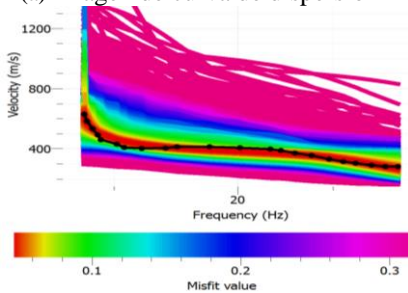
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura F.1: Línea MASW 1**



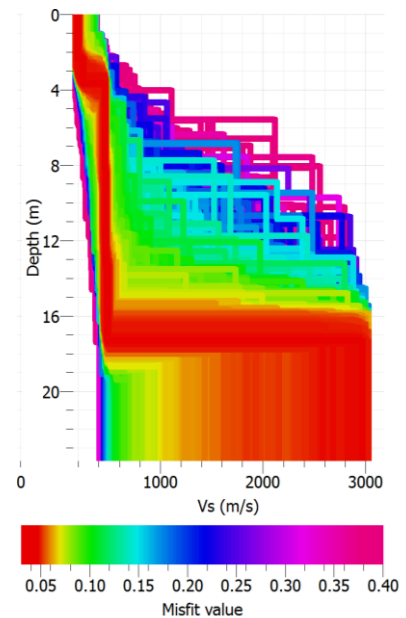
(c) Perfil velocidad de onda de corte



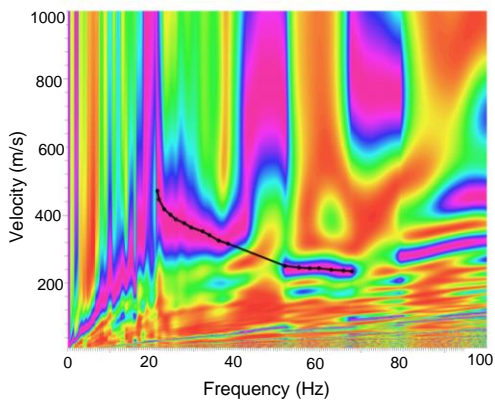
(a) Imagen de curva de dispersión



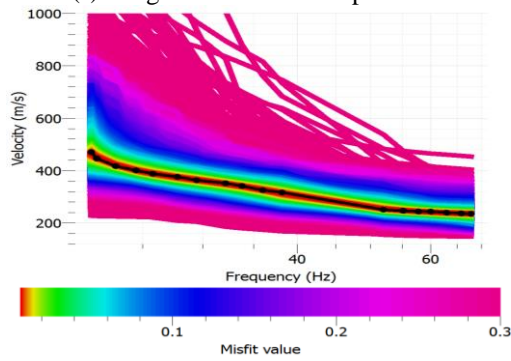
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura F.2: Línea MASW 2**



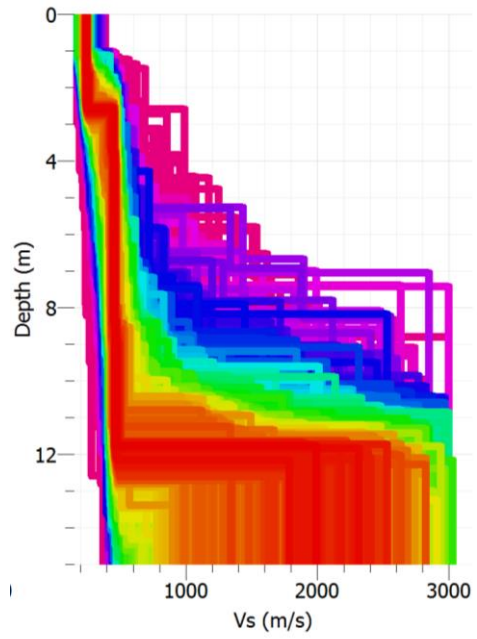
(c) Perfil velocidad de onda de corte



(a) Imagen de curva de dispersión

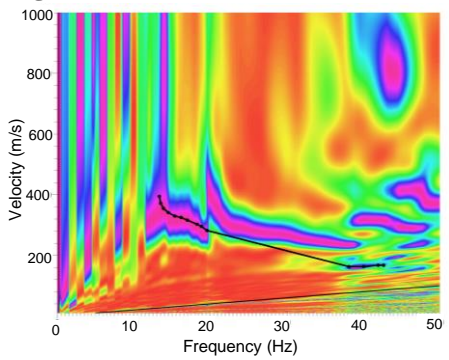


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

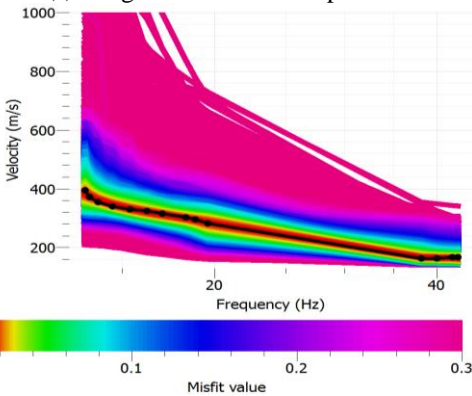


(c) Perfil velocidad de onda de corte

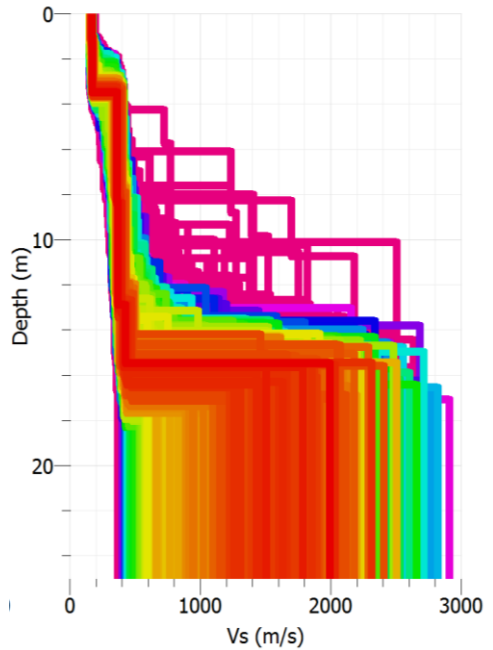
**Figura F.3: Línea MASW 3**



(a) Imagen de curva de dispersión

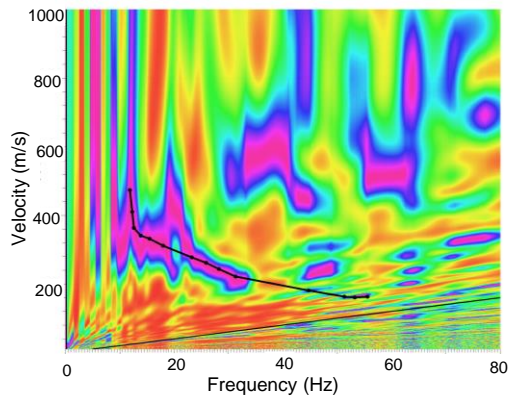


(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica

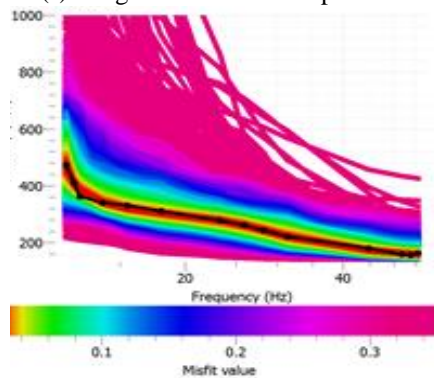


(c) Perfil velocidad de onda de corte

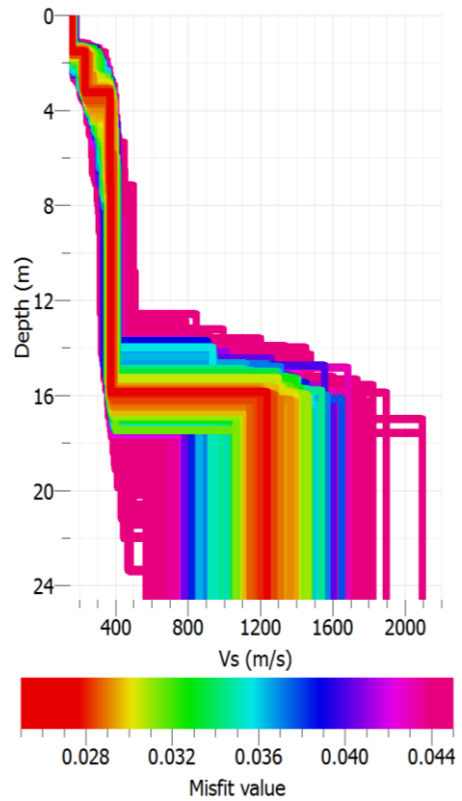
**Figura F.4: Línea MASW 4**



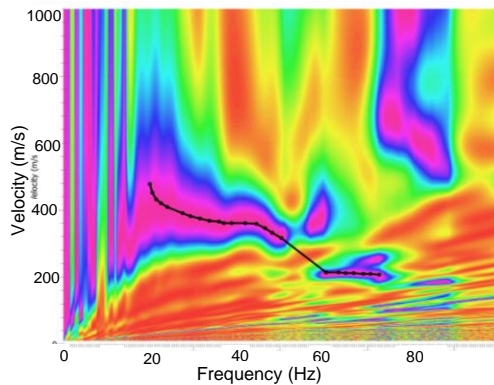
(a) Imagen de curva de dispersión



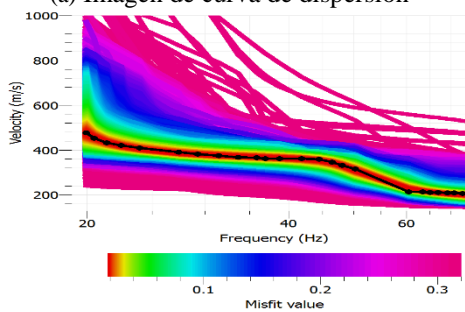
(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura F.5: Línea MASW 5**



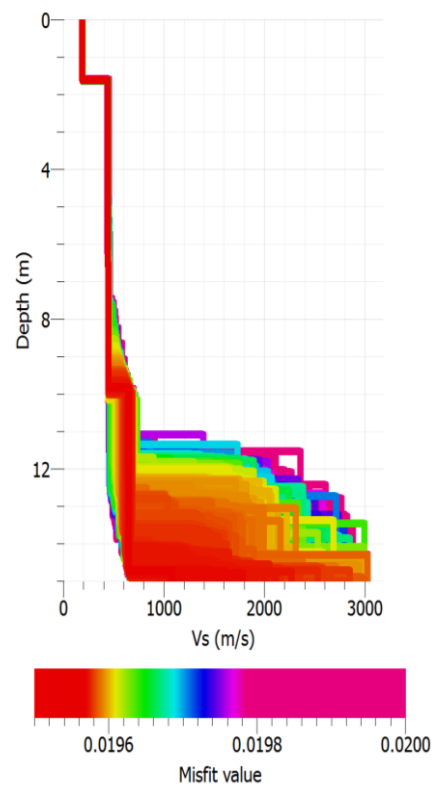
(c) Perfil velocidad de onda de corte



(a) Imagen de curva de dispersión



(b) Comparación de curva de dispersión exp. y teórica  
**Figura F.6: Línea MASW 6**



(c) Perfil velocidad de onda de corte